

EL FUTURO DEL ESPACIOTIEMPO

STEPHEN HAWKING

INTRODUCCIÓN DE RICHARD PRICE

KIP S. THORNE,
IGOR NOVIKOV,
TIMOTHY FERRIS,
ALAN LIGHTMAN



Desde Einstein, y sobre todo a partir de su teoría de la relatividad general, sabemos que los fenómenos naturales tienen lugar en un marco geométrico de cuatro dimensiones, en el espaciotiempo. En este libro algunos de los físicos y divulgadores científicos más importantes de nuestro tiempo exploran las posibilidades más llamativas que nos abre el espaciotiempo einsteiniano. Tras una excelente introducción, en la que Richard Price suministra las herramientas conceptuales básicas para poder comprender qué es eso que llamamos «espaciotiempo», Igor Novikov introduce a los lectores en las posibilidades de los viajes en el tiempo con sencillas explicaciones y modelos que evitan las típicas paradojas que se producen cuando el viaje conduce a tiempos anteriores al de partida. Sin embargo, los viajes en el tiempo son, tal vez, imposibles porque pueden violar leyes físicas que aún no hemos descubierto: esta es la cuestión que aborda Stephen Hawking con su maestría habitual. Por su parte, Kip Thorne mira a un futuro en el que se pueda comprobar una de las predicciones de la teoría de la relatividad general, la de la radiación gravitacional, que ha desafiado hasta el momento todos los intentos de ser detectada, mientras que Alan Lightman y Timothy Ferris abordan aspectos más «externalistas» que conectan la ciencia del espaciotiempo, y la ciencia en general, con la cultura, entendida ésta en su sentido más amplio. Y es que no hay verdadera cultura sin ciencia.



Stephen Hawking, Kip S. Thorne, Igor Novikov, Timothy Ferris,
Alan Lightman y Richard Price

El futuro del espaciotiempo

ePub r1.0

3L1M4514505.04.16

más libros en epubgratis.org

Título original: *The future of spacetime*

Stephen Hawking & Kip S. Thorne & Igor Novikov & Timothy Ferris & Alan Lightman & Richard Price, 2002

Traducción: Javier García Sanz

Editor digital: Titivillus

Aporte original: Spleen

ePub base r1.2

Prefacio y agradecimientos

Éste no es un libro homogéneo. Para empezar, es una amalgama de ensayos curiosamente diferentes que han sido reunidos dejando las marcas de la soldadura al descubierto. Nuestro editor en W. W. Norton, Ed Barber, nos ha apoyado mucho a lo largo del proceso de soldadura, pero en varias ocasiones creímos oírle murmurar nerviosamente (pero dando apoyo) la palabra «batiburrillo». De hecho, el libro es exactamente como debería ser, una colección ecléctica y encantadoramente heterogénea. Así son la ciencia y los científicos: mezclas, sin fuertes restricciones y, con frecuencia, sin una organización muy evidente.

Hay principios organizadores detrás del libro: las contribuciones son excelentes y legibles —difícilmente se encontrará una ecuación—. Todas ellas están relacionadas con la física moderna del espacio y el tiempo. Y, lo que es más importante, son adaptaciones de charlas dadas el 3 de junio de 2000 en honor del sexagésimo cumpleaños de Kip Thorne del Instituto de Tecnología de California. Pero admitimos que el contenido crea algunas yuxtaposiciones pintorescas. Hay tres ensayos que divulgan ciencia, un ensayo sobre la forma de divulgar la ciencia y un ensayo sobre la diferencia entre ciencia y divulgación.

Este libro impuro nació de un engaño. Es tradicional celebrar el sexagésimo cumpleaños de los científicos importantes. Kip Thorne no sólo es un científico importante sino que también es importante personalmente para cada uno de nosotros. Queríamos hacer en esta ocasión algo realmente especial, pero su modestia era un inconveniente. Por ello recurrimos a lo que podría llamarse una farsa, o incluso una trampa, para que Kip aceptara recibir los honores y tomar parte en ello. Todo había sido preparado a espaldas de Kip. Cinco famosos oradores habían aceptado dar sus charlas; se había reservado el centro de celebraciones públicas de Caltech, el Beckman Auditorium. Cuando Kip supo toda la verdad ya era demasiado tarde para que él se volviera atrás.

Aquí presentamos adaptaciones de las charlas dadas ese día en Caltech. Los oradores invitados eran figuras distinguidas y consumadas, y atrajeron a una multitud. Dice mucho sobre el lugar de Kip en la comunidad el hecho de que no hubiera que recurrir a segundas elecciones. Todos a quienes se pidió que hablaran aceptaron la invitación. Aceptaron no cobrar por sus charlas ni por el uso de las adaptaciones de sus charlas en esta recopilación. El sábado 3 de junio de 2000 se impartieron gratuitamente las charlas. Las ganancias de este libro irán a una fundación en Caltech unida al nombre de Kip.

Lo que es suficientemente interesante para atraer a una multitud a un auditorio también debería ser de interés para muchos de ustedes que no pudieron estar en el lugar adecuado en el momento adecuado. Quizá este volumen carezca de la inmediatez de la presencia física de los oradores, pero permite una degustación más pausada de algunos platos de gourmet que no deberían ser consumidos apresuradamente.

En uno de los ensayos que siguen, Igor Novikov, director del Centro de Astrofísica Teórica en el NORDITA (Instituto Nórdico para Física), nos habla sobre el viaje en el tiempo: un tema que parece extraño y maravilloso incluso para una comunidad científica que se siente tan cómoda con los agujeros negros como con unos zapatos viejos. Se nos introduce en el tema con explicaciones sencillas y modelos mecánicos simples de cómo evitar paradojas cuando se viaja hacia atrás a un tiempo anterior. Aun si no es paradójico, el viaje en el tiempo quizá sea imposible. Stephen Hawking, Profesor Lucasiano de Matemáticas en Cambridge y uno de los más famosos científicos del mundo, ofrece los resultados de sus investigaciones sobre la pregunta «¿hasta qué punto imposible?». Aprendemos que esta pregunta exige ir hasta la misma frontera de lo que hoy se entiende en física, y que su respuesta exigirá ir un poco más allá. El ensayo de Kip Thorne es un intento de viajar a un tiempo futuro. [Todos acabamos haciéndolo, pero Kip se adelanta en una misión de exploración]. La astronomía de ondas gravitatorias será una realidad en el futuro próximo, y Kip comparte su entusiasmo por los

descubrimientos excitantes que producirá en un futuro menos cercano.

*Los dos últimos ensayos constituyen un conjunto que difiere algo de las explicaciones científicas de los anteriores. Uno es debido a Timothy Ferris, un destacado escritor y periodista científico, que ha fijado alto el listón para lo que debe ser la divulgación de la astronomía y la cosmología, con libros como *The Red Limit*, *The Whole Shebang*^[1] y *Coming of Age in the Milky Way*. Él nos habla sobre la necesidad y la dificultad de explicar la ciencia, e incluye una parte de un guión cinematográfico que cae en algún lugar entre la ciencia y el arte, o en ambos. Alan Lightman vive ciertamente en ambos mundos. De ser un físico destacado con pasión por la escritura, ha pasado a ser un escritor destacado con pasión por la física. Para aquellos que no se dediquen a la física o participen en el Programa de Escritura del MIT, Alan es probablemente más conocido por el best-seller *Sueños de Einstein* de 1993. Puesto que ha experimentado los tipos muy diferentes de creatividad que forman parte de la ciencia y forman parte del arte, él tiene la rara autoridad para ofrecer una comparación de ambos en su ensayo.*

Además de adaptaciones de las cinco charlas, Richard Price, un teórico del Departamento de Física de la Universidad de Utah, nos ofrece una breve introducción a las ideas de la física acerca del espaciotiempo, y a la historia de dichas ideas. Esta introducción establece el escenario para la ciencia mostrada, anunciada y ponderada por Timothy Ferris, Stephen Hawking, Alan Lightman, Igor Novikov y Kip Thorne.

Este libro debe su existencia a la celebración del Festival Kip en Caltech a principios de junio de 2000. Por lo tanto está en deuda con las muchas personas que ayudaron a que dicho evento tuviera lugar. Nosotros siete formábamos el comité organizador de dicho evento, pero éramos sólo un pequeño subconjunto de los que contribuyeron. Algunos de éstos deben ser mencionados.

Ciertamente el libro y el evento no podrían haberse dado sin el apoyo, tanto financiero como logístico, de la administración de Caltech. En particular, hay que agradecerse a David Baltimore, presidente de Caltech, y Thomas Tombrello, director de la División de Física, Matemáticas y Astronomía de Caltech. David Goodstein, vicedecano de Caltech, merece un agradecimiento especial por actuar como maestro de ceremonias en las charlas.

Además del apoyo financiero de Caltech, el Festival Kip recibió gran parte de la financiación necesaria de David Lee y su compañía Global Crossing. Gracias David.

Hubo muchos que ayudaron de muchas maneras: el consejo del Beckman Auditorium, el personal de relaciones públicas de Caltech, el Athenaeum de Caltech, Lynda Williams (la «Physics Chanteuse»), y todos aquellos que cruzaron el mundo o el campus de Caltech para tomar parte. ¡Gracias a todos!

EANNAFLANAGAN,SANDORKOVACS,
RICHARDPRICE,BERNARDSCHUTZ,
CLIFFORDWILL,LESLIEWILL,
ELIZABETHWOOD

Introducción

Bienvenidos al espaciotiempo

RICHARD PRICE

Una fiesta en el espaciotiempo

Es curioso cuánto tiempo espera uno para hacerse algunas de las preguntas más importantes, incluso preguntas sobre su propia vida. A veces tiene que esperar a un suceso que le anime a detenerse y echar la vista atrás. Un acontecimiento de este tipo fue la celebración del sexagésimo cumpleaños de Kip S. Thorne. Kip (él se siente incómodo con cualquier título más pomposo) es uno de los teóricos de la física del espaciotiempo más conocidos del país, y un gran divulgador de su extraña ciencia. Es una persona cuya humanidad es tan singular como su intelecto, una persona que influyó en las vidas de muchos que trabajaron con él. Un simposium para celebrar el sexagésimo cumpleaños de un científico importante es una especie de tradición en física, pero la sensación que flotaba en el aire en Caltech en junio de 2000 era evidentemente mucho más compleja. Asistir a la celebración era una expresión de afecto tanto como de homenaje.

Deber y deseo atrajeron a los físicos que alguna vez se habían cruzado en la carrera de Kip, desde mediados de la década de 1960 hasta el presente, de modo que un estudiante de la física del espaciotiempo que pasease los días 2 y 3 de junio por el Ramo Auditorium de Caltech durante las pausas para el café podía ver un museo viviente de la ciencia de la época. Las piezas de este museo incluían a colegas que se habían perdonado mutuamente algún desaire pasado y volvían a dirigirse la palabra, físicos que estaban presentando torpemente a sus nuevas esposas, y colegas, en otro tiempo estudiante y profesor, que ahora llegaban a una igualdad más relajada con el paso del tiempo. El hecho de que la reunión coincidiera con la llegada de un nuevo milenio podría haber impresionado a una muchedumbre más impresionable, pero esta vez había un acontecimiento más apropiado para la ocasión: la inminente terminación de un sistema mundial de detectores para detectar ondas gravitatorias, oscilaciones en el espaciotiempo.

El cumpleaños era un recordatorio del paso del tiempo. La reunión de viejos amigos y rivales creaba la sensación monocroma de una película sueca, pese a las palmeras de los alrededores. Era el momento de plantear algunas preguntas pendientes. ¿Qué impulsa a personas razonables (aquí se está haciendo una hipótesis) a dedicar sus vidas al estudio de la naturaleza del espacio y el tiempo?

En el momento de escribir esta introducción se cierra un siglo caracterizado por la ciencia, especialmente por la física. Después de todo, Albert Einstein fue escogido por la revista *Time* (el nombre resulta irónico) como la personalidad del siglo. Einstein había iniciado el siglo de forma impresionante en su año milagroso de 1905. En ese año, dio la demostración estadística de la naturaleza atómica de la materia y, con su explicación de los fotones que inciden en superficies metálicas, que le valió el Premio Nobel, ayudó a poner en marcha la revolución cuántica con la que nunca se sintió cómodo. Pero tanto entre científicos como entre no científicos, la respuesta más probable a «Einstein» en un test de asociación de palabras sería citar su tercer milagro de 1905: la «relatividad», la teoría de la estructura del espacio y el tiempo.

¿Qué había en ese trabajo, y no en su más relevante y «útil» trabajo sobre átomos y fotones, para hacer de Einstein una celebridad y un héroe? Probablemente es el hecho de que trabajamos diariamente con el espaciotiempo, y creemos que sabemos lo que es. Los átomos son demasiado pequeños, los fotones son demasiados; no tenemos opiniones firmes sobre estas cosas. Cuando se nos dan noticias sobre ellos, las aceptamos como parte del progreso metódico de la ciencia. La materia está hecha de (tipos de) unidades indivisibles; la luz tiene

una naturaleza de onda y de partícula a la vez. Quien no es científico no tiene pruebas para contradecir el primer enunciado, y ninguna comprensión clara de lo que se entiende por el segundo. Pero en 1905 Einstein nos dijo también que el tiempo no es un reloj universal que marcha al mismo ritmo para todos, y que un gemelo que parte en un viaje en un cohete a gran velocidad no envejecerá tanto como el otro gemelo que se queda en casa. *Esto* se entiende y parece escandaloso. Lo que atrapó la imaginación popular era que es imposible, y pese a todo es correcto.

Estar equivocados nos sorprende. Nos enseña algo sobre nosotros mismos. No sólo hay cosas que no sabemos, sino que las cosas que sabemos pueden ser falsas.

La relatividad, o la física del espaciotiempo, con su aura de agujeros negros y un universo en expansión, capta nuestra atención porque es la materia de la vida diaria —espacio y tiempo— hecha exótica, como si el bibliotecario condujera un Ferrari vestido con una túnica indonesia. Esto explica, creo yo, la razón de la perenne fascinación que ejerce sobre los legos con conocimientos científicos. También explica la importancia de la relatividad para aquellos con demasiada poca paciencia y quizá demasiada autoconfianza. Cualquier físico relativista ha pasado por la experiencia de recibir, varias veces al año, una nueva teoría de la relatividad remitida por un pensador no-tradicional con inclinaciones técnicas que no ha «leído todos los libros» pero sabe dónde estaba equivocado Einstein.

Una respuesta a la pregunta «por qué» no es tan evidente para aquellos de nosotros que somos estudiantes, colegas y colaboradores de Kip. Hemos leído «todos los libros» y trabajamos con los detalles. Mi propia investigación, por ejemplo, trabaja fundamentalmente con matemática aplicada, la misma matemática aplicada que podría dedicarse a un trabajo honesto como la hidrodinámica o la ingeniería química. El asombro ante el hecho de que estos esfuerzos se dirijan a las colisiones de los agujeros negros se pierde fácilmente con la familiaridad. Lo mismo sucede con los aviones. Aplastados en nuestros asientos refunfuñamos sobre minucias y no mostramos ningún temor por habernos despegado de la Tierra. Pero a veces, observando desde una colina, vemos un enorme chorro que se desliza silenciosamente sobre una ciudad y nos quedamos atónitos. De la misma forma, yo a veces me despego de la computación y recuerdo que estoy tratando de desenmarañar enigmas sobre regiones del universo de las que no es posible escapar; ¡éste es el tipo de cosas de mi trabajo diario! (Y, lo que es aún más extraño, me pagan por ello).

Las contribuciones a este volumen ilustran varios temas diferentes que son parte de un tema más amplio. Stephen Hawking e Igor Novikov nos hablan sobre el viaje en el tiempo: un tema que parece extraño e iconoclasta incluso para una comunidad científica para la que los agujeros negros resultan tan cómodos como unos zapatos viejos. Luego interviene Kip Thorne para llevarnos en una dirección muy diferente, la de las ondas gravitatorias, oscilaciones del espaciotiempo que serán detectadas en el futuro cercano por experimentos a escala mundial; y Kip hace predicciones sobre lo que se descubrirá. Mientras las elucubraciones sobre el viaje en el tiempo tratan con lo que las leyes de la naturaleza podrían hacer imposible, Kip elucubra sobre lo que la tecnología puede hacer posible. Elucubraciones de un tipo muy diferente aparecen en otros capítulos. Alan Lightman expone sus ideas sobre las diferencias entre los actos creativos de escribir y de resolver un problema científico. ¿Cómo puede comunicarse la maravilla de este tipo de ciencia a quienes carecen de formación técnica? Tim Ferris, que ha tenido un éxito excepcional haciendo esto precisamente, nos da algunas respuestas en su contribución.

Esta introducción pretende establecer el escenario en el que actuarán los colaboradores. Presentaré un esbozo minimalista de lo que hacen exactamente los físicos cuando dicen que están trabajando sobre el espaciotiempo. Puesto que mi introducción saldría perdiendo inevitablemente en una comparación con algunas otras introducciones al tema, permítanme

rebajar las expectativas del lector. Aquí no voy a describir la interacción entre los lados técnico y humano de la historia, como tan bellamente hace Kip en su reciente libro de divulgación *Black Holes and Time Warps*.^[1] Tampoco voy a exponer las ideas introductorias con tanta perfección y claridad matemática como hacen Edwin Taylor y John Wheeler en su maravilloso librito *Spacetime Physics*.^[2] Si esta introducción despertara el interés del lector, los libros citados son excelentes textos de consulta. Aquí tocaré sólo la superficie, y a veces flotaré sobre la superficie. El objetivo principal de esta introducción es la brevedad, y eso se ha conseguido. Espero que no sea el único logro. Creo que sí da cierta sustancia a algunas de las ideas que aparecen en las colaboraciones aquí recogidas.

Las preguntas no son nuevas. El interés, quizá la obsesión, por la naturaleza del espacio y el tiempo es tan viejo como el pensamiento humano. Los pensadores clásicos tuvieron mucho que decir sobre el tema.^[3] Algo de ello parece ahora curiosamente ingenuo, y algo de ello sigue siendo impresionantemente profundo. (Para mí, Zenón, en particular, parece haber envejecido bien). La discusión se limitará aquí a las ideas modernas, ideas que necesitaron miles de años para evolucionar y que encontraron su implementación precisa en las matemáticas. Es una sorpresa agradable que las claves de una discusión tan moderna sean accesibles a quienes no tienen una amplia formación en matemáticas y física. Lo importante será trabajar de entrada con algunas palabras centrales que proceden del discurso cotidiano pero que han adquirido un significado especial y preciso en conexión con el espaciotiempo. La física no es muy diferente de otras ciencias en este sentido. Si uno no sabe lo que se entiende por «casar» un huevo, no sabrá hacer una tortilla; si uno no sabe lo que es un «suceso», no puede entender la geometría del espaciotiempo.

Observadores discrepantes

Una introducción a los términos especiales no tiene por qué ser abstracta o incómoda. La prueba de ello es el libro de Taylor y Wheeler, que con tanta claridad introduce los términos, las ideas y las matemáticas. Mi más sincero halago será tomar, sin modificación, algunas de las imágenes del comienzo de dicho libro.

La historia se abre con una persona de pie en mitad de un pequeño puente que cruza un río recto y estrecho que corre por un paisaje llano. Mira directamente río arriba y quiere dar una descripción *cuantitativa* de la localización de los lugares de interés, como el campanario de la vieja iglesia. Podría hacerlo de muchas formas diferentes. Podría decir que el campanario está a 924 metros de ella, y en una dirección a un ángulo de 30 grados a la izquierda. Alternativamente, podría advertir que la campana está a 800 metros «hacia delante» (en dirección río arriba) y 462 metros «a la izquierda» (lo que significa 462 metros a la izquierda del río, véase la fig. 1). Lo que es común a ambos métodos de descripción (y a cualquier otro método) es que debe especificar *dos* números. Por esa razón decimos que el conjunto de localizaciones en el paisaje es un mundo bidimensional. En física se suele decir que las medidas están hechas por un «observador» y el método de localizar puntos es un «sistema de referencia» asociado al observador. Los números concretos a los que llega nuestro observador (tales como 800 metros y 462 metros) se denominan «coordenadas» de una localización.

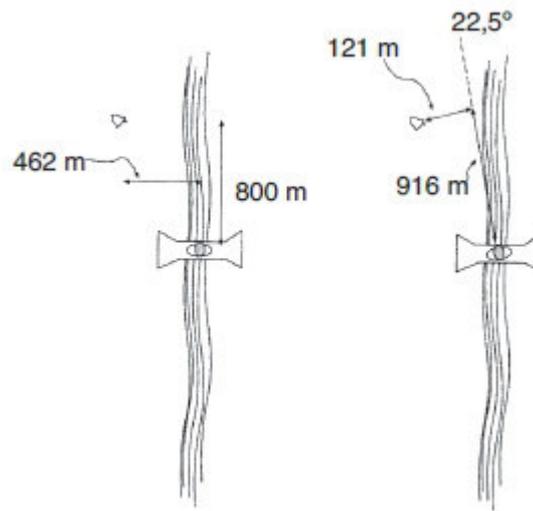


FIGURA 1. La misma localización con diferentes coordenadas.

La existencia e importancia de estos términos especiales sugiere correctamente que puede haber otros observadores y otros sistemas de referencia. De hecho, de esto es de lo que trata la relatividad: de la relación entre medidas (es decir, coordenadas) en diferentes sistemas de referencia. Es crucial, entonces, que tengamos otro observador y que nuestros observadores discrepen en las medidas. Pongamos que nuestro segundo observador está de pie en medio del puente, junto al primer observador. Él también está compilando una descripción cuantitativa del paisaje, el mundo bidimensional de localizaciones, y también lo hace utilizando el método «hacia delante y hacia la izquierda». Esto no nos aportaría nada nuevo si él estuviera mirando río arriba: estaría de acuerdo con el primer observador y no habría ninguna discrepancia instructiva. Supongamos, por lo tanto, que mira en una dirección diferente de la del primer observador. Mirará en una dirección a un cuarto del camino entre las direcciones «hacia delante» y «hacia la izquierda» o, dicho de otra forma, estará mirando a 22,5 grados a la izquierda de la dirección río arriba. Esto le da un sistema de referencia diferente y le coloca mirando en una dirección más próxima a la del campanario de la vieja iglesia. Como consecuencia, él mide coordenadas diferentes: el campanario está a 916 metros hacia delante y 121 metros hacia la izquierda.

Entendemos que realmente hay sólo un campanario en una sola posición, y que los dos observadores no discrepan sobre la localización, sino sólo sobre los números (coordenadas) que la caracterizan. Sabemos además que debe haber una relación entre las coordenadas marcadas por el primer y el segundo observador. Esta relación entre las coordenadas de cualquiera de los observadores se denomina una «transformación», otro de aquellos términos especiales. Es una expresión matemática de un tipo de relatividad, una relación entre las coordenadas medidas por un observador y por el otro. Dicha relación viene dada por fórmulas que se podrían enseñar con las matemáticas que se estudian en la enseñanza secundaria. No son fórmulas difíciles, pero las matemáticas distraen la atención de las ideas básicas que representan. Más que presentar fórmulas, en la figura 2 muestro las matemáticas como un aparato en donde se introducen como datos de entrada las posiciones hacia la izquierda y hacia delante según el primer observador y da como salida los valores tal como los marca el segundo observador. Por supuesto, debe haber otro dato de entrada para esta máquina: la forma de especificar la relación entre los dos sistemas de referencia. En nuestro caso, esto significa que debemos introducir la especificación «22,5 grados».

La máquina de la figura 2 no es otra cosa que las fórmulas: fórmulas que, en conjunto, un profesor de matemáticas de instituto podría llamar una «transformación rotacional». La máquina podría ser en realidad un chip de computador *muy* sencillo diseñado para no hacer

otra cosa que ejecutar las computaciones sencillas de la transformación rotacional. En la época maravillosa en que vivimos, sólo costaría unos céntimos construir cada una de estas máquinas.

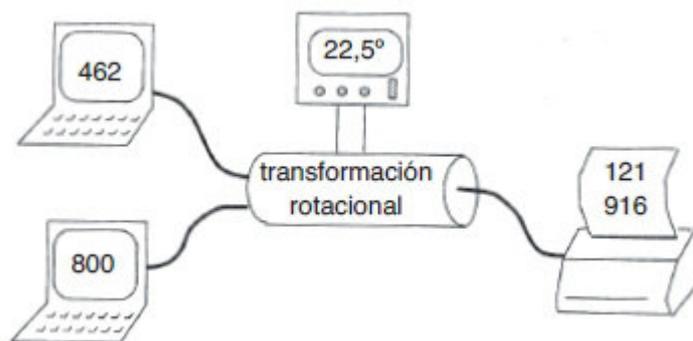


FIGURA 2. Las fórmulas de la transformación rotacional representadas como una máquina.

Hay una característica importante del conjunto de sistemas de referencia que han utilizado nuestros observadores. Para ver esto mejor, consideremos una forma muy diferente de identificar estructuras: por números ID. Supongamos que todas las estructuras de la ciudad son identificadas por números con el objetivo de gravar y cobrar impuestos de propiedad. Estos números fueron asignados de cierta manera por comodidad contable. Sigamos y supongamos que cambiara el sistema de asignar números fiscales ID (quizá se compró un nuevo ordenador para la oficina de contabilidad). Hay que mantener una tabla de las relaciones entre los viejos números ID y los nuevos; aquí se muestran dos ítems de dicha tabla.

EDIFICIO	ANTIGUO ID	NUEVO ID
Campanario	50070	CX23-004
Granero	34210a	BX48-213

Esta tabla es una relación entre dos sistemas de coordenadas, y —en cierto sentido— es un tipo de transformación.

La intuición nos grita que este tipo de transformación es de algún modo muy diferente de la transformación rotacional, pero ¿cuál es exactamente la diferencia real? Nuestra intuición insiste en que los ID fiscales y su relación son arbitrarios; son asignados por conveniencia de algún ordenador. Podría utilizarse cualquier sistema de identificación y podría «transformarse» en cualquier nuevo sistema de identificación. Por el contrario, las distancias hacia delante y hacia la izquierda medidas por los observadores en el puente no son arbitrarias. Pero ¿qué institución, qué autoridad superior, les impide ser arbitrarias? ¿Qué garantiza que la transformación rotacional sea correcta? En última instancia, es el hecho de que el escenario en el que están situadas las estructuras tiene cierta geometría, la geometría (normalmente llamada «geometría euclídea») de un plano. Entre dos localizaciones cualesquiera, digamos el campanario y el granero, de dicho plano hay una cierta distancia. Dicha distancia es una verdad inmutable, aunque las coordenadas (la coordenada hacia delante y la coordenada hacia la izquierda) utilizadas para describir la posición son variables. Puesto que hay una verdad inmutable no sometida a los caprichos de los sistemas de referencia, la relación entre coordenadas basadas en distancias en diferentes sistemas de referencia no puede ser «cualquier cosa».

Relatividad galileana

Provistos de una jerga bastante especial podemos ahora meter la punta del pie en el espaciotiempo. Igual que las localizaciones son los lugares en un paisaje, los «sucesos» son los lugares en el espaciotiempo. Un suceso es cierto lugar y cierto tiempo. Es una posición en el tiempo tanto como en el espacio. Evidentemente el mundo de tales sucesos —el mundo que llamamos espaciotiempo— es tetradimensional. Se necesitan tres coordenadas para especificar

el «dónde» de un suceso, y una coordenada para especificar el «cuándo».

Para tener una comprensión más concreta de esto necesitaremos considerar la discrepancia entre observadores, y por ello necesitaremos al menos dos observadores diferentes con dos sistemas de referencia diferentes. Uno de nuestros observadores será una granjera de pie en su campo mientras pasa lentamente un tren, y el segundo observador será el tren, o un pasajero sentado en el tren. Nuestros observadores en el puente encuentran una discrepancia en las coordenadas que utilizaron porque miraban en diferentes direcciones y, por ello, entendían cosas diferentes por «delante» y «a la izquierda». Ahora estamos interesados en un tipo de relación diferente, de modo que evitamos la discrepancia delante/izquierda haciendo que nuestra granjera y nuestro pasajero miren en la misma dirección. Para generar una discrepancia haremos que el tren se mueva en dirección hacia delante a 3 m/s. (A partir de ahora abreviaremos a veces metros, kilómetros y segundo como m, km y s, respectivamente; así, 3 m/s significa una velocidad de tres metros por segundo).

Hay dos características importantes del escenario que vamos a construir. Una es que hemos simplificado la acción haciendo que sólo sea importante una dimensión espacial. Sólo las posiciones a lo largo de la vía son interesantes; las distancias perpendiculares a la vía son triviales porque todos los sucesos tienen lugar a lo largo de la vía. Por lo tanto hemos eliminado dos coordenadas. Y lo que es más importante, hemos añadido una coordenada. Al introducir el movimiento en la historia, hemos abierto la puerta para que entre la coordenada temporal.

Por simplicidad diremos que el instante $t = 0$ es el momento en que el pasajero está pasando frente a la granjera. Es el momento en el que ambos coincidirían en las observaciones de un suceso. Es crucial para nosotros que seamos testigos de la discrepancia sobre sucesos, así que idearemos un incidente interesante en el instante $t = 2$ s. Supongamos que dicho incidente consiste en que un halcón atrapa un ratón, y que esto sucede en una posición a 16 m por delante de la granjera. Puesto que el pasajero (que se mueve a 3 m/s) se ha desplazado a 6 metros más allá de la granjera en el instante $t = 2$ segundos, la captura del ratón sucederá en una posición a sólo 10 metros por delante del pasajero. Esta situación simple se representa en la figura 3.

La granjera y el tren constituyen dos sistemas de referencia diferentes en los que están marcadas las coordenadas de posición y tiempo de los sucesos. La relación entre las coordenadas es, por supuesto, una transformación, y se conoce como la «transformación de Galileo». La idea general de la relación que da las coordenadas medidas en sistemas de referencia en movimiento se denomina «relatividad galileana».

En la figura 4 las matemáticas de la transformación de Galileo (en realidad dos ecuaciones muy sencillas) se representan como una máquina. Las posiciones espaciotemporales medidas por la granjera se introducen en los terminales, y lo que da como salida son las posiciones en el sistema de referencia del tren. Por supuesto, la máquina debe estar preparada para dar la relación correcta entre los sistemas de referencia. Esto está determinado por la velocidad, 3 m/s, a la que el tren se mueve cuando pasa frente a la granjera. Esta relación más específica se introduce en el panel de control de la máquina.

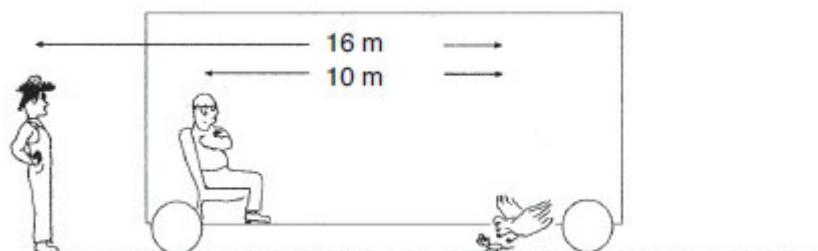


FIGURA 3. Un suceso observado en dos sistemas de referencia diferentes.

Habría que comparar esta transformación con la transformación entre coordenadas medidas por los dos observadores en el puente (véase la fig. 2). Esta transformación tiene una forma de algún modo similar pero con importantes diferencias. Para los observadores sobre el puente había una mezcla completa de hacia delante y hacia la izquierda. El delante y la izquierda del primer observador determinaban el delante y la izquierda del segundo observador. En nuestra transformación entre tren y granjera hay sólo una mezcla parcial. La coordenada de distancia medida por la granjera está afectada tanto por la coordenada de distancia como por la coordenada temporal medidas por el pasajero, pero el tiempo medido por la granjera no está influenciado por la coordenada del suceso. La segunda fórmula incorporada en nuestra máquina de transformación dice simplemente que 2 segundos es igual a 2 segundos. El espacio no se mezcla en el tiempo.

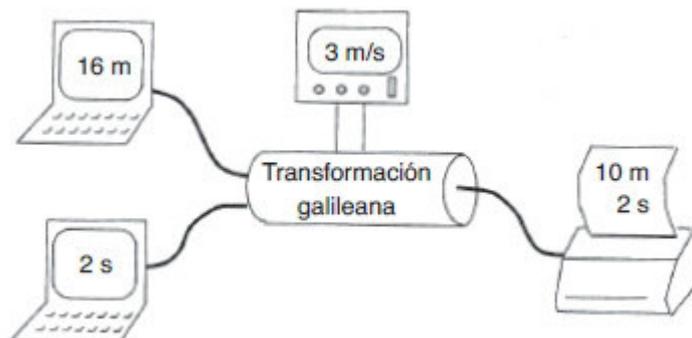


FIGURA 4. La transformación de Galileo entre sistemas de referencia en movimiento relativo.

En realidad, lo que nos dice parece obvio, demasiado obvio para merecer un nombre rimbombante. La expresión «relatividad galileana» es, de hecho, una expresión moderna que sólo utilizamos *ahora* para distinguir las nociones clásicas obvias de espacio y tiempo de las nociones nada obvias en la relatividad einsteiniana. Estas nociones, junto con la estética y la psicología, son el fundamento para el desarrollo de las revoluciones científicas. En muchos aspectos es una historia de la evolución de lo que es y de lo que no es obvio.

Aunque la relatividad galileana era obvia, fue de gran importancia para la física de Newton. Newton había dado al mundo el mandamiento $F = m \times a$; la aceleración es proporcional a la fuerza. Todos los observadores (granjeros, trenes y demás) ven las mismas fuentes de fuerza. Ven la misma curvatura de un arco, por ejemplo, y por ello la misma fuerza impartida a una flecha. Cuando se suelta la cuerda del arco, todos ellos deben ver que la flecha experimenta la misma aceleración. Si no lo hicieran, entonces el mandamiento de Newton sólo funcionaría en algunos sistemas de referencia; incluso podría no funcionar en ninguno. Pero la aceleración es una medida del modo en que cambia la posición espacial cuando cambia el tiempo. La comparación de la aceleración en dos sistemas de referencia diferentes depende de las reglas de transformación entre dichos sistemas de referencia. Resulta que una consecuencia de la transformación de Galileo es que la aceleración es la misma en todos los sistemas de referencia. Cuando marcan las posiciones de la flecha en una secuencia de instantes, la granjera y el pasajero en el tren *sí* llegan al mismo número para la aceleración de la flecha mientras la cuerda la está impulsando. El mandamiento fundamental de Newton funciona *en efecto* en todos los sistemas de referencia.

¡Esto incomodaba a Newton! Por sus particulares razones filosóficas, psicológicas o estéticas, él anhelaba un universo físico en el que un sistema de referencia especial —quizá el sistema de referencia de la granjera— fuera el único y verdadero sistema de referencia para la física. Pero no había razones en su física para creer en la existencia de semejante sistema de referencia «correcto». Quizá la actitud de Newton estaba enraizada en una necesidad humana de que haya algo sólido y absoluto, un sistema verdadero. Si es así, resulta interesante que haya

cambiado tanto la moda filosófica o psicológica de los físicos. Para los ojos y las mentes modernas, la democracia de los sistemas de referencia es una característica atractiva de la mecánica newtoniana.

Maxwell provoca una crisis

Salvo la incomodidad de Newton, el mundo físico parecía tener sentido durante los siglos XVIII y XIX. El conocimiento no avanza uniformemente como un patinador sobre el hielo. Avanza a saltos, como cuando se saca un tapón de una botella. Cuanto más tiempo está cerrada la botella, más adherido está el tapón. Una idea como la de un universo geocéntrico estaba extraordinariamente adherida porque había estado en su lugar durante mucho tiempo. Durante siglos, los astrónomos precopernicanos no se cuestionaron si la Tierra era o no el centro del universo. Si había dificultades, buscarían remedios en otro lugar. Aquellos astrónomos elaboraron un método de cálculo extraordinariamente complejo para predecir y explicar el movimiento de los cuerpos celestes. Se partía de un método de predicción originalmente simple que se mostró inadecuado a medida que mejoraban las observaciones del movimiento planetario. Se invocaron construcciones matemáticas, los «epiciclos», para mejorar las predicciones, y se forzó la teoría básica para que pareciera que funcionaba. Este ciclo de mejoras continuó, añadiendo primero observaciones astronómicas, y añadiendo luego más componentes poco flexibles al método.

Cuando miramos atrás a lo que estaban haciendo, nos resulta difícil de creer. ¿Cómo no se dieron cuenta de que la idea simple y elegante de un mundo heliocéntrico lo explicaba todo? Si se equivocaron tanto en lo que ahora parece obvio es porque, a cada paso, se sentían seducidos para seguir por el camino equivocado. El inicio del camino apuntaba en una dirección razonable, y una vez bien entrados en el camino era difícil ver que había caminos alternativos. Hay momentos críticos en la ciencia en los que la presión ha aumentado tanto que el tapón está a punto de soltarse, pero estos momentos especiales requieren mentes especiales. Los hechos se enseñan al mismo tiempo que las falsas ideas. Quienes conocían los detalles del movimiento planetario habían quedado sumidos en un discurso geocéntrico. En los momentos especiales se necesita un genio (un término ciertamente justificado) que sea capaz de separar los hechos robustos de los dogmas frágiles. El momento crítico para entender el sistema solar llegó a finales del siglo XVI, y fue Copérnico el genio en el lugar y el momento adecuados.

Otro momento crítico surgió a comienzos del siglo XX, y en este instante preciso y lugar preciso fue Albert Einstein la persona adecuada. Una fantasía habitual consiste en volver al pasado en posesión del conocimiento de un hecho crucial o una idea clave, algo ampliamente conocido ahora pero desconocido en el pasado: el material correcto para utilizar como filamento de una bombilla eléctrica, la idea de que las nebulosas son islas de estrellas distantes, el modelo nuclear del átomo... En el momento correcto en el pasado, cada uno de estos fragmentos de magia calificarían de genio a quien los poseyese. La magia que se necesitaba a principios del siglo XX era una idea simple que hoy es más o menos entendida por la mayoría de los licenciados en física. Esta magia es matemáticamente simple, puede enunciarse de forma sucinta y tiene su raíz en el trabajo de otro genio.

A finales del siglo XIX, James Clerk Maxwell añadió una pieza que faltaba a una ecuación denominada «ley de Ampère», y al hacerlo unió todo lo que se sabía sobre electromagnetismo (electricidad y magnetismo). Para aquellos que las practican, las matemáticas pueden tener una belleza. La teoría de Maxwell no sólo explicaba todo lo que se sabía sobre electromagnetismo sino que lo hacía de una forma tan bella que aún es un modelo para otras teorías.

La teoría de Maxwell consiste en cuatro ecuaciones. Estas ecuaciones trabajan con fuerzas eléctricas y magnéticas, pero también implican al espacio y al tiempo. Un término típico en una de las ecuaciones de Maxwell multiplicaría una fuerza magnética en cierto punto del espacio por la coordenada espacial de dicho punto. Otro término típico representa el ritmo al que está

cambiando la fuerza eléctrica cuando cambia el tiempo. Las ecuaciones de Maxwell son relaciones entre tales términos: el primer término más 4π veces el segundo término es igual al tercer término, algo tan simple como $A + B = C$. Supongamos que nuestra granjera, de pie junto a la vía del tren, hiciera un cálculo de cada uno de los términos en una de las ecuaciones de Maxwell. Multiplicaría la fuerza magnética en un punto por la coordenada espacial de dicho punto en su sistema de referencia; encontraría cuánto cambia la fuerza eléctrica en cada milisegundo de su tiempo; y así sucesivamente. Entonces vería si todos los términos que ha calculado se «suman», si satisfacen o no la ecuación adecuada de Maxwell.

Supongamos que encuentra que los términos se suman, que para ella la ecuación de Maxwell es correcta. Nuestra curiosidad se vuelve entonces hacia el pasajero del tren. La forma en que éste asigna coordenadas de posición a los sucesos será diferente de la de la granjera, de modo que los valores de los términos en la ecuación de Maxwell serán diferentes de los valores que calcula la granjera. Entonces debemos hacer una pregunta crucial. ¿Pueden los términos de Maxwell «sumar» lo mismo para el pasajero que para la granjera? ¿Conspiran todos los cambios en los términos de modo que la teoría de Maxwell funcione para ambos observadores?

La respuesta es no. Si relacionamos los términos mediante la relatividad galileana, las ecuaciones de Maxwell no pueden funcionar para ambos, granjera y pasajero. Sólo pueden ser válidas en un único sistema de referencia. La teoría de Newton de fuerzas y movimiento funciona en cualquier sistema de referencia; la teoría del electromagnetismo de Maxwell sólo puede funcionar en uno. Cuando terminaba el siglo XIX, parecía que la sospecha de Newton dos siglos antes había sido correcta. *Había* un sistema de referencia especial para las leyes físicas; era el sistema de referencia en el que funcionaban las ecuaciones de Maxwell. ¿Quién podría oponerse a que se llamase a éste el verdadero sistema de referencia del mundo físico?

De modo que, ¿cuál era exactamente este verdadero sistema? Los experimentos para descubrir el verdadero sistema requerían gran precisión y no eran fáciles. La búsqueda experimental de este sistema es una historia muy repetida, y el final de la historia es bien conocido. No se encontró ningún sistema especial. La teoría de Maxwell funcionaba para ambos, granjera y tren. Los experimentos decían que era así, pero las matemáticas decían que esto era imposible. Esta imposibilidad, por supuesto, estaba basada en una cierta manera de relacionar las coordenadas espaciales y el tiempo de la granjera y el tren. Es decir, la imposibilidad estaba basada en la relatividad galileana. El detective científico (aunque de ficción) Sherlock Holmes decía al Dr. Watson que cuando uno se enfrenta a un misterio debe rechazar las alternativas menos plausibles hasta que sólo quede una posibilidad, y dicha posibilidad —por implausible que sea— debe ser la respuesta. Pero priorizar la plausibilidad es algo subjetivo. Para la mayoría de los científicos, la única conclusión posible era modificar la bella teoría de Maxwell. Había que añadir algo parecido a los epiciclos. Estas modificaciones eran complicadas pero, lo que es aún peor, no pudo encontrarse ninguna modificación que funcionara. Todas contradecían la evidencia experimental.

La revolución de Einstein

Albert Einstein, un empleado de la oficina de patentes en Berna, Suiza, tenía otro conjunto de prioridades. Para él era plausible que la relatividad galileana no fuera correcta. Para él era concebible que las coordenadas de posición y tiempo, para la granjera y para el pasajero, estuvieran relacionadas de una forma diferente de la relatividad galileana. Se necesitaba otra relación de coordenadas. Resulta irónico que la nueva relación ya hubiera sido desarrollada por el físico holandés Hendrik Lorentz. Esta relación se denomina ahora transformación de coordenadas de Lorentz, y no transformación de Einstein. Para el caso de la muerte del ratón, el suceso que describimos anteriormente con la transformación de Galileo, la transformación de Lorentz se ilustra en la figura 5.

La diferencia entre los resultados numéricos y los que resultan de la transformación de Galileo (véase la fig. 4) son minúsculos, pero esto se debe a que el panel de control de la transformación está fijado en 3 m/s. Si aumentamos este valor, la diferencia aumenta. Así, si el tren está pasando junto a la granjera a una velocidad extraordinariamente alta, las diferencias pueden ser sustanciales. Hay algo curioso en la dependencia detallada de la transformación de Lorentz respecto a esta fijación de la velocidad. Si aumentamos la velocidad hasta un valor muy próximo a 300 000 km/s, entonces la transformación empieza a hacer predicciones muy exóticas, y de hecho no podemos escoger una velocidad mayor de 300 000 km/s. (En términos matemáticos resulta que esto implicaría tomar la raíz cuadrada de un número negativo). Este límite superior sobre la velocidad relativa que puede intervenir en la transformación de Lorentz es tan característico de la transformación que le damos un símbolo especial. Esta velocidad de 300 000 km/s se denota por c .^[4] (En realidad es 299 792,458 km/s, pero la redondearemos ligeramente).

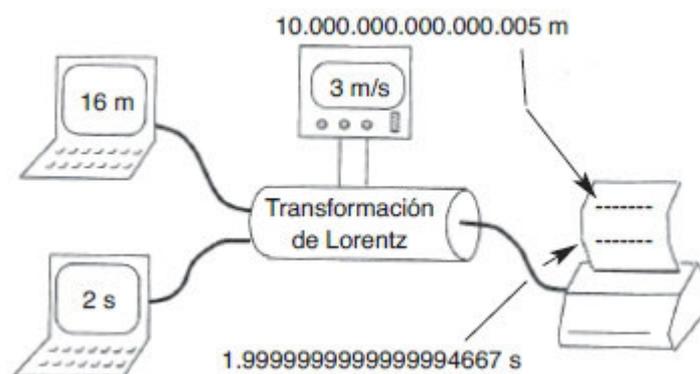


FIGURA 5. La transformación de Lorentz entre sistemas de referencia en movimiento relativo.

Lorentz creía que el «tiempo» y la «distancia» descritos por sus matemáticas no eran el tiempo y la distancia *verdaderos*, sino más bien el tiempo y la distancia que medirían los instrumentos inevitablemente distorsionados por los efectos electromagnéticos. Si la granjera representaba el sistema de reposo absoluto en el universo físico, entonces el pasajero en el tren necesariamente estaría moviéndose, y —según Lorentz— el material de sus instrumentos de medida estaría afectado por los campos electromagnéticos de tal modo que darían lecturas falsas del espacio y el tiempo. Si se utilizaran estas distancias y tiempos falsos en las ecuaciones de Maxwell, las ecuaciones parecerían funcionar. Así, la plataforma se comprimiría de modo que siempre *parecería* que las ecuaciones de Maxwell funcionaban. Cuando ahora echamos la vista atrás es difícil no pensar en «epiciclos», pero deberíamos recordar que la naturaleza errónea de distancia y tiempo parecía muy obvia, y que la botella había estado tapada mucho tiempo.

Einstein sacó el tapón de la botella diciendo al mundo que la transformación de Lorentz no era una descripción de medidas distorsionadas, sino de la distancia y el tiempo reales. No era algo especial de la teoría del electromagnetismo, sino algo básico acerca de la naturaleza del mundo físico. La transformación de Lorentz, con la que Einstein tendría que reemplazar a la relatividad galileana, es un sencillo conjunto de ecuaciones. Las ecuaciones están al nivel de las matemáticas de instituto y no contienen nada más sofisticado que una raíz cuadrada. Por esto es por lo que el pequeño truco de magia de Einstein parece haber tenido un sabor diferente de los avances conceptuales previos. Era —en cierto sentido— condenadamente fácil, carecía de complejidad. Copérnico tuvo que lidiar durante años con observaciones del sistema solar, y Newton tuvo que inventar el cálculo infinitesimal para demostrar la aplicación de sus leyes de movimiento. Einstein sólo tuvo que señalar un conjunto de ecuaciones sencillas y decir al mundo que pensase en ellas de otra forma.

Fue la enormidad del salto conceptual, y no la complejidad de su contexto, la que dio

testimonio del genio de Einstein. Otros saltos hacia adelante habían requerido cambios revolucionarios en la visión del mundo: el Sol, no la Tierra, era el centro del sistema solar. Pero en estos cambios estábamos reemplazando un conocimiento que había sido aprendido. La revolución de Einstein nos exigía que abandonáramos lo que nuestros ojos, cabezas y corazones sabían que era cierto.

Diagramas espaciotemporales

La mezcla de una medida de distancia y una medida de tiempo parece *algo* similar a la forma en que uno de los observadores de la figura 1 mezcla los dos tipos de distancia —«hacia delante» y «hacia la izquierda»— para obtener nuevos valores de delante e izquierda. No hay un significado absoluto de delante e izquierda. Cuando uno gira un poco a su derecha, su nueva dirección de delante se mezcla con su vieja idea de delante y con alguna cantidad negativa de su vieja idea de izquierda. Si gira completamente (es decir, 90 grados) a su derecha, hará un intercambio completo de los dos tipos de distancias. Su nueva izquierda es su viejo delante, y su nuevo delante es el negativo de su vieja izquierda.

En cierto sentido, la relación entre dos sistemas de referencia para los sucesos es similar a rotar un sistema de referencia en el espaciotiempo con respecto al otro. En un nuevo sistema de referencia, el tiempo y la distancia del viejo sistema de referencia se mezclan en los nuevos tiempo y distancia, igual que cuando un observador gira en el puente. *¡La analogía, por supuesto, no puede ser perfecta!* Después de todo, para los observadores del puente delante e izquierda eran en realidad cosas del mismo tipo: ambas eran distancias. Simplemente les dimos por casualidad nombres diferentes asociados a la dirección concreta en la que miran. En el espaciotiempo de la transformación de Lorentz, por el contrario, el tiempo y el espacio no son la misma cosa. De hecho, una de las diferencias es que con la transformación de Lorentz no podemos convertir completamente tiempo en distancia, o viceversa.

Lo que esto significa realmente se ilustra muy bien con un tipo de figura denominada un «diagrama espaciotemporal». Éste es un tipo de mapa de la localización de los sucesos en el espaciotiempo. En este mapa marcamos el valor numérico de las posiciones y tiempos de los sucesos. El eje de «posición», u horizontal, utiliza unidades de kilómetros, ciertamente una unidad razonable para la distancia. Para el eje de «tiempo» (vertical), sin embargo, hacemos algo que añade un poco de complejidad a la explicación, pero resulta ventajoso para la utilidad del diagrama. Denotamos también el tiempo en unidades de kilómetros. Para hacer esto simplemente multiplicamos la coordenada temporal del suceso por $c = 300\,000$ km/s. De este modo, si el tiempo de un suceso es 1 segundo, lo marcamos como si sucediese en un tiempo de 300 000 kilómetros. Decir que un suceso tiene una coordenada temporal de 1 km es lo mismo que decir que su coordenada temporal es $1/300\,000$ de segundo.

Puesto que estamos marcando coordenadas concretas de posición y tiempo, debemos estar utilizando un sistema de referencia concreto. Un diagrama espaciotemporal siempre corresponde a un sistema de referencia concreto; la localización de los sucesos en un sistema de referencia diferente requiere un diagrama espaciotemporal diferente.

Pongamos un ejemplo concreto, no demasiado alejado de nuestra historia de la granjera y el tren. Supongamos que el diagrama de la figura 6 corresponde al sistema de referencia de la granjera. Para hacer las cosas interesantes supondremos que nuestro único tren lento es reemplazado por dos trenes *extraordinariamente* rápidos que van por vías paralelas. Sea B el suceso de sonar el silbato de uno de los trenes, y C el de sonar el silbato del otro. Por una feliz coincidencia, los dos sucesos se dan al mismo tiempo, el tiempo que la granjera llama 3 kilómetros o, lo que es equivalente, $1/100\,000$ de segundo. El suceso A es el suceso en el que los trenes parecen estar en el mismo lugar, el lugar en el que permanece la granjera y que ella llama «0 kilómetros». Un poco de aritmética nos dice que el suceso B ocurrió en un tren que va a una velocidad de 100 000 km/s. Puesto que el otro tren, que había en el suceso C , avanza

un 50 por 100 más en la misma cantidad de tiempo, ese tren marcha a 150 000 km/s. En la figura 6 se ha dibujado una línea recta que conecta los sucesos *A* y *B*. Cada punto de esta línea podría representar un suceso que tiene lugar en el tren más lento. En cierto sentido, es una representación de todos los sucesos de la existencia del tren. Esta historia del tren se denomina su «línea de universo». El tren más rápido tiene otra línea de universo, la línea *AC*, que está más inclinada hacia la horizontal. La mayor inclinación hacia la horizontal significa que «se cubre más espacio en cierta cantidad de tiempo». Ésta es una manera larga de decir «más rápido». ¿Cómo de inclinada puede estar una línea de universo? Supongamos que está inclinada 45 grados. Esto significa que se cubre una distancia de 1 kilómetro por cada kilómetro de tiempo (o $1/300\,000$ de segundo). En otras palabras, está marchando a 300 000 km/s. ¡Está marchando a *c*! De modo que la máxima inclinación que puede tener una línea de universo es 45 grados. Ir más rápido que *c* violaría la ley física, de modo que es físicamente ilegal inclinar más de 45 grados la línea de universo. Ésta es la bella ganancia visual que obtenemos por utilizar «kilómetros de tiempo» en nuestros diagramas espaciotemporales.

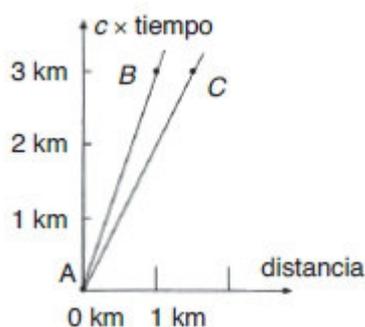


FIGURA 6. Diagrama espaciotemporal para el sistema de referencia de la granjera.

El diagrama espaciotemporal en la figura 6 no es, por supuesto, ninguna especie de verdad absoluta. Es simplemente la historia contada en el sistema de referencia de la granjera. La figura 7 muestra de qué forma se representarían los sucesos en un diagrama espaciotemporal que utilice el sistema de referencia del tren más lento. No es demasiado sorprendente que en dicho sistema de referencia el tren permanezca en el mismo lugar, el lugar llamado «0 kilómetros» en dicho sistema de referencia. Ambos sucesos *A* y *B* ocurren en dicho lugar, pero (por supuesto) en tiempos diferentes. El suceso *B* ocurre en los 2,83 kilómetros de tiempo, o 0,00000943 segundos, después del suceso *A*. Esto es ligeramente menor que el $1/100\,000$ de segundo que separaba los sucesos en el sistema de referencia de la granjera, pero no es nada nuevo que el tiempo entre los sucesos sea diferente en diferentes sistemas de referencia. También se muestran las coordenadas del suceso *C*. Estas coordenadas (como las de *B*) fueron calculadas utilizando la transformación de Lorentz, la «rotación en el espaciotiempo».

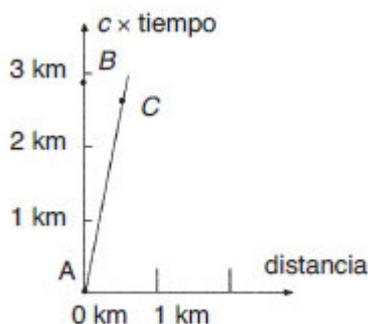


FIGURA 7. Diagrama espaciotemporal para el sistema de referencia del tren más lento.

La clave para entender la mezcla de tiempo y espacio está contenida en la comparación de las figuras 6 y 7. En la figura 7, la línea AB (es decir, desde A hasta B) está en una dirección puramente temporal; no tiene componente espacial. En la figura 6, AB está inclinada; sí tiene una componente espacial. Al pasar a los sistemas de referencia en movimiento relativo podemos inclinar estas direcciones verticales en los diagramas espaciotemporales un poco hacia la izquierda y un poco hacia la derecha, pero sólo un poco. Hay un límite. Si una línea está predominantemente en la dirección temporal (es decir, más vertical que horizontal), nunca podremos encontrar un sistema de referencia en el que la línea esté predominantemente en una dirección espacial (es decir, más horizontal que vertical). Una dirección predominantemente temporal puede estar inclinada, pero no puede transformarse en una dirección predominantemente espacial.

Resulta también que una dirección predominantemente espacial nunca puede convertirse en una dirección predominantemente temporal. En la figura 6 vemos la dirección desde el suceso B al suceso C . Puesto que estos dos sucesos se dan al mismo tiempo (en el sistema de referencia de la granjera), la dirección de B a C es una dirección puramente espacial. Es horizontal. En la figura 7 la línea entre los sucesos B y C ya no es horizontal. Ahora hay una diferencia temporal entre los sucesos, pero la línea es aún más horizontal que vertical. Si una dirección en un diagrama espaciotemporal es predominantemente espacial, entonces es predominantemente espacial en todos los diagramas espaciotemporales.

La manera sencilla de visualizar estas cosas es recordar que las líneas a 45 grados en los diagramas espaciotemporales son barreras absolutas para la rotación del espacio y el tiempo.

Máquinas del tiempo

Todos nosotros viajamos en el tiempo. Sin ningún esfuerzo, y probablemente sin ninguna elección, nos movemos hacia el futuro. La frase «viaje en el tiempo», sin embargo, está asociada con la idea de desviarse del camino trazado y marchar hacia atrás en el tiempo. Explotando el vocabulario que acabamos de desarrollar, podemos describir esto de una forma más sutil. Supongamos que uno está presente en cierto suceso E . ¿Puede volver a la misma posición en el espacio en un instante ligeramente anterior? Esta posibilidad suena fantástica, por supuesto. Uno podría volverse atrás y callarse la boca antes de hacer este comentario estúpido. Uno podría dejar de invertir en esa compañía de alta tecnología que tan prometedora parecía hace un año. Aquí no vamos a entretenernos en las cuestiones de consistencia lógica que plantean tales fantasías; éstas serán el tema central del ensayo de Igor Novikov. Aquí nuestra preocupación será más restringida; sentar sólo las ideas básicas junto con el vocabulario. Lo que se describe aquí en la Introducción es sólo un mecanismo para el viaje en el tiempo: probablemente el mecanismo más simple, o al menos el más simple de describir. Novikov describirá un mecanismo relacionado, aunque diferente, que utiliza un campo gravitatorio intenso. Stephen Hawking todavía mencionará otro mecanismo que involucra cuerdas cósmicas.

Una característica subyacente a todos los mecanismos puede identificarse de entrada. Si uno pudiera volver a la posición de E en un tiempo algunos instantes antes del suceso E , entonces tras algunos instantes de espera uno estaría de nuevo en E . Habría visitado dos veces el mismo suceso. Sería como si usted empezara en el mismo punto en el ecuador y se dirigiera hacia el este sólo para volver a su punto de partida; su camino se cerraría. Viajar en el tiempo desde el suceso E a de nuevo E sería un camino similar en el espaciotiempo, y los físicos espaciotemporales le llaman «camino o curva cerrada de género tiempo». ¿Por qué «de género tiempo»? Porque cuando uno se mueve a lo largo de dicho camino, siempre se está moviendo hacia adelante en el tiempo. Su reloj está mostrando siempre números crecientes si es digital y las manecillas se están moviendo en la dirección dextrógira si es analógico. El pequeño número de núcleos radiactivos que hay en su cuerpo se está desintegrando; los fragmentos radiactivos

no se están acumulando en una antidesintegración. Su corazón está bombeando en su forma habitual, no «hacia atrás en el tiempo» y con la sangre fluyendo en la dirección equivocada. ¡Ay! uno está envejeciendo, no rejuveneciendo. Y es su yo más viejo quien regresa (si ésta es la palabra correcta) al suceso E en el espaciotiempo.

¿Cuánto se tarda en recorrer una curva cerrada de género tiempo? La idea subyacente a un mecanismo básico está contenida en la figura 6. Por simplicidad, dicho diagrama se repite aquí (como figura 8) pero sólo con los sucesos B y C . Los sucesos B y C están en el mismo instante (en el sistema de referencia de la granjera que construyó este diagrama espaciotemporal), pero el suceso C está H kilómetro más hacia la derecha que el suceso B . Supongamos ahora, sólo supongamos, que hay un túnel secreto, un atajo en el espacio para ir desde la posición del suceso B a la del suceso C . Supongamos además que en la vía, en la señal de 1 kilómetro (la localización del suceso B), hay lo que parece un pozo. Y supongamos que cuando uno se mete en dicho pozo, se encuentra saliendo instantáneamente en la señal de 1,5 kilómetros a lo largo de la vía (la localización del suceso C).

Podemos hacernos una idea de lo que significa tal atajo. Probablemente es más fácil entender este atajo que la geometría del espaciotiempo que pronto encontraremos. Aquí al menos estamos trabajando sólo con un atajo en el espacio, no en el espaciotiempo. Más o menos, *podemos* representar el espacio.

Consideremos una hoja plana de papel. Nos gustaría que fuera de extensión infinita, pero sólo podemos imaginar e ilustrar una parte finita de ella. Sobre la hoja de papel, mostrada a la izquierda en la figura 9, se han marcado dos puntos en negro, B y C . La distancia (es decir, la distancia más corta) entre estos dos puntos es, digamos, 1 m. Pero supongamos que el papel se dobla como se muestra a la derecha, y que hay un túnel minúsculo, una especie de puente o agujero de gusano, desde el punto B al C . Aparte de la posibilidad de añadir este agujero de gusano, nada importante cambia en el papel cuando lo doblamos. En particular, todas las distancias medidas a lo largo del papel (por ejemplo, la longitud de cualquier trazo de lápiz que hayamos dibujado) sigue siendo la misma cuando se dobla el papel, de modo que la geometría del papel no cambia. Pero el agujero de gusano nos proporciona un atajo de B a C , y podemos hacer este atajo de agujero de gusano tan corto como queramos. Éste es el tipo de agujero de gusano que queremos entre las señales de 1 kilómetro y 1,5 kilómetros en la vía del tren. El modelo del papel doblado no es perfecto, por supuesto. Es una superficie bidimensional, y nosotros estamos interesados en un agujero de gusano entre dos puntos en el mundo espacial tridimensional de la granjera y la vía. (Sólo utilizamos una única dimensión espacial en nuestros diagramas espaciotemporales, pero el agujero de gusano entre los dos puntos de la vía tendrá que existir en tres dimensiones).

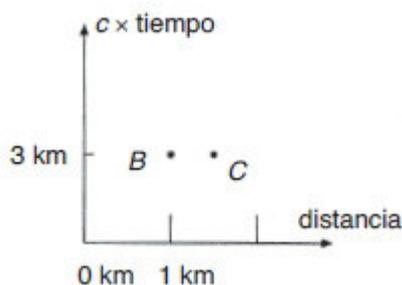


FIGURA 8. Dos sucesos que ocurren al mismo tiempo en un sistema de referencia.

Hasta hace poco tiempo los científicos del espaciotiempo no pensaban mucho en agujeros de gusano que conectasen lugares en el espacio. A mediados de la década de 1980, Kip Thorne llegó a interesarse en la forma en que podrían utilizarse agujeros de gusano espaciales para construir máquinas del tiempo, y pronto se vio a muchos físicos del espaciotiempo agitando los

brazos y discutiendo sobre las bocas de los agujeros de gusano. Una explicación de cómo empezó todo esto, a partir de una historia de ciencia-ficción de Carl Sagan, puede encontrarse en el capítulo 14 del libro de divulgación de Kip *Black Holes and Time Warps*.

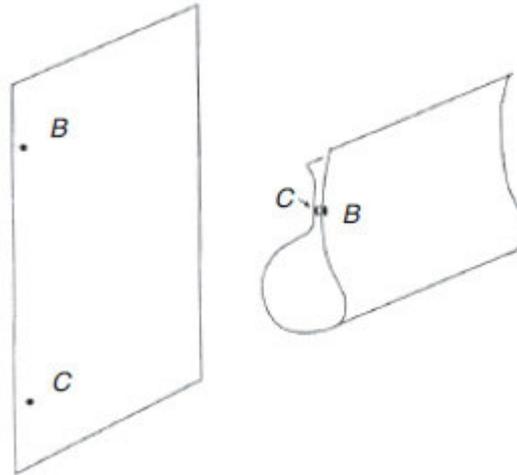


FIGURA 9. Un agujero de gusano que ataja entre dos puntos en una geometría plana.

Pero ¿cómo llevan estos agujeros de gusano espaciales al viaje en el tiempo (o —para utilizar un término más serio— a curvas cerradas de género tiempo)? Para verlo, supongamos que algún explorador espaciotemporal presencia el suceso *B* y, viajando rápidamente a través del agujero de gusano espacial entre *B* y *C*, se encuentra en el suceso *C*. Resulta que en el suceso *C* está pasando un tren que viaja a 100 000 km/s. Es interesante ver qué aspecto tienen los sucesos *B* y *C* en el sistema de referencia de dicho tren. Ya hemos dibujado dicho diagrama espaciotemporal, como la figura 7. La parte relevante de dicha figura se repite en la figura 10. Hasta ahora nuestro explorador espaciotemporal ha viajado de *B* a *C*. Ahora debemos pasar a suponer que el tren es suficientemente largo y que *también* lleva un agujero de gusano espacial. Tenemos una suerte increíble: resulta que un extremo (o «boca») de dicho agujero de gusano del tren está precisamente en la señal de 1,5 kilómetros cuando el explorador surge del agujero de gusano de la vía (suceso *C*). Sin pérdida de tiempo, se agarra al tren y salta a la boca del agujero de gusano del tren que está precisamente frente a él; todo esto es actividad en el suceso *C*. Y una suerte todavía más increíble: resulta que la otra boca está en la marca de 0 kilómetros en el tren. El explorador emerge de dicha boca, habiendo pasado un tiempo despreciable yendo desde una boca del agujero de gusano muy corto a la otra. En la figura 10 se indica el suceso de su emergencia de dicha boca como suceso *D*. Nótese que los sucesos *C* y *D* están en la misma posición vertical en la figura 10. Ésta es la materialización gráfica del hecho de que pasa un tiempo despreciable entre la entrada y la salida del agujero de gusano del tren, de modo que la entrada y la salida son esencialmente simultáneas (*en el sistema de referencia del tren*), y la figura 10 es, después de todo, una muestra de los sucesos en dicho sistema de referencia.

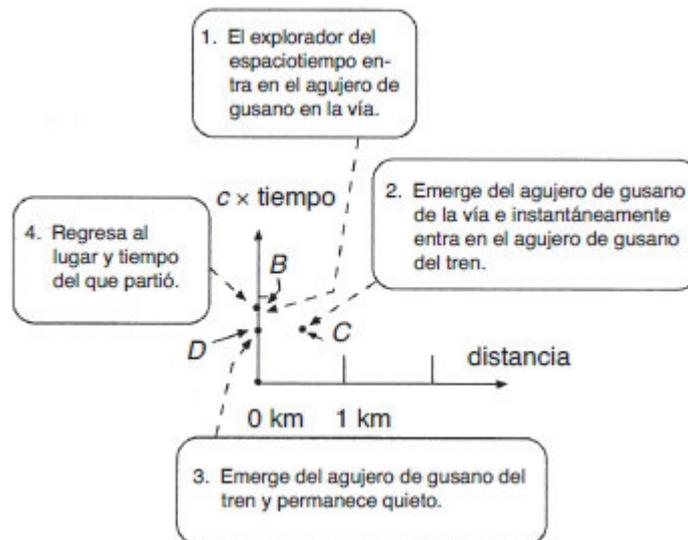


FIGURA 10. El espaciotiempo para el sistema de referencia del tren en movimiento.

Él ha recorrido ahora el camino $B \rightarrow C \rightarrow D$. Aproximadamente en este instante, como uno podría imaginar, su cabeza está dando vueltas, de modo que planta firmemente sus talones y se queda quieto en el tren. Permanece en la misma posición en el sistema de referencia del tren, pero no en el mismo instante. Al no moverse en el espacio, se «mueve» en la figura 10 desde el suceso D al suceso B . Ha completado una curva cerrada de género tiempo y ha vuelto a B , el lugar y el tiempo en el que empezó.

Todo lo que se necesita para esta «vuelta en el espaciotiempo» son dos cosas: primero, es necesario rotar un poco las direcciones en el espaciotiempo. Ésta es una consecuencia inmediata de la transformación de Lorentz y pocos físicos la cuestionan. En segundo lugar, se necesitan agujeros de gusano espaciales, y éstos han sido cuestionados por muchos físicos. La pregunta no ha sido respondida aún, pero parece que las leyes de la física no permiten agujeros de gusano espaciales, y con más generalidad no permiten máquinas del tiempo. En el ensayo de Stephen Hawking se describe cómo los efectos mecanocuánticos destruirían (probablemente) cualquier agujero de gusano en ciernes.

¿Por qué tiene una geometría el espaciotiempo?

Aunque hay claras diferencias de detalle entre diagramas espaciotemporales, mapas de sucesos y mapas de puntos en un plano bidimensional, existen algunas similitudes fascinantes. Las dos preguntas aquí son: (1) ¿son realmente el mismo tipo de objeto?, y (2) ¿qué significa «mismo tipo de objeto»?

Las matemáticas de la rotación —las ecuaciones de la transformación rotacional— son una expresión del hecho de que existe una *geometría* para dicho plano. Existe una estricta relación entre distancias que es inviolable, y cualquier forma de describir distancias debe ser compatible con dicha realidad subyacente. Las matemáticas rotacionales son simplemente la punta inevitable del iceberg. La geometría es el iceberg, la vasta y sólida realidad.

¿Qué pasa con la transformación de Lorentz? ¿Hay también un iceberg debajo de esta punta? ¿Es la transformación de Lorentz tan sólo una descripción de una relación que está garantizada por una geometría de sucesos subyacente? No hay respuesta a esto, puesto que no hay un significado inequívoco para la realidad de las matemáticas subyacentes. Supongamos que se nos dieran las matemáticas de la rotación y se nos dijera que describen exactamente la relación entre medidas hechas por diferentes sistemas de referencia (los observadores en el puente). Un metafísico podría afirmar, poniendo una cara muy seria, que la existencia de la geometría es simplemente una construcción mental para ayudarnos a recordar las matemáticas rotacionales. No es necesario considerar que la geometría es real.

La mayoría de los físicos se muestran poco pacientes ante tales argumentos. En el caso de la geometría del plano, parece un juego absurdo «fingir» que la geometría no es real. Pero la defensa real de la geometría no es exactamente de la variedad «yo sé lo que veo». Se trata más bien de que la idea de que haya una geometría es tremendamente útil. No sólo nos ayuda en efecto a recordar las matemáticas de la rotación, sino que también nos ayuda a manipular las matemáticas y descubrir nuevas relaciones. Aunque la geometría no sea real, resulta tan útil que su propia utilidad la hace real.

Cuando Einstein propuso por primera vez que la transformación de Lorentz describe la relación entre coordenadas de sucesos en diferentes sistemas de referencia, no se refería a cualquier geometría. En su artículo inicial de 1905 en donde exponía la relatividad, Einstein presentaba la transformación de Lorentz como la única realidad. Fue Hermann Minkowski quien señaló a Einstein que estas transformaciones podrían verse como expresiones de una geometría subyacente, algo que acabaríamos llamando la «geometría de Minkowski del espaciotiempo de los sucesos». La geometría de Minkowski estaba basada en el modo de asignar un nuevo tipo de distancia a sucesos separados, una distancia que combinaba tiempo y espacio. En diferentes sistemas de referencia habrá discrepancias sobre el tiempo que separa los sucesos y sobre la distancia espacial entre ellos, pero habrá acuerdo sobre la distancia de Minkowski.

Al principio, la geometría de Minkowski parecía una construcción interesante, pero esta construcción se hizo rápidamente tan útil que se desvaneció la idea de que era «sólo una construcción». Hoy la relatividad einsteiniana es universalmente considerada como una descripción de un espaciotiempo de sucesos con la geometría espaciotemporal de Minkowski, y la transformación de Lorentz es una especie de rotación en dicha geometría espaciotemporal.

¿Por qué es «curva» la geometría del espaciotiempo?

Una razón por la que la introducción por parte de Minkowski de la idea de geometría espaciotemporal resultaba tan importante es que permitió a Einstein utilizar la idea de geometría espaciotemporal curva para describir la gravedad. La propia frase «espaciotiempo curvo» tiene una imaginería tan mística que demasiado a menudo se rechaza como incomprensible. Al menos en un sentido, sin embargo, el argumento de que la gravedad curva el espaciotiempo no sólo es comprensible, sino que es obligado. Lo que *sí* hay que abandonar es cualquier esperanza de visualizar el espaciotiempo curvo con la misma claridad con que se visualizan superficies espaciales bidimensionales curvas. No hay que pensar que los teóricos del espaciotiempo constituyen una casta sacerdotal de personas que pueden realmente *representarse* un espaciotiempo tetradimensional curvo. No podemos hacerlo. (Espero no estar aquí hablando sólo en mi nombre). ¡Después de todo, es *espaciotiempo*! Y es tetradimensional. Dibujaremos diagramas, pero éstos serán sugerentes, a menudo metafóricos y a veces potencialmente equívocos. Nuestra incapacidad para representar el espaciotiempo curvo nos reduce, pero no anula, nuestra capacidad para entenderlo. Aún tenemos matemáticas, y aún tenemos palabras.

Las ideas empiezan con la consideración de líneas de universo, las líneas que muestran los sucesos de un objeto a medida que se mueve hacia adelante en el tiempo. Las líneas de universo en las figuras 6 y 7 son las líneas de universo de trenes en dos sistemas de referencia diferentes. Estas líneas de universo tienen una inclinación constante (el ángulo a que se desvían de la vertical). Esto significa que la cantidad de distancia que cambian por cantidad de tiempo es siempre la misma: son líneas de universo de velocidad constante. Los objetos no irán a velocidad constante si hay fuerzas actuando sobre ellos. Supongamos que en la región del espaciotiempo ilustrada en la figura 11 hay cierta influencia eléctrica intensa. Por claridad, digamos que está causada por una gran cantidad de carga eléctrica positiva en algún lugar a la derecha de la figura.

Un objeto eléctricamente cargado en la región de la figura 11 se aceleraría (es decir, cambiaría

su velocidad) debido a la influencia eléctrica. Este cambio en velocidad, esta aceleración, se manifiesta en el diagrama espaciotemporal como la inclinación variable de una línea de universo. Puesto que la línea de universo 1 en la figura es recta, debe contar la historia de un objeto no cargado y, por consiguiente, no acelerado. (Además de ser recta, la línea de universo es vertical, lo que significa que el objeto no sólo no está acelerado, sino que también permanece en una misma posición en este sistema de referencia). La forma de la línea de universo 2 nos dice que la partícula que representa debe estar cargada positivamente, puesto que se está acelerando y alejando de la carga positiva (oculta en alguna parte a la derecha) que crea la influencia eléctrica. Análogamente, la línea de universo 3 debe ilustrar los sucesos de una partícula cargada negativamente. Si miramos más de cerca podemos ver que la línea de universo 3 está curvada más espectacularmente que la línea de universo 2; su partícula está experimentando una aceleración mayor. Las líneas de universo 2 y 3 podrían representar un protón y un electrón. Tienen cargas de igual magnitud y signo opuesto, y la masa mucho más pequeña del electrón daría cuenta de la curvatura más espectacular de la línea de universo 3.

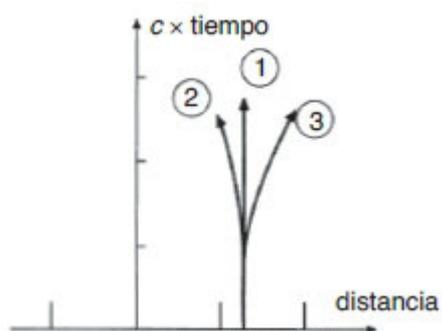


FIGURA 11. Líneas de universo de una partícula en una región del espaciotiempo con influencia eléctrica.

Un punto crucial ilustrado por la figura 11 es que cada línea de universo nos dice algo sobre las propiedades físicas de la partícula que representa. Comparemos esto ahora con líneas de universo que representan influencia gravitatoria. Supongamos que la región del espaciotiempo en la figura 12 está sometida a una influencia gravitatoria debida a una gran cantidad de masa en alguna parte a la derecha de la figura. Las líneas de universo 1, 2 y 3 representan una bola de bolos, un tejido y un «absqual», respectivamente. Una bola de bolos y un tejido, en ausencia de resistencia del aire, sufren exactamente la misma aceleración bajo influencia gravitatoria; caen a la misma velocidad. Aquí uso «absqual» para significar «absolutamente cualquier objeto». Cualquiera que sea, caerá a la misma velocidad que la bola o el tejido.

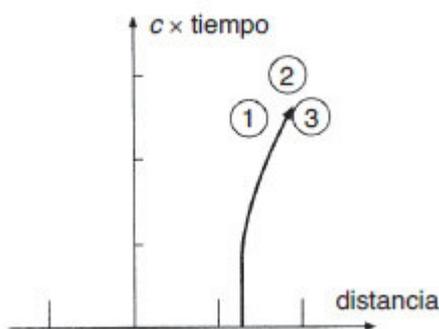


FIGURA 12. Líneas de universo de una partícula en una región del espaciotiempo con influencia gravitatoria.

El punto importante de la figura 12 es que las líneas de universo curvadas nos dicen todo sobre la influencia de la gravedad en esta región del espaciotiempo, y la misma línea de universo describe la influencia de la gravedad para cualquier objeto. El punto de vista muy razonable de Einstein era que la forma de la línea de universo por sí misma —y no cierta «fuerza»— debería

ser la descripción adecuada de la gravedad. En la imagen de Einstein, los objetos que experimentan sólo influencia gravitatoria se mueven sólo en líneas de universo especiales. Los detalles de dichas líneas de universo contienen los detalles de la influencia gravitatoria.

¿Cuáles son estas líneas especiales en el espaciotiempo? En una región del espaciotiempo libre de gravedad —en el espaciotiempo de Minkowski— los objetos que no sufren ninguna otra influencia se mueven siempre en una dirección fija a velocidad constante. Sus líneas de universo son rectas. De modo que sólo conocemos un ejemplo de líneas especiales, y éste nos da una clave de cómo conjeturar lo que queremos en general. Resulta que las líneas rectas no existen en cualquier geometría. Si tratamos de construir curvas con todas las propiedades de líneas rectas, normalmente fracasaremos. Consideremos el ejemplo habitual (y un buen ejemplo): la superficie de una Tierra perfectamente esférica. ¿Podemos dibujar dos líneas tales que la distancia de separación se mantiene constante tal como sucede con las líneas paralelas? Si encontramos que es posible dibujar una línea recta en cualquier dirección a través de un punto, decimos que estamos trabajando en un espacio (o espaciotiempo) «plano». Cualquier otro, por definición, es curvo.

En un espacio o espaciotiempo curvo, existe una generalización sencilla del concepto de una línea recta: es simplemente la curva más recta posible que puede dibujarse. Semejante curva tiene el sofisticado nombre de «geodésica». Cuando consideramos una porción muy pequeña de una geometría curva, parece casi plana. Si se dibuja una geodésica a través de dicha pequeña porción, la geodésica será casi recta.

Para que la gravedad tenga sus propiedades familiares, las líneas de universo de los objetos influidos por la gravedad no pueden ser verdaderas líneas rectas. Consideremos un ejemplo sencillo: dos satélites en órbita alrededor de la Tierra se cruzan, y unas pocas órbitas después se cruzan de nuevo. Esto significa que las líneas de universo de los satélites se tocan (o casi se tocan) en dos lugares. Las líneas rectas no pueden hacer esto. La conclusión es inevitable: si hay que exhibir efectos gravitatorios, entonces el espaciotiempo debe ser curvo.

Aunque las matemáticas de las curvas especiales, las geodésicas, no son triviales, tampoco son terriblemente difíciles. Una vez que se especifica una geometría —es decir, una vez que se da una fórmula que dice las distancias que separan puntos en un espacio o un espaciotiempo— es relativamente fácil encontrar las geodésicas. En muchos cursos (normalmente de licenciatura) sobre la teoría de Einstein, las matemáticas de las curvas especiales se estudian al principio. Lo que llega mucho más tarde es la parte difícil de la teoría: la forma en que el contenido del espaciotiempo (las estrellas, los planetas y demás) determina la geometría espaciotemporal. Con mucha fortuna podemos pasar por alto esta parte sin perder demasiado del sentido de la teoría. Sólo tenemos que notar que hay una receta matemática para determinar la geometría del espaciotiempo.

Ondas gravitatorias

Aunque no sabemos la forma detallada en que la materia curva la geometría espaciotemporal, sabemos algunas características que debe tener la conexión materia-curvatura. Una distribución de materia variable debe producir una curvatura variable. La figura 13 es una ilustración sugerente de las líneas de universo de un par de estrellas binarias, dos estrellas masivas en órbita cerrada una alrededor de la otra. Nótese que a medida que avanza el tiempo (es decir, a medida que seguimos las líneas de universo hacia arriba en el diagrama), las posiciones de las estrellas cambian durante su movimiento orbital mutuo, y por ello la «fuente» de gravitación es variable. Esto significa que habrá variaciones en la geometría espaciotemporal cerca del par binario. Supongamos que una nave espacial científica, la ficticia *Curvature Explorer*, resulta estar en el mismo rincón de la galaxia que el par binario y, por lo tanto, está en la región de curvatura espaciotemporal variable. ¿Qué *significa* esto? ¿Qué señal tendrán los «curvonautas» de la nave espacial de estas variaciones?

La primera respuesta que viene a la mente es errónea. Los curvonautas no sentirán que la nave espacial se agita de un lado a otro a medida que sigue su camino a través de las rodadas del espaciotiempo curvo. La razón por la que no lo hacen reside en la pregunta «¿agitarse de un lado a otro con respecto a qué?» ¿Respecto a qué sistema de referencia «fijo» estaría oscilando el movimiento de la nave espacial? Si la nave espacial no tiene activados sus chorros de corrección, y si no está siendo bombardeada por micrometeoritos, entonces la única influencia sobre ella es la gravedad. Está marchando a lo largo de la línea más recta posible (una geodésica). En cierto sentido está simplemente recorriendo el espaciotiempo de la misma forma que un globo surca el aire. Los pasajeros del globo pueden ver que se están moviendo respecto al suelo, pero para los curvonautas no hay nada parecido al suelo fijo, sino sólo el espaciotiempo curvo.

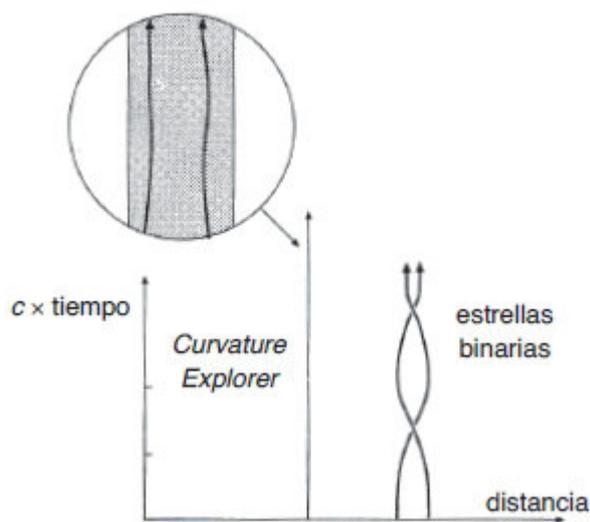


FIGURA 13. Ondas gravitatorias procedentes de estrellas binarias.

La razón de que los curvonautas no puedan percibir la oscilación de la nave espacial sugiere lo que ellos *pueden* ver. Pueden percibir el movimiento de algo sólo con respecto a alguna otra cosa. Centremos su atención con mucho cuidado en dos pequeños objetos dentro (o fuera) de la nave espacial. Con gran cuidado hagamos que los curvonautas protejan los objetos frente a cualquier influencia excepto la omnipresente e ineliminable influencia de la gravedad. Entonces los curvonautas serán capaces, en principio, de detectar una oscilación de la distancia entre los objetos. Lo que ellos están observando es el equivalente espaciotemporal de las oscilaciones en la distancia entre dos líneas lo más rectas posibles dibujadas en una superficie rizada.

En los detalles de la teoría hay muchas similitudes entre los efectos debidos a las estrellas binarias y los efectos debidos a cargas eléctricas oscilantes. Las cargas crean influencias eléctrica y magnética variables que tienen ciertas propiedades «ondulatorias». En particular, la intensidad de las ondas electromagnéticas causadas por la oscilación disminuye de una forma muy concreta y simple con el aumento de la distancia a las cargas oscilantes. Cuando uno se aleja a una distancia doble de las cargas, la influencia oscilante que mide es la mitad de intensa. Una segunda propiedad importante es que las influencias oscilantes se propagan a la velocidad c . Las oscilaciones espaciotemporales debidas a las estrellas binarias, o a cualquier fuente de gravedad variable, también tienen estas dos propiedades, y se denominan ondas gravitatorias.

Horizontes y agujeros negros

En un momento vamos a considerar campos gravitatorios muy intensos y regiones del espaciotiempo muy fuertemente curvadas, pero las cosas serán más claras si empezamos sin gravedad y con un espaciotiempo de Minkowski. La figura 14 es un diagrama espaciotemporal para el espaciotiempo minkowskiano, dibujado con el convenio habitual de modo que una línea

de universo inclinada a 45 grados estaría moviéndose a la velocidad c . Las diversas líneas de universo mostradas no pretenden representar objetos que se mueven sólo bajo la influencia gravitatoria. Puesto que las curvas especiales del espaciotiempo minkowskiano son rectas, las líneas de universo en la figura deben representar objetos sobre los que actúan fuerzas no-gravitatorias. Podríamos suponer, por ejemplo, que las fuerzas no-gravitatorias que hacen que las líneas de universo se curven son los empujes de motores de cohetes, y que las líneas de universo son las de los cohetes.

La figura 14 contiene otra característica interesante: una línea de trazos inclinada a 45 grados. Podemos considerar que esta línea representa una pared que es infinita en las direcciones y y z (no mostrada en la figura) y se está moviendo a velocidad c en la dirección x . Lo interesante de la línea de trazos es que las líneas de universo sólo pueden cruzarla de derecha a izquierda, nunca de izquierda a derecha. Esto puede verse en el hecho de que las líneas de universo nunca pueden desviarse más de 45 grados de la vertical. Igualmente bien podemos entender esto como algo necesario porque la «pared» representada por la línea de trazos se está moviendo de izquierda a derecha a la velocidad c . Para cruzar la pared de izquierda a derecha un objeto tendría que estar moviéndose más rápido que c . De modo que la línea de trazos es una barrera de una dirección que divide el espaciotiempo en dos regiones. Cualquier objeto en el lado izquierdo de la línea de trazos no puede pasar nunca al lado derecho.

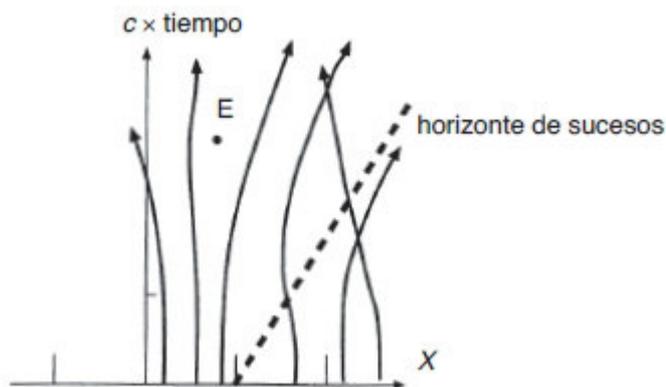


FIGURA 14. Un horizonte de sucesos simple en el espaciotiempo de Minkowski.

Hay una propiedad aún más extraña de la línea de trazos: algo que esté a la derecha de ella nunca puede tener ningún conocimiento de ningún suceso a la izquierda. Consideremos el suceso E en el lado izquierdo. La línea de universo de cualquier señal enviada desde el suceso E , ya sea por carta postal o por una señal luminosa, nunca puede cruzar la línea de trazos para ser recibida por algún observador a la derecha. Por esta razón, la línea de trazos se denomina un horizonte de sucesos. De la misma forma que los marineros nunca pueden ver barcos más allá del horizonte, los observadores que están a la derecha del horizonte no pueden «ver» (obtener información de) sucesos a la izquierda.

Un horizonte de sucesos con forma algo diferente se muestra en la figura 15. Los círculos de trazos representan las posiciones que ocupa en tres diferentes instantes una superficie esférica que incrementa su radio en 300 000 kilómetros cada segundo. Por consiguiente, la superficie esférica se está expandiendo a velocidad c . Evidentemente, cualquier objeto dentro de la esfera en expansión no puede cruzar la esfera; evidentemente, los observadores fuera de la esfera en expansión no pueden recibir información sobre sucesos que ocurren dentro de la esfera. La esfera en expansión divide así al espaciotiempo en dos regiones, igual que lo hace la línea de trazos en la figura 14.

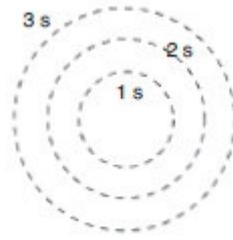


FIGURA 15. Un horizonte esférico en expansión en el espaciotiempo de Minkowski.

Hemos visto dos ejemplos de horizontes de sucesos, pero eran construcciones matemáticas y no nos mostraban nada sobre la gravedad. Ahora consideramos un campo gravitatorio esféricamente simétrico y muy intenso en el que la gravedad atrae hacia un punto central con la misma intensidad en todas las direcciones y es invariable en el tiempo. El espaciotiempo correspondiente se denomina «espaciotiempo de Schwarzschild» en la teoría de Einstein.^[5] La figura 16 muestra un nuevo tipo de diagrama espaciotemporal. Aquí, como es habitual, el eje vertical indica el tiempo, pero ahora el eje horizontal se refiere al radio.

Hay una gran diferencia entre este diagrama espaciotemporal y el habitual. Este diagrama ilustra una región espaciotemporal con campos gravitatorios intensos, de modo que representa un espaciotiempo que está curvado. En esta región no tenemos el significado claro de tiempo y distancia que teníamos en el espacio de Minkowski. Éste es un concepto difícil pero importante. El símbolo « $c \times$ tiempo» es una coordenada conveniente para marcar sucesos espaciotemporales, pero no es el tiempo que marca un reloj.^[6] Análogamente, «radio» no es una medida de distancia, sino una coordenada conveniente. Vale la pena mencionar por qué es conveniente: da el área correcta con la fórmula habitual para el área de una superficie. Eso significa que una superficie esférica en (icoordenada!) r tiene el área $4\pi r^2$, la relación habitual que se supone que hemos aprendido en el instituto. Esta fórmula no es un enunciado trivial puesto que el espaciotiempo es curvo. La misma coincidencia simple no se aplica a la distancia radial; la coordenada radial r que da el área correcta *no* mide correctamente longitudes radiales.

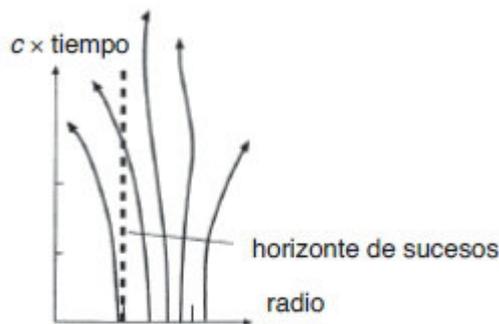


FIGURA 16. Un horizonte de sucesos de Schwarzschild.

La figura 16 está representando entonces una región espaciotemporal en coordenadas convenientes. Hemos perdido la característica de los diagramas espaciotemporales anteriores de que las líneas inclinadas a 45 grados representan movimiento a velocidad c . Las líneas de universo en esta figura son líneas de universo de cohetes; muestran trayectorias espaciotemporales de objetos que no se limitan a sentir sólo influencia gravitatoria. Hay una tendencia general a que las líneas de universo se curven hacia la izquierda (un radio menor), debido a la atracción de la gravedad hacia el centro. Hay líneas de universo que muestran alguna curvatura hacia la derecha; éstas representan objetos cuyos motores ejercen una fuerza sobre el objeto mayor que la que ejerce la gravedad. Todo esto es esperado. Lo que no es esperado es la línea vertical a trazos. Es un horizonte de sucesos. Ninguna línea de universo

puede cruzar de izquierda a derecha. Ningún suceso a la izquierda puede transmitir información a ningún receptor a la derecha. La línea de trazos representa una superficie esférica que tiene las mismas propiedades de horizonte que la superficie esférica en expansión de la figura 15, excepto que ahora la superficie esférica no se está expandiendo. Está, después de todo, en un valor invariable de la coordenada radial, de modo que tiene un área invariable. ¿Qué otra cosa podría significar «no se está expandiendo»?

La región dentro del horizonte, una región que no puede ser «vista» por ningún observador que esté fuera del horizonte, se denomina, con obvia justificación, un agujero negro. Este agujero negro esférico, en concreto, se denomina un «agujero negro de Schwarzschild» y su frontera es un «horizonte de sucesos de Schwarzschild». Es la solución matemáticamente más sencilla de la teoría de Einstein que tiene propiedades de agujero negro. Otra solución de agujero negro relativamente simple es el «agujero negro de Kerr». Éste tiene un eje de rotación y un sentido de rotación que un agujero negro de Schwarzschild esférico no tiene. Para un agujero negro de Kerr, como para un agujero negro de Schwarzschild, el área del horizonte de sucesos es invariable. Los agujeros negros no tienen por qué ser invariables en el tiempo. Los horizontes de sucesos que los definen pueden cambiar de forma y pueden crecer. Pero debe haber un límite al crecimiento. Si el horizonte pudiera crecer de modo que finalmente no hubiera «exterior», como en el caso de la figura 15, entonces el interior no sería un agujero negro. Un agujero negro necesita tener un exterior para siempre, un exterior que nunca puede saber lo que hay dentro de él.

Bon voyage

Ustedes están a punto de zarpar hacia interesantes mares de ideas, y ahora están preparados —aunque con equipaje ligero— para dicho viaje. Esta introducción ha sido una sucinta guía del viajero para lo que va a venir; les ha dado un esbozo de mapa de los nuevos dominios, junto con un diccionario con el vocabulario básico de quienes trabajan en dichos dominios. Como cualquier guía breve, no es en ella donde hay que encontrar la emoción. Para eso, ustedes tienen que hacer el viaje por las páginas que siguen.

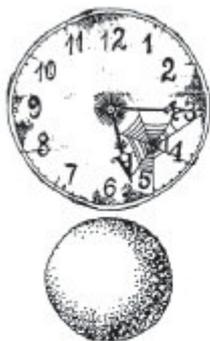
1

¿Podemos cambiar el pado?

IGORNOVIKOV

En este ensayo exploraré varios aspectos de las máquinas del tiempo, pese al hecho de que el ensayo de Stephen Hawking en este mismo volumen explica que las máquinas del tiempo son, con toda probabilidad, físicamente imposibles. Hay dos razones para que ignore la predicción de Hawking. En primer lugar, en 1895, otro físico sobresaliente, lord Kelvin, entonces presidente de la Royal Society, afirmó que «las máquinas voladoras más-pesadas-que-el-aire son imposibles». Lord Kelvin basaba su afirmación en el mejor conocimiento que había de la física en ese momento. Sin embargo, tal como sabemos, los hermanos Wright realizaron su primer vuelo en 1903, sólo unos pocos años más tarde. De modo análogo, nuestro conocimiento actual acerca de las máquinas del tiempo puede ser incompleto. La segunda razón es una que Kip Thorne ha señalado muchas veces: incluso si las leyes de la física prohíben las máquinas del tiempo, el esfuerzo por entenderlas puede enseñarnos mucho y ayudarnos a afinar nuestra comprensión de la causalidad.^[7]

Supongamos, entonces, que las máquinas del tiempo son posibles en teoría y exploremos las consecuencias. En primer lugar, las máquinas del tiempo pueden ser peligrosas. De hecho, si alguien pudiera viajar desde nuestro tiempo al pasado, entonces esa persona probablemente podría cambiar el pasado. Si lo hiciera, cambiaría toda la historia posterior. Por ejemplo, una persona que viajara hacia atrás en el tiempo hasta el comienzo del universo podría cambiar las condiciones físicas en esa era y, como resultado, cambiar toda la historia del universo. La explosión de una bomba de hidrógeno no es nada en comparación con tal posibilidad.



Estrella de neutrones



¿Es posible realmente utilizar una máquina del tiempo para cambiar el pasado? Podemos imaginar el tiempo como un río que fluye desde el pasado hacia el futuro, sin cambiar nunca de dirección, y llevando todos los sucesos en su flujo. Durante muchos años la gente creyó que el tiempo no podía ser frenado o acelerado. Sin embargo, a comienzos del siglo xx Albert Einstein descubrió que el tiempo no es inmutable. Los campos gravitatorios intensos —por ejemplo, el campo gravitatorio intenso de una estrella de neutrones— frenan el ritmo de paso del tiempo. Los relojes en el campo gravitatorio intenso próximo a la superficie de una estrella de neutrones marchan más lentamente que los relojes que están lejos. Los observadores a cierta distancia de una estrella de neutrones pueden en teoría ver la ralentización de los relojes.

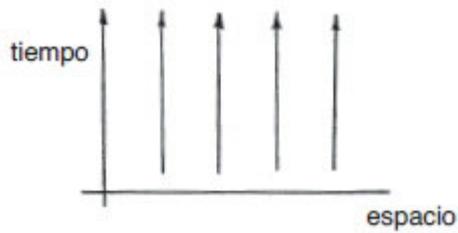


FIGURA 1.a.

Según la relatividad general, la teoría moderna de la gravedad, el espaciotiempo estaría distorsionado en presencia de campos gravitatorios intensos. Lo que esto significa se ilustra en la figura 1.a, que muestra el continuo espaciotemporal con el espacio en la horizontal y el tiempo en la vertical. Los campos gravitatorios intensos dan lugar a hoyos, o pozos, en la superficie, tal como se ilustra en la figura 1b.

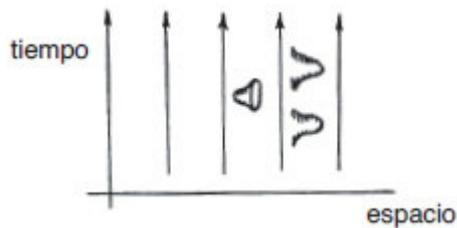


FIGURA 1b.

Ahora puede explicarse la idea clave que subyace a las máquinas del tiempo.

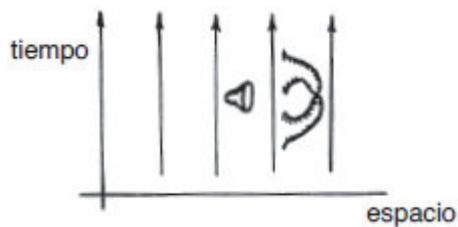


FIGURA 1c.

Imaginemos que los extremos de dos hoyos diferentes se tocan (figura 1c) y se unen para formar un arco o un túnel, como en la figura 1d. El efecto de un arco semejante es que un fragmento del río del tiempo se separa del flujo principal, pasa a través del arco, y se vuelve a unir al flujo principal en un tiempo anterior a cuando entró en el arco (figura 1e). Un ser humano en una trayectoria semejante sería transportado junto con el río del tiempo a través del túnel, haciéndose más viejo mientras tanto, hasta reaparecer en el flujo principal en el pasado de (es decir, en un instante anterior a) cuando entró en el arco, como en la figura 1f. De este modo, él podría encontrarse con una versión anterior de sí mismo. Stephen Hawking explica en este volumen que tales estructuras espaciotemporales pueden aparecer como soluciones matemáticas de las ecuaciones de campo de Einstein. Aunque la mayoría de los científicos despachan estas soluciones como curiosidades matemáticas, recientemente Kip Thorne, junto con sus colegas más jóvenes, ha investigado tales soluciones seriamente.

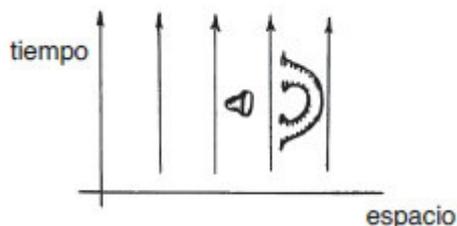


FIGURA 1d.

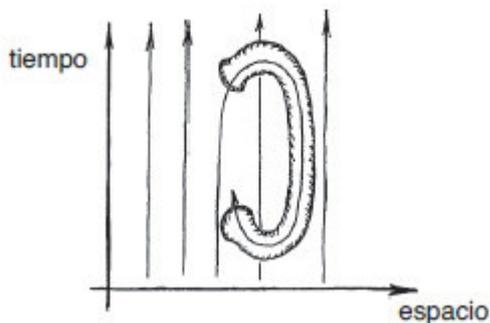


FIGURA 1e

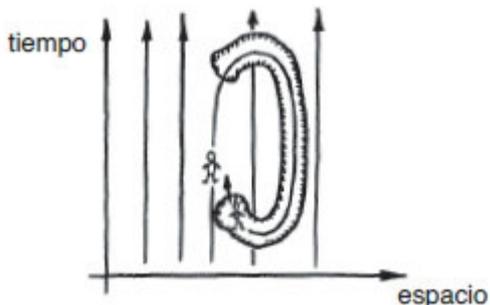


FIGURA 1f.

Este ensayo discutirá las siguientes tres cuestiones relacionadas con las máquinas del tiempo. Primera, ¿cómo podrían crearse máquinas del tiempo? Segunda, ¿es realmente posible cambiar el pasado utilizando una máquina del tiempo? Tercera, ¿qué sucede con nuestras nociones de causalidad y libre albedrío?

La primera cuestión es cómo pueden crearse máquinas del tiempo. Esta cuestión requiere una discusión de los espacios curvos o distorsionados. Puesto que es muy difícil imaginar o visualizar espacios tridimensionales curvos, utilicemos en su lugar como analogía los espacios bidimensionales curvos, habitados por personas bidimensionales, de la figura 2a.



FIGURA 2a.

Consideremos en este espacio una estrella bidimensional cuyo campo gravitatorio es más bien débil. El campo gravitatorio de la estrella se manifestará como un pozo poco profundo, como se ilustra en la figura 2b.

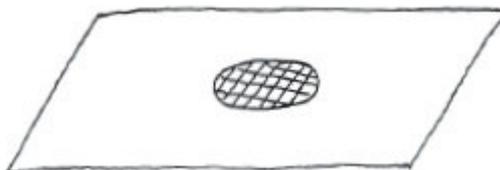


FIGURA 2b.

Supongamos ahora que comprimimos la estrella y hacemos que se contraiga. Durante este proceso el campo gravitatorio de la estrella aumenta de intensidad, y como resultado la profundidad del pozo aumenta, tal como se muestra en las figuras 2c y 2d.



FIGURA 2c.

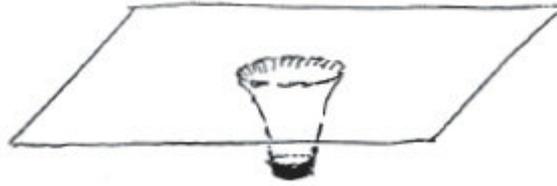


FIGURA 2d.

Supongamos ahora que tenemos dos pozos semejantes y que los fondos de estos dos pozos se tocan. Esto crea una estructura denominada un «agujero de gusano», ilustrada en la figura 3. Consiste en dos aberturas, o bocas, y un túnel o arco entre ellas. Supongamos que podemos estabilizar una estructura semejante de modo que sea estática (es decir, invariable) o casi estática. Entonces un ser bidimensional puede ir de una boca a la otra de dos formas: por el espacio «externo» o a través del túnel del agujero de gusano. Como puede verse en la figura 3, la ruta a través del agujero de gusano es más larga que la ruta por el espacio externo. Sin embargo, uno puede imaginar situaciones en las que sea cierto lo contrario. Por ejemplo, si uno tuviera un túnel que atravesara el interior de la Tierra, entonces el camino sobre la superficie de la Tierra desde una abertura a la otra sería más largo que el camino a lo largo del túnel. Una situación similar puede aplicarse a nuestros modelos bidimensionales de espacio curvo. Como se ilustra en la figura 4, el espacio bidimensional puede estar combado de tal forma que la distancia a través del corredor entre las dos bocas es más corta que la distancia en el espacio externo.

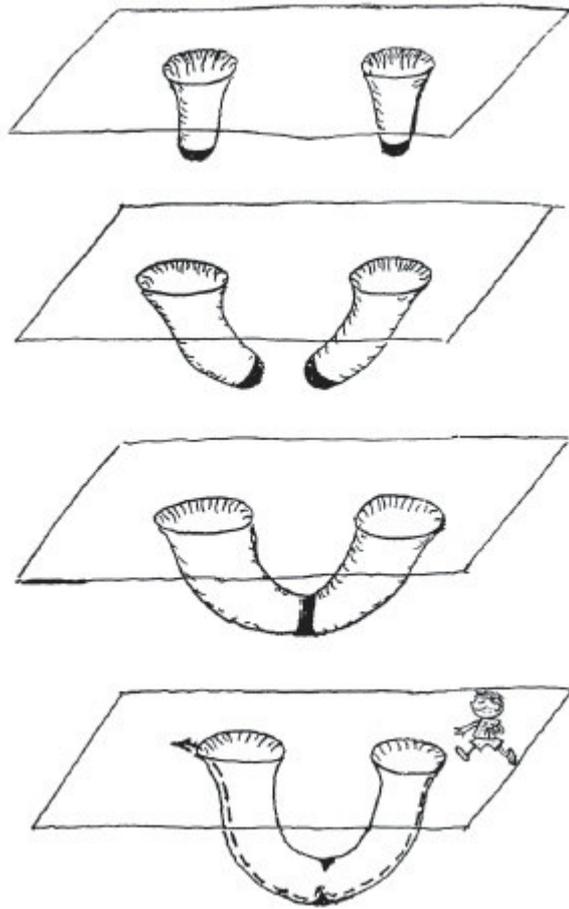
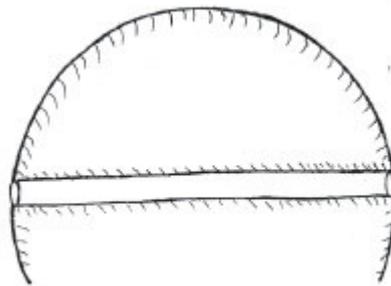


FIGURA 3.

Podemos imaginar agujeros de gusano similares en el espacio tridimensional real. Pronto explicaré cómo pueden convertirse tales agujeros de gusano en máquinas del tiempo, como propuso Kip Thorne. Sin embargo, no discutiré los posibles obstáculos que impiden su construcción, porque esta cuestión será tratada más adelante en este volumen por Stephen Hawking.



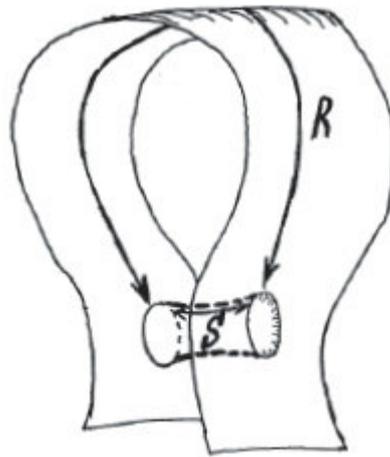
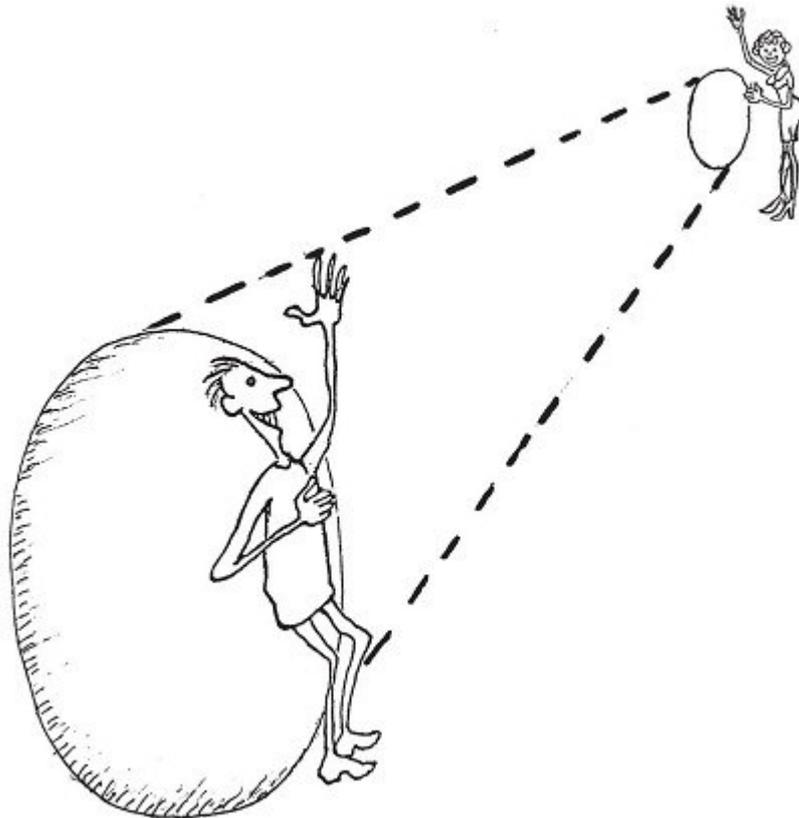


FIGURA 4.
agujero de gusano



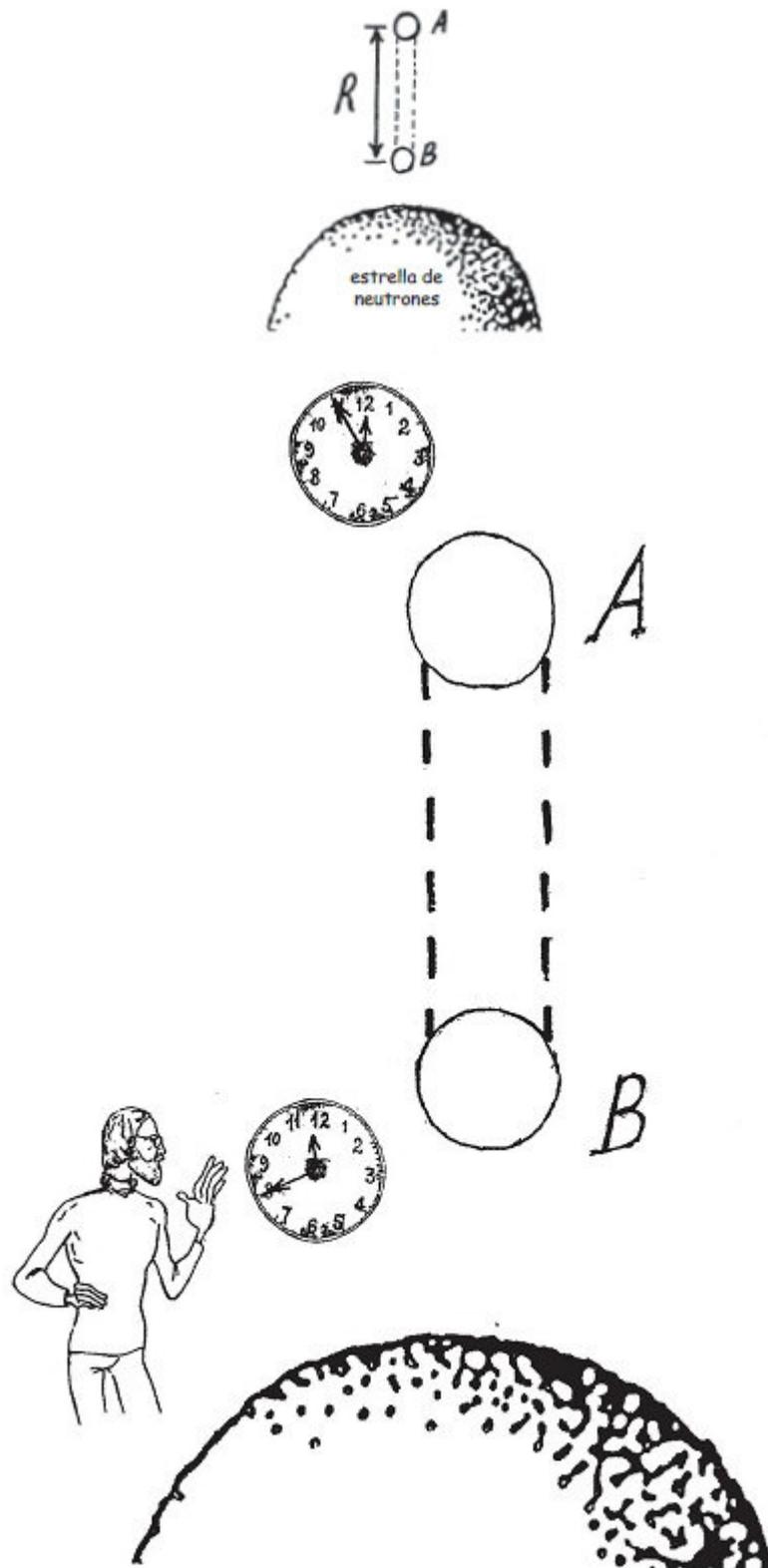
Imaginemos ahora que en el espacio tridimensional tenemos un agujero de gusano que consiste en dos aberturas, la boca *A* y la boca *B*, y un corredor entre ellas. Por supuesto, el corredor no se encuentra en el espacio tridimensional normal; más bien puede considerarse que existe en un hiperespacio de más dimensiones. Supongamos que la distancia entre las bocas a lo largo del corredor es mucho más corta que la distancia entre las bocas en el espacio externo. Si hubiera un chico en la boca *A* y una chica en la boca *B*, y el chico mirara a la chica a través del espacio normal, entonces él la vería a una gran distancia, a muchos kilómetros o incluso años-luz. Sin embargo, si él la mira a través del agujero de gusano, es posible en principio que ella esté a sólo unos pocos metros. Ahora el agujero de gusano puede actuar como una «máquina del espacio», porque el chico puede ir a través de él para acercarse a la chica, pero todavía no es una máquina del tiempo.



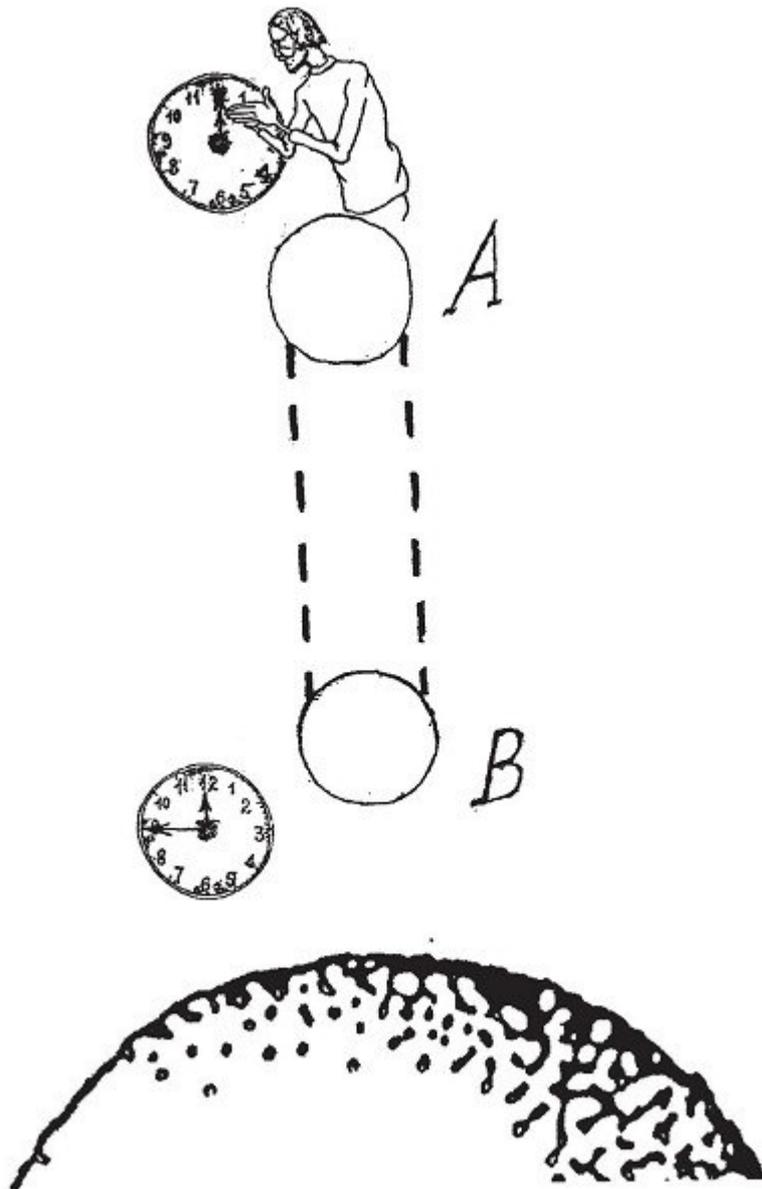
He aquí cómo un agujero de gusano semejante *puede* convertirse en una máquina del tiempo. Supongamos que colocamos dos relojes cerca de las dos bocas, el reloj *A* cerca de la boca *A* y el reloj *B* cerca de la boca *B*, y que los relojes están inicialmente sincronizados. Coloquemos además la boca *B* en el intenso campo gravitatorio de una estrella de neutrones.



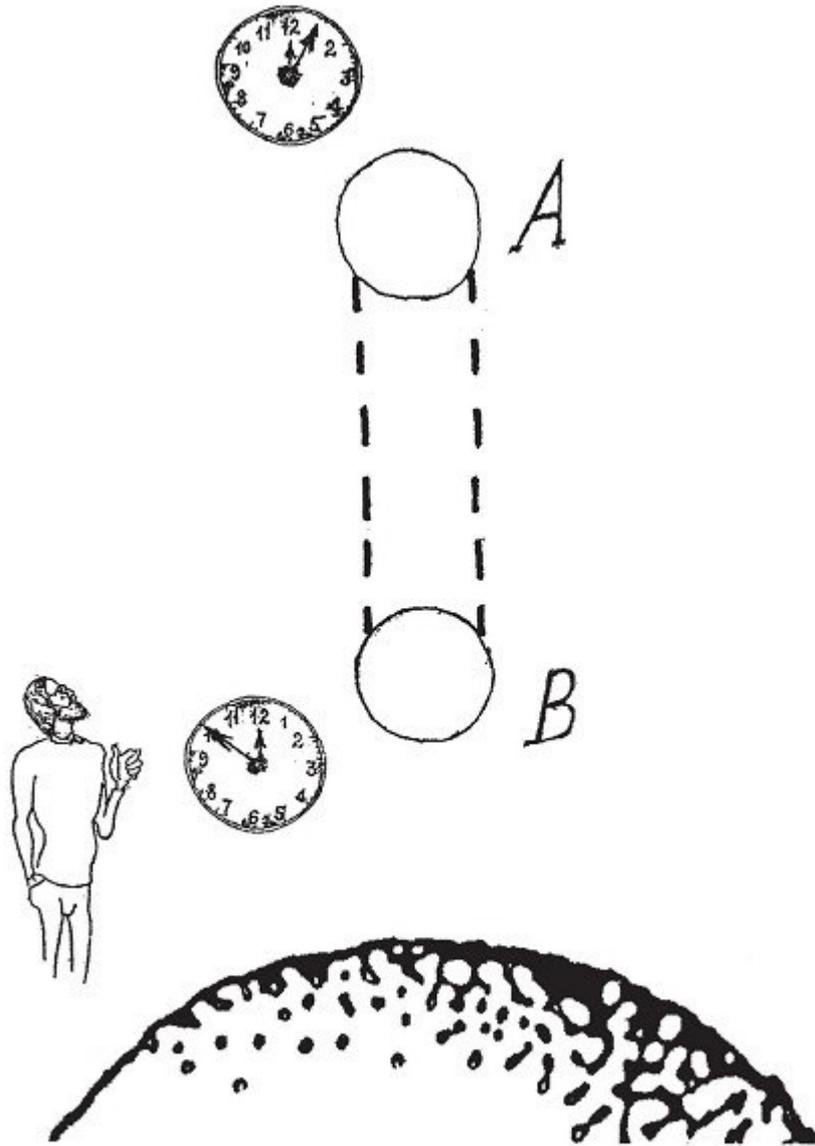
Recordemos que el ritmo del tiempo depende de la intensidad del campo gravitatorio, y que el tiempo fluye lentamente cerca de la superficie de una estrella de neutrones, de modo que el tiempo fluye lentamente cerca de la boca *B*. Si la boca *A* está más alejada de la estrella de neutrones que la boca *B* en una distancia *R*, entonces la diferencia entre el ritmo del tiempo en las bocas *A* y *B* será proporcional a *R*.



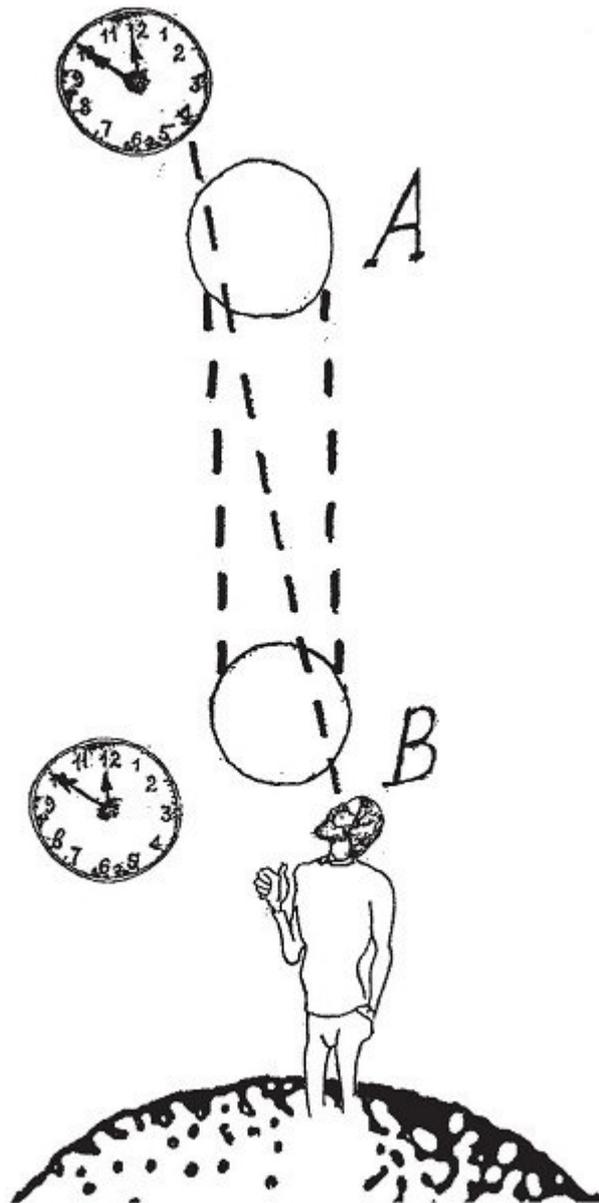
Transcurrido algún tiempo, los dos relojes tendrán lecturas diferentes. El reloj A podría marcar las doce menos cinco, mientras que el reloj B , que ha marchado más lentamente, podría marcar las doce menos veinte, por ejemplo. Esta diferencia puede ser vista fácilmente por un observador situado fuera del agujero de gusano. Él puede viajar de un reloj a otro, tocar la esfera de cada reloj, y estar seguro de que la diferencia entre ellas es de quince minutos.



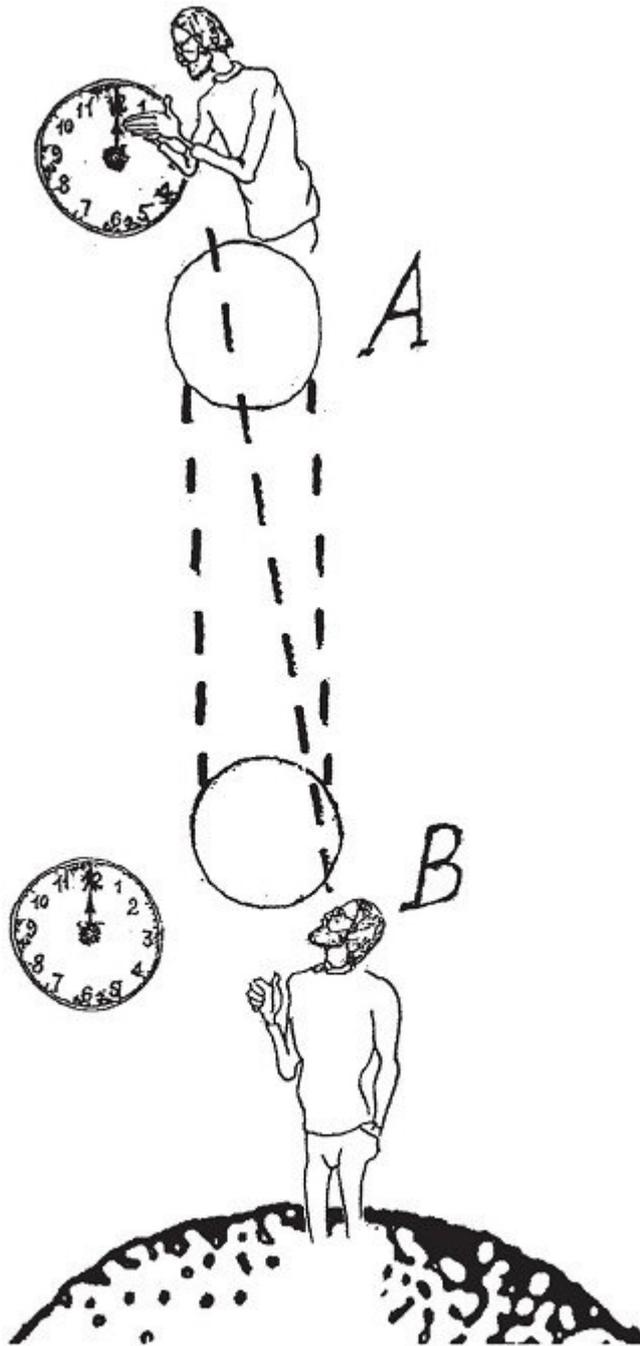
Supongamos ahora que el observador vuelve a la boca *B* y llega ahí cuando el reloj *B* está marcando las doce menos diez, y el reloj *A* está marcando las doce y cinco. Si nuestro observador mira al reloj *A* a través de este agujero de gusano, ¿qué es lo que verá?



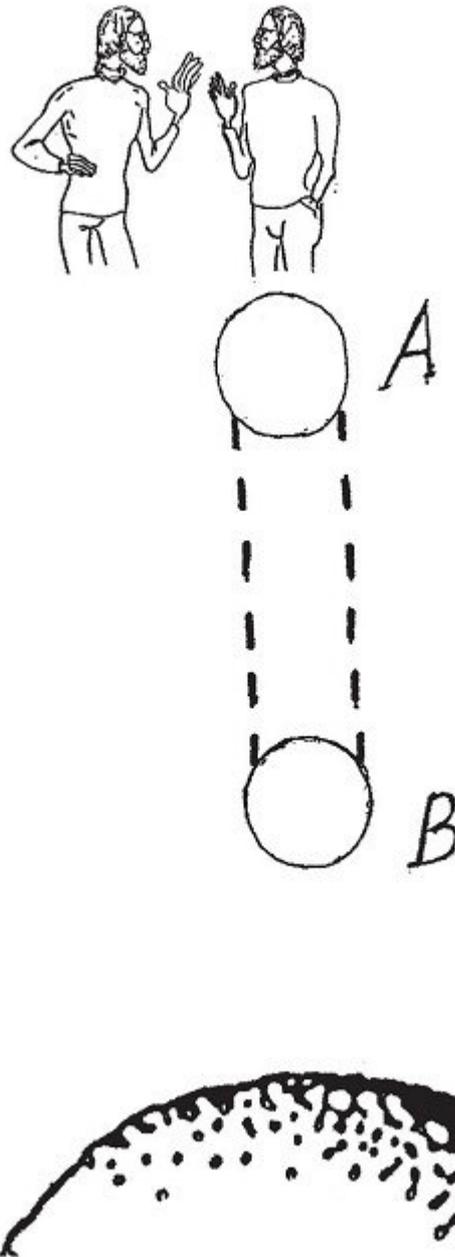
Recordemos que la distancia a través del corredor es mucho menor que la distancia entre los mismos puntos a través del espacio externo. Por lo tanto, el observador ve el segundo reloj muy cercano, de modo que ambos relojes están prácticamente uno al lado del otro, a unos pocos metros de distancia. Recordemos también que la diferencia en el ritmo de marcha de los dos relojes es proporcional a la distancia entre ellos. A través del agujero de gusano dicha distancia es prácticamente cero, y por ello no hay diferencia en el ritmo de marcha de los dos relojes.



Éstos marcharán al unísono y mostrarán siempre tiempos idénticos, tales como los perciben observadores que miran a través del agujero de gusano. Por consiguiente, si el observador mira a través del agujero de gusano ve que el reloj *A* marca el mismo tiempo que el reloj *B*, puesto que durante todo el experimento los dos relojes han marchado al unísono. Él verá que ambos relojes marcan las doce menos diez. Sin embargo, esto significa que al mirar a través del corredor el observador está mirando al pasado, puesto que si él mira al reloj *A* por fuera del agujero de gusano ve que marca las doce y cinco. A través del agujero de gusano ve las doce menos diez, de modo que ve el pasado. De hecho, si espera diez minutos se verá a sí mismo en el reloj *A*, puesto que él llegó al reloj *A* y lo tocó mientras estaba marcando las doce en punto.

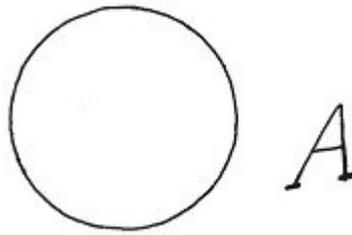


Ahora el observador puede partir a las doce menos diez del reloj *B* y viajar a través del agujero de gusano. Entonces llegará a la boca *A* cuando el reloj *A* marca las doce menos diez. Por consiguiente, ha viajado al pasado, y el agujero de gusano actúa como una máquina del tiempo. El observador puede incluso encontrarse a sí mismo, a las doce en punto, en la boca *A*.

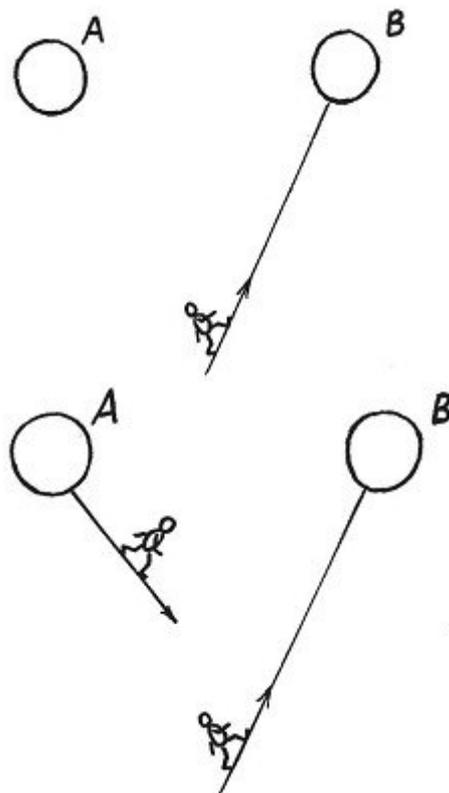


Habría que hacer aquí dos comentarios. En primer lugar, esta máquina del tiempo puede en principio ser muy potente. Cuanto más tiempo esperemos con la boca *A* en el campo gravitatorio intenso, mayor será la diferencia de tiempos entre los relojes *A* y *B*. Podemos conseguir que la máquina del tiempo nos transporte muchas horas o incluso años al pasado. En segundo lugar, si apartamos las bocas del agujero de gusano de la vecindad de la estrella de neutrones, lejos del campo gravitatorio intenso, continuará funcionando como una máquina del tiempo. Por consiguiente, podemos en principio construir una máquina del tiempo que consiste en dos bocas, *A* y *B*, y un corredor muy corto en alguna dimensión adicional que las une, tal que un observador que entre por la boca *B* saldrá por la boca *A* en el pasado. Como se explica en el ensayo de Stephen Hawking, esto significa que uno puede encontrarse con una versión más joven de sí mismo en el pasado.

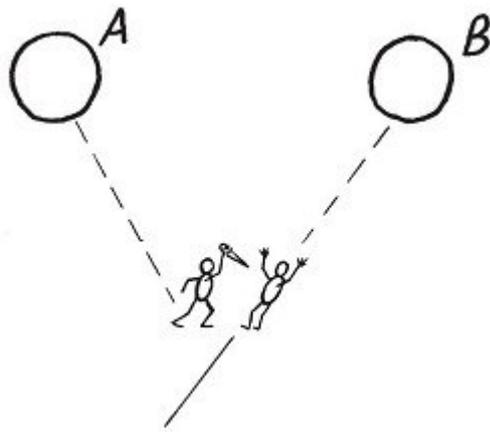




Está claro que las máquinas del tiempo como ésta pueden dar lugar a paradojas. Supongamos que yo entro en la boca *B* y reaparezco en la boca *A*, en el pasado, antes de haber entrado en la boca *B*. Entonces, habrá dos versiones de mí mismo, una más joven a punto de entrar en la boca *B* y una más vieja que acaba de salir de la boca *A*. Supongamos que con un cuchillo mato a la versión más joven de mí mismo. Entonces resulta imposible que la versión más joven de mí mismo siga el camino a la boca *B* y emerja de la boca *A* para ejecutar el homicidio. Esto es una paradoja. Alternativamente, puedo utilizar una máquina del tiempo más potente, viajar hacia atrás hacia el pasado distante y matar a mi abuela antes de que haya dado a luz a mi madre, lo que lleva a una paradoja similar.



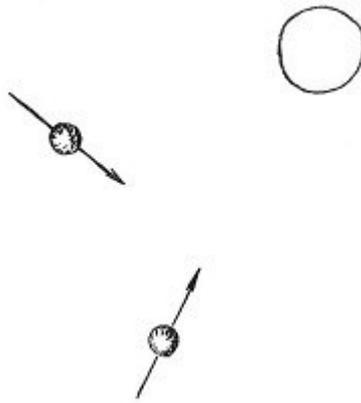
¿Demuestra esta paradoja que el viaje en el tiempo es imposible? En absoluto. La razón es que en nuestra discusión de la paradoja he cometido un grave error lógico. Discutí la situación dos veces, de dos formas diferentes. En la primera discusión discutí mi viaje a la boca *B* suponiendo que no había encuentro con la versión más vieja de mí mismo que viene del futuro. En la segunda discusión, discutí el mismo viaje pero supuse que la primera discusión era correcta y que, por consiguiente, podría viajar hacia atrás en el tiempo y habría así un encuentro. El error está en que en la primera discusión hice la hipótesis de que no hubo encuentro. Pero si el encuentro sucedió, sucedió. De modo que desde el primer momento deberíamos tener en cuenta las consecuencias del encuentro. Por consiguiente, incluso si no soy asesinado cuando viajo a la boca *B*, recordaré el encuentro con mi yo más joven cuando salga de la boca *A*.



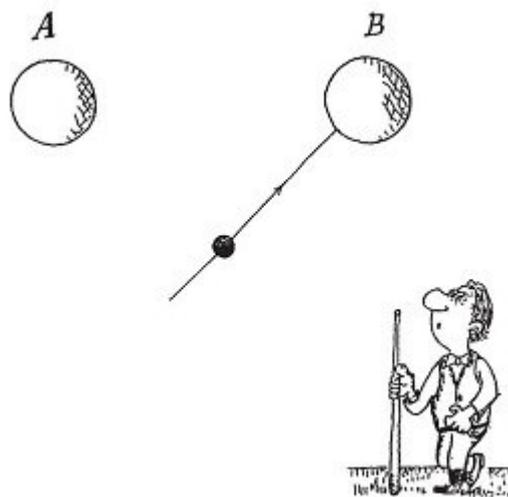
Entonces, ¿qué sucede realmente en este escenario cuando lo analizamos sin ninguna hipótesis incorrecta? Aquí tropezamos con una complicación: los físicos no pueden calcular explícitamente las acciones de los seres humanos, porque los seres humanos son demasiado complicados. Probablemente esto es trabajo para la psicología, o para la zoología, pero no para la física. Sin embargo, los físicos pueden modelizar situaciones similares, y aparentemente paradójicas, en donde intervienen cuerpos físicos simples. Utilizando tales modelos, los físicos pueden calcular lo que les sucede a los cuerpos y determinar cómo se resuelve la paradoja.



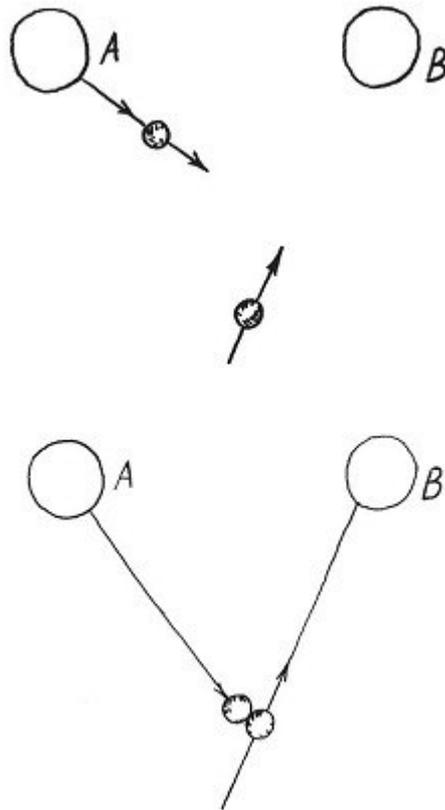
Así pues, tratemos de modelizar esta paradoja utilizando objetos físicos sencillos. Imaginemos una bola de billar que rueda sobre una mesa con una abertura o tronera. No es difícil para alguien empujar la bola en la dirección de la abertura, de modo que la bola rueda sobre la mesa y finalmente caiga en la abertura. Supongamos que hay una segunda bola de billar que viaja a lo largo de una trayectoria que se cruza con la trayectoria de la primera bola antes de que esta primera bola alcance la abertura. Entonces habrá una colisión. Si la colisión es suficientemente fuerte, el cambio en la dirección de la primera bola será suficientemente grande para que, tras la colisión, la primera bola se mueva en una trayectoria completamente diferente y no entre en la abertura.



Supongamos que tenemos una máquina del tiempo con bocas *A* y *B* como se describió antes, de modo que si alguien entra en la boca *B* reaparecerá en la boca *A* en el pasado. Tomamos sólo una bola de billar y la enviamos en una trayectoria hacia la boca *B*. La bola de billar viaja ahora a través del espacio vacío y no sobre la superficie de una mesa de billar, pero esta diferencia carece de importancia. La bola se moverá a través del espacio hacia la boca *B*. Sin embargo, antes de que llegue a la boca *B* surgirá de la boca *A* debido al efecto de la máquina del tiempo. De este modo, habrá dos versiones, o materializaciones, de la misma bola de billar: una versión más joven y una versión más vieja.



Podemos disponer el impulso inicial de la bola de tal manera que las trayectorias de las dos versiones se crucen y, por lo tanto, que las dos versiones lleguen al punto de encuentro casi simultáneamente. ¿Cuál será el resultado? Igual que en el caso de las bolas sobre la mesa de billar, podemos disponer el impulso inicial de tal modo que la bola de billar más vieja golpee a la más joven con la fuerza suficiente para desviar su trayectoria de modo que la más joven nunca llegue a la boca *B*.

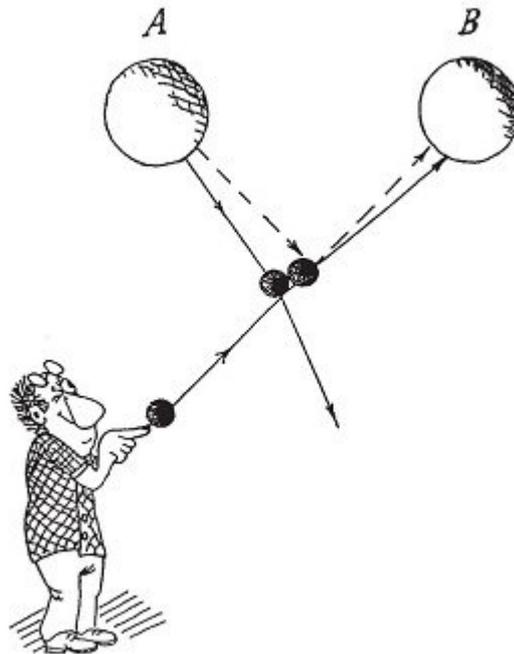


Una vez más tenemos una paradoja: si la bola más joven nunca entra en la boca *B*, no hay razón para que la bola de billar más vieja aparezca por la boca *A*. Esta paradoja es análoga a la paradoja anterior en la que yo me encontraba con una versión más joven de mí mismo. Una vez más, el origen de las paradojas está en un error lógico en nuestras dos discusiones de la situación. En la primera discusión del movimiento de la bola supusimos que ninguna bola salía de la boca *A* y no tuvimos en cuenta la colisión. Estas hipótesis eran incorrectas: si la colisión sucedió, sucedió, y debería ser tomada en cuenta en la primera discusión. De modo que el movimiento de la versión más joven de la bola de billar estará influido por dos efectos: nuestro impulso inicial y el efecto de la colisión con la bola de billar más vieja.

Así que ¿cuál es la solución de la paradoja? ¿Qué sucede realmente si enviamos la bola de billar hacia la boca *B* con un impulso inicial adecuado? En esta situación podemos calcular lo que sucede porque las bolas de billar son un sistema mecánico muy simple. Si tenemos en cuenta la colisión desde el principio, entonces la colisión es muy débil, sólo un ligero roce entre las dos bolas que perturba a la bola más joven sólo ligeramente. La bola más joven se mueve entonces a lo largo de una trayectoria ligeramente diferente de la que esperábamos, pero sigue entrando en la boca *B*. Reaparece por la boca *A* en el pasado y continúa su movimiento, también una trayectoria que sólo difiere ligeramente de la trayectoria que hubiera seguido si no hubiera sufrido una colisión. El resultado de la ligera diferencia en la trayectoria es que la colisión con la versión más joven de sí misma no es una colisión fuerte, sino más bien una colisión débil, de refilón. Por consiguiente, tenemos una solución consistente. Aunque tratáramos de provocar una colisión fuerte, encontraríamos de hecho que la colisión es débil, siempre que analicemos la situación correctamente teniendo en cuenta la colisión desde el principio. Esta solución consistente puede obtenerse a partir de un cálculo matemático riguroso, y fue descubierta por primera vez por Kip Thorne.

Vemos ahora que no hay contradicciones o paradojas; y, más aún, que no existen dos versiones diferentes del suceso de colisión. Hubo sólo una colisión, sólo una historia de sucesos. Si algo sucedió, sucedió. Los sucesos pueden estar influidos por otros sucesos en el futuro, así como por otros sucesos en el pasado, de modo que el flujo de sucesos puede ser complejo. Sin

embargo, hay sólo un flujo de sucesos, de modo que el pasado no puede cambiarse una vez que ha ocurrido.



Se podría objetar que hemos analizado un sistema mecánico trivial, y que otros sistemas más complejos llevan a paradojas drásticas que no pueden resolverse de forma tan fácil. Por ejemplo, supongamos que en lugar de una bola de billar tenemos una bomba cuya superficie está cubierta con espoletas, de modo que incluso el contacto más ligero con la superficie de la bomba haría que detonase. A primera vista parece que no hay flujo autoconsistente de sucesos en esta situación. Supongamos en efecto que impulsamos la bomba de una forma apropiada en la dirección de la boca B del agujero de gusano. La bomba debería surgir de la boca A en el pasado y moverse a lo largo de una trayectoria hasta el punto de encuentro. Si encuentra a una versión anterior de sí misma, incluso una colisión de refilón provocaría una explosión. La versión más joven de la bomba quedaría destruida, haciendo imposible que la versión más joven de la bomba continúe su movimiento hacia la boca B y que la versión más vieja reaparezca por la boca A. De modo que hay una paradoja.

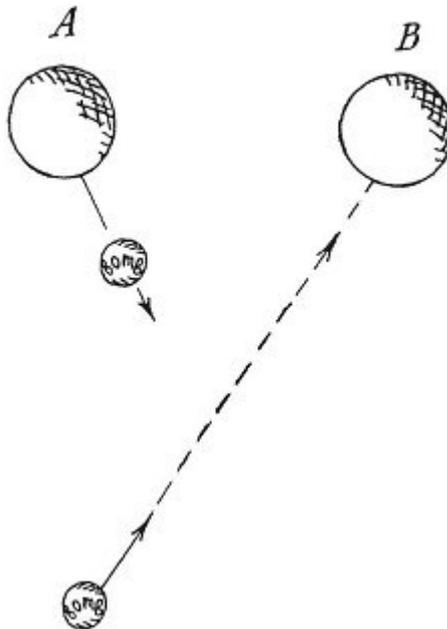


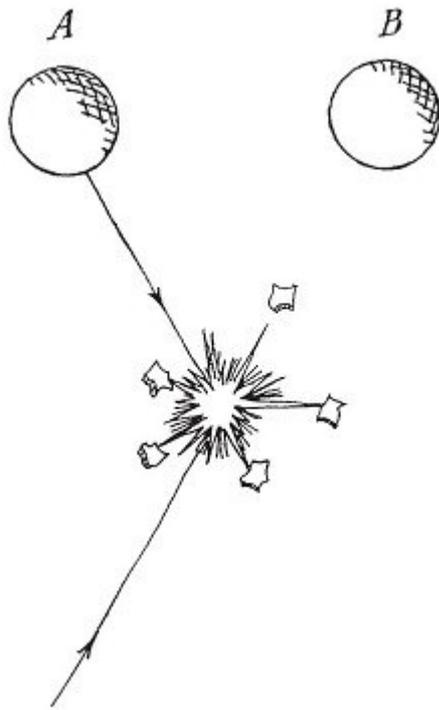
Una bola con una bomba y espoletas

La solución de esta paradoja es la siguiente. Mientras la bomba se mueve a lo largo de su trayectoria hacia la boca B, algo emerge de la boca A: no una versión más vieja de la bomba, sino un fragmento de la bomba. (Pronto quedará claro por qué surge un fragmento de la boca A). El fragmento se mueve a lo largo de una trayectoria hasta el punto de encuentro, colisiona con la bomba y causa una explosión.

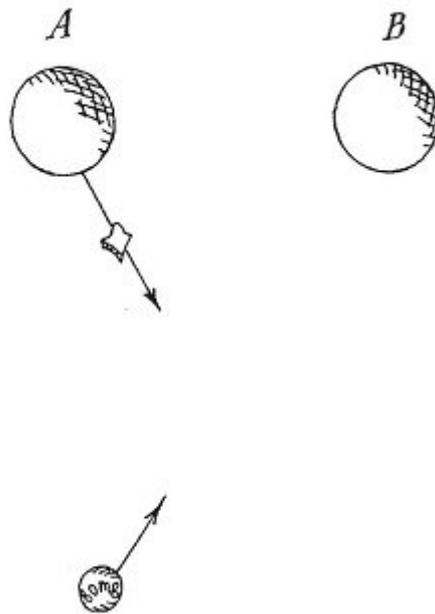


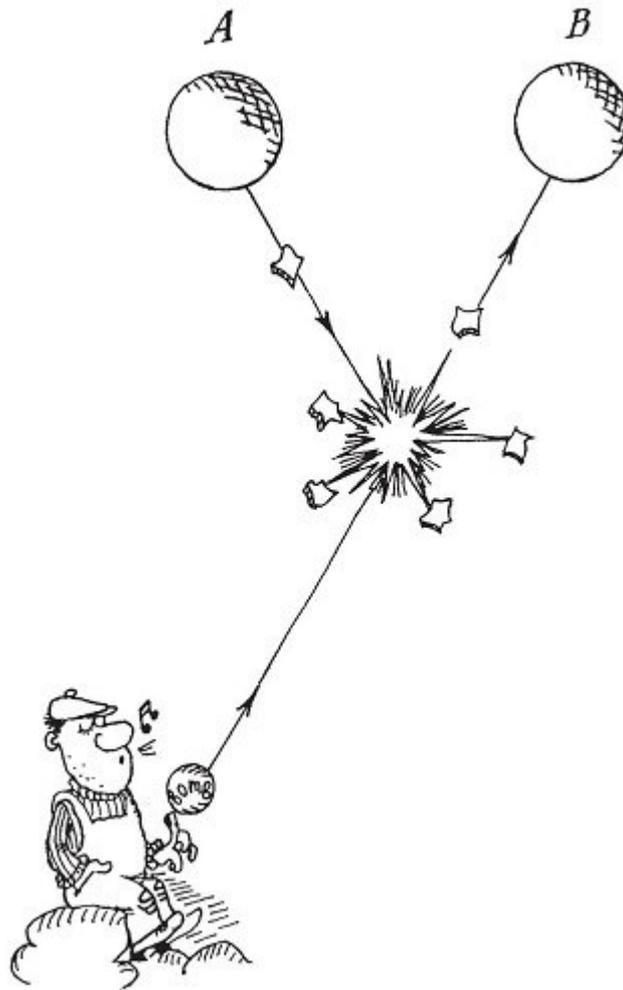
Los fragmentos de la bomba son dispersados en muchas direcciones diferentes, y al menos uno de ellos entra en la boca *B*. Dicho fragmento reaparece luego en la boca *A* en el pasado, y provoca la explosión original. Una vez más tenemos una situación autoconsistente sin ninguna contradicción o paradoja. Sin embargo, también podemos ver explícitamente la influencia del futuro sobre el pasado. El fragmento procedente del futuro es la causa de la explosión, pero es también una consecuencia de la explosión. Esto es muy poco habitual pero no es contradictorio.





Podemos extraer dos conclusiones de estos ejemplos. En primer lugar, en presencia de máquinas del tiempo podemos encontrarnos con procesos físicos muy extraños y anormales, pero no con contradicciones.



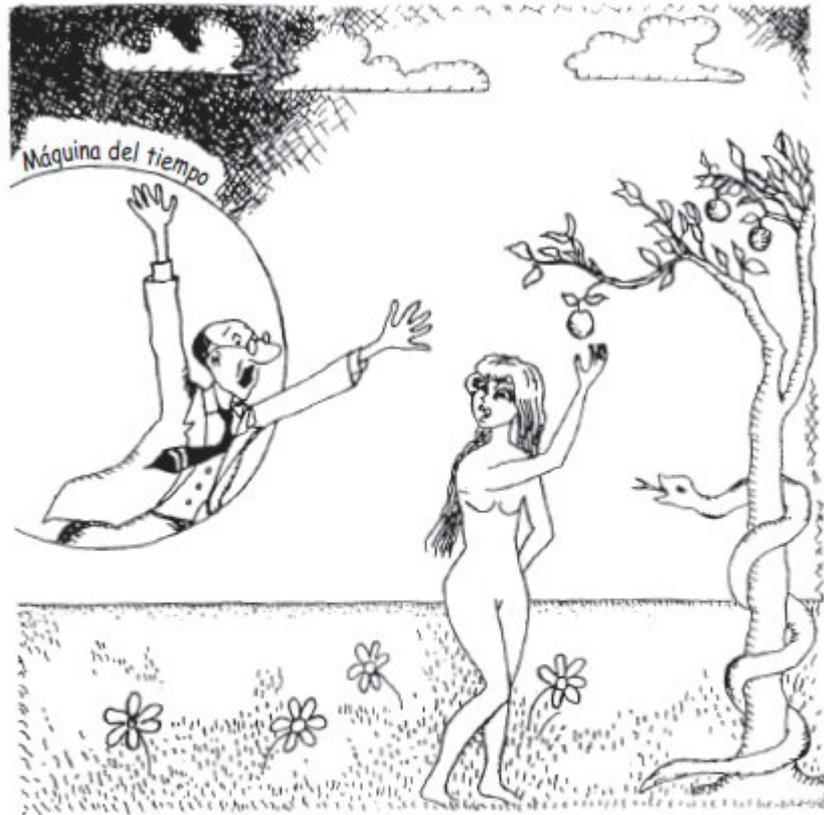


En segundo lugar, ningún suceso (como el de la explosión) puede cambiarse. Sucedió sólo una vez, y es imposible tener dos historias, una en la que el suceso ocurre y otra en la que no ocurre. Reconsideremos ahora las situaciones aparentemente paradójicas que implican a seres humanos. ¿Sería posible que usted utilizara una máquina del tiempo para viajar al pasado y matar a una versión más joven de usted mismo? La respuesta es no; es imposible. Eso llevaría a una paradoja, y vimos antes que las paradojas no se dan. Por consiguiente, las leyes físicas deberían impedirle matar a una versión más joven de usted mismo. Como ha dicho Kip Thorne, si usted trata de matar a una versión más joven de usted mismo, o a su abuela, algo debe detener su mano.



No es posible para los físicos calcular exactamente qué es lo que detiene la mano, porque los seres humanos son muy complejos, aunque podemos calcular lo que sucede para objetos físicos sencillos, tal como hemos hecho aquí.

Esto significa que nuestro libre albedrío debe estar limitado. Si yo me encuentro con una versión más joven de mí mismo y quiero matar a dicha versión más joven, entonces las leyes de la física me lo impedirán. Tal limitación sobre nuestro libre albedrío es inusual y misteriosa pero no carece de paralelos. Por ejemplo, mi voluntad puede ser la de caminar por el techo sin la ayuda de ningún equipamiento especial. La ley de la gravedad me impide hacerlo; me caeré si lo intento, de modo que mi libre albedrío está restringido. Por supuesto, en el caso de una máquina del tiempo la naturaleza de la restricción sobre el libre albedrío es diferente, pero no esencialmente diferente.



**¡Señorita, señorita!
¡Por el amor de Dios,
deténgase!**

En conclusión, la cuestión de si pueden existir las máquinas del tiempo no está todavía resuelta. Sin embargo, incluso si las máquinas del tiempo están prohibidas por las leyes de la física, sigue valiendo la pena pensar sobre las cuestiones que plantean, puesto que pueden proporcionarnos nuevas ideas sobre la naturaleza del tiempo, la causalidad y otros aspectos de la física. En definitiva, no podemos cambiar el pasado. No podemos enviar a un viajero en el tiempo de vuelta al Jardín del Edén para advertir a Eva de que no coja la manzana del árbol.

2

Protección de la cronología: haciendo el mundo seguro para los historiadores

STEPHEN W. HAWKING

Este ensayo tratará del viaje en el tiempo, en el que Kip Thorne se ha ido interesando a medida que se ha hecho más viejo. (¿Es esto una coincidencia?). Pero especular abiertamente sobre el viaje en el tiempo es delicado. Si los medios de comunicación se enteraran de que el gobierno estaba financiando investigación sobre el viaje en el tiempo, se produciría o bien un clamor por el despilfarro de dinero público, o bien una demanda de que la investigación quede clasificada para objetivos militares. Después de todo, ¿cómo podríamos protegernos si los rusos o los chinos consiguiesen el viaje en el tiempo y nosotros no? ¡Ellos podrían traer de nuevo a los camaradas Stalin y Mao! De modo que sólo algunos de nosotros estamos suficientemente locos para trabajar en un tema que es tan políticamente incorrecto, incluso en los círculos de la física. Disfrazamos lo que estamos haciendo utilizando términos técnicos como «curvas cerradas de género tiempo», que es simplemente una expresión en clave para el viaje en el tiempo.

La primera descripción científica del tiempo fue dada en 1687, por *sir* Isaac Newton. Newton ocupó la Cátedra Lucasiana de Cambridge que yo ocupo ahora (aunque entonces no estaba accionada eléctricamente).^[1] En la teoría de Newton, el tiempo era absoluto y fluía continuamente. No había parada y vuelta a una época anterior. Sin embargo, la situación cambió cuando Einstein formuló su teoría de la relatividad general, en 1915. El tiempo quedaba ahora unido al espacio en una nueva entidad denominada espaciotiempo. El espaciotiempo no era un fondo absoluto y fijo en el que tenían lugar los sucesos. En su lugar, el espacio y el tiempo se hicieron dinámicos por las ecuaciones de Einstein, que describen cómo aquéllos se curvan y distorsionan por la presencia de materia y energía en el universo. El tiempo seguía aumentando localmente, pero ahora existía la posibilidad de que el espaciotiempo pudiera curvarse tanto que uno podría moverse en una trayectoria que le hiciese estar de vuelta antes de haber partido. Hace algunos años la BBC hizo una película donde interveníamos Kip y yo, mostrando lo que podría ser este tipo de viaje en el tiempo. Utilizaron trucos fotográficos para mostrar «agujeros de gusano», hipotéticos tubos de espaciotiempo que podrían conectar regiones diferentes del espacio y el tiempo. La idea es que uno entra en una boca del agujero de gusano y sale por la otra boca, en un lugar diferente y en un tiempo diferente.

Los agujeros de gusano, si existen, serían ideales para un viaje espacial rápido. Usted podría ir a través de un agujero de gusano al otro lado de la galaxia y estar de regreso para la cena. Sin embargo, se puede demostrar que, si existen los agujeros de gusano, también se podrían utilizar para volver antes de haber partido. Entonces cabría pensar que usted podría hacer algo, como explotar el cohete en su rampa de lanzamiento, para impedir su partida inicial.

Ésta es una variante de la paradoja del abuelo: ¿qué sucede si usted retrocede en el tiempo y mata a su abuelo antes de que su padre fuera concebido?



Por supuesto, ésta es una paradoja sólo si usted cree que tiene libre albedrío para hacer lo que quiera cuando retroceda en el tiempo. No voy a entrar en este ensayo en una discusión filosófica del libre albedrío. En su lugar, me centraré en si las leyes de la física permiten que el espaciotiempo esté tan curvado que un cuerpo macroscópico, tal como una nave espacial,

pueda volver a su propio pasado. Según la teoría de Einstein, una nave espacial viaja necesariamente a una velocidad menor que la velocidad local de la luz, y sigue lo que se denomina una «curva de género tiempo» a través del espaciotiempo. Así pues, uno puede formular la cuestión en términos técnicos: ¿admite el espaciotiempo curvas de género tiempo que sean «cerradas», es decir, que regresen a su punto de partida una y otra vez?

Viaje en el tiempo  Curvas cerradas de género tiempo

Podemos tratar de responder a esta cuestión en tres niveles. El primero es la teoría de la relatividad general de Einstein. Ésta es lo que se denomina una «teoría clásica». Es decir, supone que el universo tiene una historia bien definida, sin ninguna incertidumbre.

¿Admite el espaciotiempo curvas cerradas de género tiempo?

1. Teoría clásica
2. Teoría semiclásica
3. Gravedad cuántica completa

En el caso de la relatividad general clásica, tenemos una imagen bastante completa, que voy a describir en un momento.

Sabemos, sin embargo, que la teoría clásica no puede ser completamente correcta, porque observamos que la materia en el universo está sometida a fluctuaciones, y su comportamiento no puede predecirse exactamente. En la década de 1920 se desarrolló un nuevo paradigma denominado «teoría cuántica» para describir estas fluctuaciones, para cuantificar la incertidumbre. Podemos así plantear la pregunta sobre el viaje en el tiempo en un segundo nivel, denominado «teoría semiclásica». En éste, los campos cuánticos de materia son considerados en un fondo espaciotemporal clásico. Aquí la imagen es menos completa, pero al menos tenemos cierta idea de cómo proceder.

Finalmente, está el nivel de la teoría cuántica completa de la gravedad, cualquiera que pueda ser. Aquí no está ni siquiera claro cómo plantear la pregunta, ¿es posible el viaje en el tiempo? Quizá lo mejor que uno puede hacer es preguntar cómo interpretarían sus medidas los observadores en el infinito. ¿Crearían ellos que había tenido lugar el viaje en el tiempo en el interior del espaciotiempo?

Empecemos con la teoría clásica. El espaciotiempo plano no contiene curvas cerradas de género tiempo. Ni lo hacen otras soluciones de las ecuaciones de Einstein que se conocieron pronto. Por consiguiente, fue una gran conmoción para Einstein el descubrimiento, en 1949, por parte de Kurt Gödel, más conocido en matemáticas por el teorema de Gödel, de una solución que representaba un universo lleno de materia en rotación, con curvas cerradas de género tiempo a través de cualquier punto. La solución de Gödel requería una constante cosmológica, que puede existir o no en la naturaleza, pero posteriormente se encontraron otras soluciones sin ella.

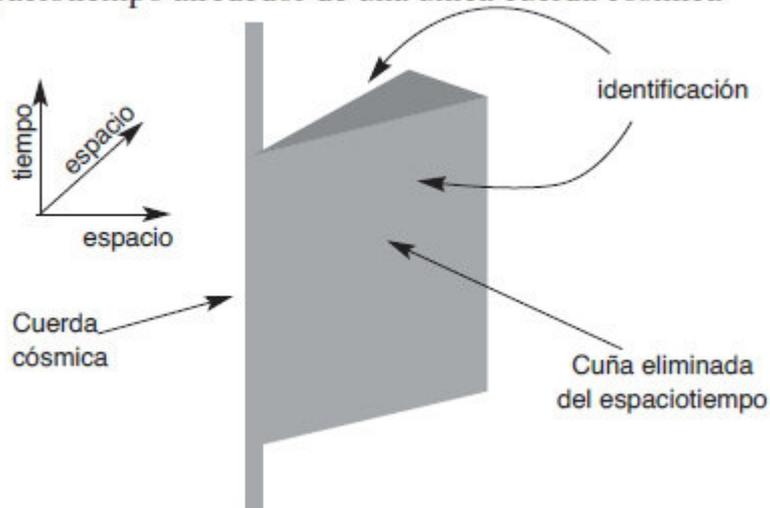
Universo de Gödel

Un espaciotiempo que contiene materia en rotación con curvas cerradas de género tiempo a través de cualquier punto

Un caso particularmente interesante es el de dos cuerdas cósmicas que se cruzan a gran velocidad. Como sugiere su nombre, las «cuerdas cósmicas» son objetos con longitud pero con una minúscula sección transversal. Su existencia es una predicción de algunas teorías de partículas elementales. El campo gravitatorio de una única cuerda cósmica es el espacio plano del que falta una cuña, cuyo filo está en la cuerda. Así pues, si uno recorre un círculo alrededor de una cuerda cósmica, la distancia en el espacio es menor que la que uno esperaría, pero el tiempo no se vería afectado. Esto significa que el espaciotiempo alrededor de una única cuerda cósmica no contiene ninguna curva cerrada de género tiempo. Sin embargo, si existe una segunda cuerda cósmica que se está moviendo con respecto a la primera, la falta de una cuña por cada una de ellas acortará tanto las distancias espaciales como los intervalos temporales. Si las cuerdas cósmicas se están moviendo a una velocidad relativa próxima a la de la luz, el

ahorro de tiempo al dar una vuelta alrededor de ambas cuerdas puede ser tan grande que uno volvería antes de haber partido. En otras palabras, existen curvas cerradas de género tiempo que uno puede seguir para viajar al pasado.

Espaciotiempo alrededor de una única cuerda cósmica



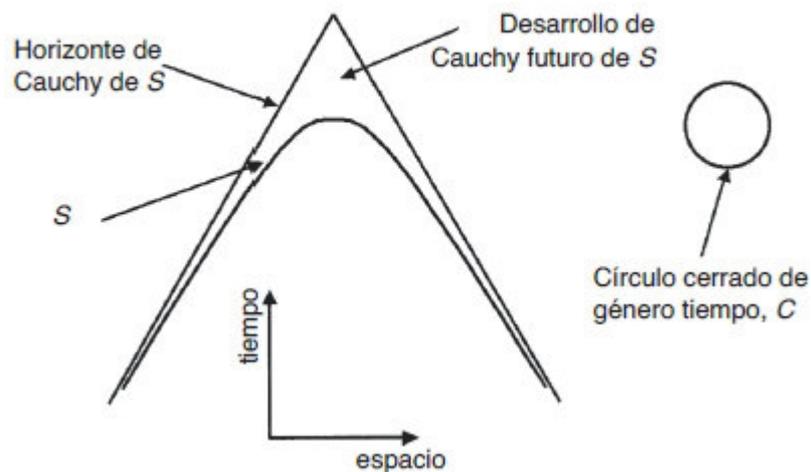
Los espaciotiempos de las cuerdas cósmicas contienen materia que tiene densidad de energía positiva y es físicamente razonable. Sin embargo, la distorsión que produce curvas cerradas de género tiempo se extiende hasta el infinito, y hacia atrás al infinito pasado. Así pues, estos espaciotiempos ya estaban creados con viaje en el tiempo en ellos. No tenemos ninguna razón para creer que nuestro propio universo fuera creado de una forma tan distorsionada, y no tenemos evidencia fiable de visitantes del futuro. (Estoy descartando la teoría de la conspiración: que los ovni proceden del futuro y que el gobierno lo sabe y lo está encubriendo. ¡Su récord de encubrimientos no es tan bueno!). Por lo tanto, supondré que no hay curvas cerradas de género tiempo en el pasado de cierta superficie de tiempo constante, S .

La pregunta entonces es, ¿podría alguna civilización avanzada construir una máquina del tiempo? Es decir, ¿podría dicha civilización modificar el espaciotiempo en el futuro de S , de modo que aparezcan curvas cerradas de género tiempo en una región finita?

Digo «una región finita» porque, por muy avanzada que llegue a estar la civilización, presumiblemente sólo podría controlar una parte finita del universo.

En ciencia, encontrar la formulación correcta de un problema es a menudo la clave para resolverlo, y éste es un buen ejemplo. Para definir lo que se entiende por una máquina del tiempo finita volveré a algún trabajo mío anterior. Yo había definido el desarrollo de Cauchy futuro de S como el conjunto de puntos del espaciotiempo en donde los sucesos están completamente determinados por lo que sucede en S . En otras palabras, es la región del espaciotiempo en donde cualquier posible trayectoria que se mueve a velocidad menor que la de la luz procede de S .

Desarrollo de Cauchy futuro de S



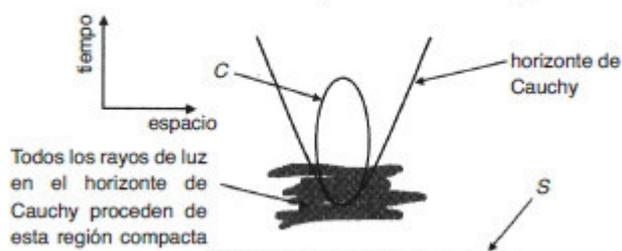
Sin embargo, si una civilización avanzada se las arregla para construir una máquina del tiempo, habrá una curva cerrada de género tiempo C para el futuro de S . C dará vueltas y vueltas en el futuro de S , pero no volverá y cortará a S . Esto significa que puntos en C no estarán en el desarrollo de Cauchy de S . Así pues, S tendrá un horizonte de Cauchy H , una superficie que es una frontera futura para el desarrollo de Cauchy de S . Yo había introducido el concepto de un horizonte de Cauchy aproximadamente en la época en que conocí a Kip, casi en la prehistoria, ¡poco después del Arca!



Los horizontes de Cauchy se dan dentro de ciertas soluciones de agujero negro, y en una solución que los físicos llaman «espacio anti-de Sitter». Sin embargo, en estos casos, los rayos de luz que forman el horizonte de Cauchy empiezan o bien en el infinito o bien en las singularidades. Crear un horizonte de Cauchy semejante requeriría o bien ser capaz de distorsionar el espaciotiempo hasta el infinito o bien tener una singularidad en el espaciotiempo. Distorsionar el espaciotiempo hasta el infinito estaría más allá de las posibilidades incluso de la civilización más avanzada, que sólo sería capaz de distorsionar el espaciotiempo en una región finita. La civilización avanzada podría reunir suficiente materia para causar un colapso gravitatorio que produciría una singularidad espaciotemporal, al menos según la relatividad general clásica. Pero las ecuaciones de Einstein no pueden definirse en la singularidad, de modo que no se podría predecir qué sucedería más allá del horizonte de

Cauchy y, en particular, si habría o no curvas cerradas de género tiempo.

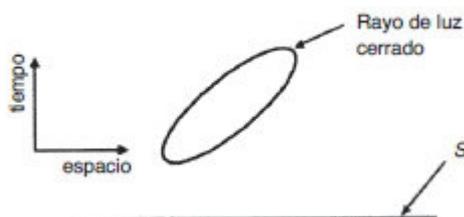
Horizontes de Cauchy finitamente generados



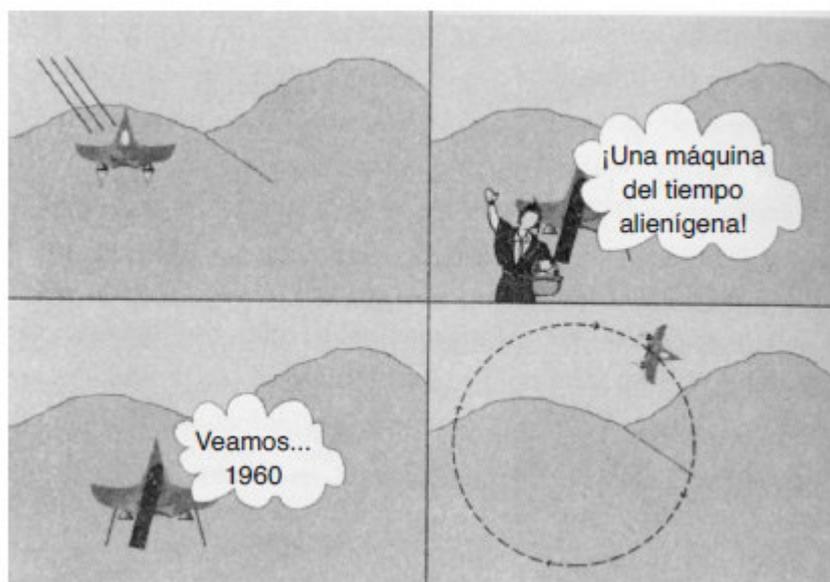
Por consiguiente, tomaré como criterio para una máquina del tiempo lo que llamo un «horizonte de Cauchy finitamente generado». Éste es un horizonte de Cauchy generado por todos los rayos de luz que emergen de una región compacta. En otras palabras, no proceden del infinito ni de una singularidad, sino de una región finita que contiene curvas cerradas de género tiempo, el tipo de región que se supone que crea nuestra civilización avanzada.

Adoptar esta definición como la marca de una máquina del tiempo tiene la ventaja de que se puede utilizar la maquinaria de la estructura causal que Roger Penrose y yo desarrollamos para estudiar singularidades y agujeros negros. Incluso sin utilizar las ecuaciones de Einstein, yo puedo demostrar que, en general, un horizonte de Cauchy finitamente generado contendría un rayo de luz cerrado, un rayo de luz que continúa volviendo al mismo punto una y otra vez.

Rayo de luz cerrado



¡Hablamos de lo *déjà vu*! Además, cada vez que la luz vuelve estará más desplazada hacia el azul, de modo que las imágenes se hacen más y más azules. Los rayos de luz pueden desconcentrarse lo suficiente en cada vuelta para que la energía de la luz no se acumule y no se haga infinita. Sin embargo, el desplazamiento hacia el azul significará que una partícula de luz tendrá sólo una historia finita, tal como se define por su propia medida de tiempo, incluso si da vueltas y vueltas en una región finita y no incide en una singularidad de curvatura. No habría que preocuparse de que una partícula de luz completara su historia en un tiempo finito. Pero puedo demostrar también que habría trayectorias que se mueven a velocidades menores que la de la luz y tienen sólo una duración finita. Éstas podrían ser las historias de observadores que estarían atrapados en una región finita antes del horizonte de Cauchy, y darían vueltas y vueltas cada vez más rápidas hasta que alcanzaran la velocidad de la luz en un tiempo finito. Por lo tanto, si una bella alienígena en un platillo volante le invita a su máquina del tiempo, ¡tenga cuidado! Podría caer en una de estas historias repetitivas atrapadas de sólo duración finita.



Como dije, estos resultados no dependen de las ecuaciones de Einstein, sino sólo de la forma en que tendría que distorsionarse el espaciotiempo para producir curvas cerradas de género tiempo en una región finita. Sin embargo, uno puede preguntar ahora: ¿qué tipo de materia tendría que utilizar una civilización avanzada para distorsionar el espaciotiempo tanto como para construir una máquina del tiempo de tamaño finito? ¿Puede esta materia tener densidad de energía positiva en todas partes, como en el espaciotiempo de las cuerdas cósmicas que describí antes? El espaciotiempo de las cuerdas cósmicas no satisfacía mi requisito de que las curvas cerradas de género tiempo aparezcan sólo en una región finita. Sin embargo, uno podría pensar que esto era sólo porque las cuerdas cósmicas que yo utilicé eran infinitamente largas. Cabría imaginar que se pudiera construir una máquina del tiempo finita utilizando lazos finitos de cuerda cósmica, y tener la densidad de energía positiva en todas partes.

Siento disgustar a personas como Kip que quieren volver al pasado, ¡pero eso no puede hacerse con densidad de energía positiva en todas partes! Puedo demostrar que para construir una máquina del tiempo finita, se necesita energía negativa.

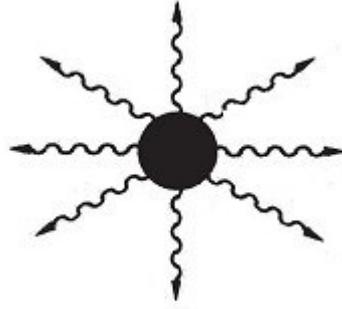
Los tensores energía-momento clásicos de todos los campos físicamente razonables obedecen a la «condición de energía débil», según la cual la densidad de energía en cualquier sistema es mayor que o igual a cero. Así pues, las máquinas del tiempo de tamaño finito están descartadas en la teoría puramente clásica. Sin embargo, la situación es diferente en la teoría semiclásica, en la que uno considera campos cuánticos en un fondo espaciotemporal clásico. El principio de incertidumbre de la teoría cuántica significa que los campos están siempre fluctuando arriba y abajo, incluso en el espacio aparentemente vacío. Estas fluctuaciones cuánticas harían la densidad de energía infinita. Así pues, uno tiene que restar una cantidad infinita para hacer que la teoría tenga la densidad de energía finita que se observa. De lo contrario, la densidad de energía curvaría el espaciotiempo en un único punto. Esta resta puede dejar el «valor esperado» de energía negativa, al menos localmente. Incluso en el espacio plano, uno puede encontrar estados cuánticos en los que el valor esperado de la densidad de energía es localmente negativo, aunque la energía total integrada sea positiva.

Condición de energía débil

La densidad de energía es mayor que o igual a cero para todos los observadores.

Uno podría preguntarse si estos valores esperados negativos causan realmente que el espaciotiempo se distorsione de la forma apropiada, la forma que podría conducir a máquinas del tiempo. Pero parece que deben hacerlo. Inmediatamente antes de que yo visitara Caltech por primera vez en 1974, descubrí que ¡los agujeros negros no eran tan negros como se les pinta!

Los agujeros negros no son negros



El principio de incertidumbre de la teoría cuántica permite que partículas y radiación escapen de un agujero negro. Esto hace que el agujero negro pierda masa y se evapore lentamente. Para que el horizonte del agujero negro se contraiga en tamaño, la densidad de energía en el horizonte debe ser negativa, distorsionando el espaciotiempo para hacer que los rayos de luz diverjan unos de otros. Si la densidad de energía fuera siempre positiva, y el espaciotiempo distorsionado juntara siempre los rayos luminosos, entonces el área del horizonte de un agujero negro sólo podría aumentar con el tiempo. Tuve esta idea por primera vez cuando iba a meterme en la cama, poco después del nacimiento de mi hija. No quiero decir hace cuánto fue eso, pero ahora tengo un nieto.



La evaporación de los agujeros negros muestra que el tensor energía-momento cuántico de materia puede a veces distorsionar el espaciotiempo en la dirección que sería necesaria para construir una máquina del tiempo. Cabría imaginar por lo tanto que alguna civilización muy avanzada se las pudiera arreglar para que el valor esperado de la densidad de energía fuera suficientemente negativo para formar una máquina del tiempo que pudiera ser utilizada por objetos macroscópicos. Sin embargo, hay una diferencia importante entre un horizonte de agujero negro y el horizonte en una máquina del tiempo, que contiene rayos de luz cerrados que siguen dando vueltas y vueltas. El tensor energía-momento de un campo cuántico en un fondo espacial curvo puede determinarse a partir de lo que se denomina la «función de dos puntos».

Función de dos puntos

$\langle \varphi(x) \varphi(y) \rangle$ es infinita cuando
 $x=y$ o

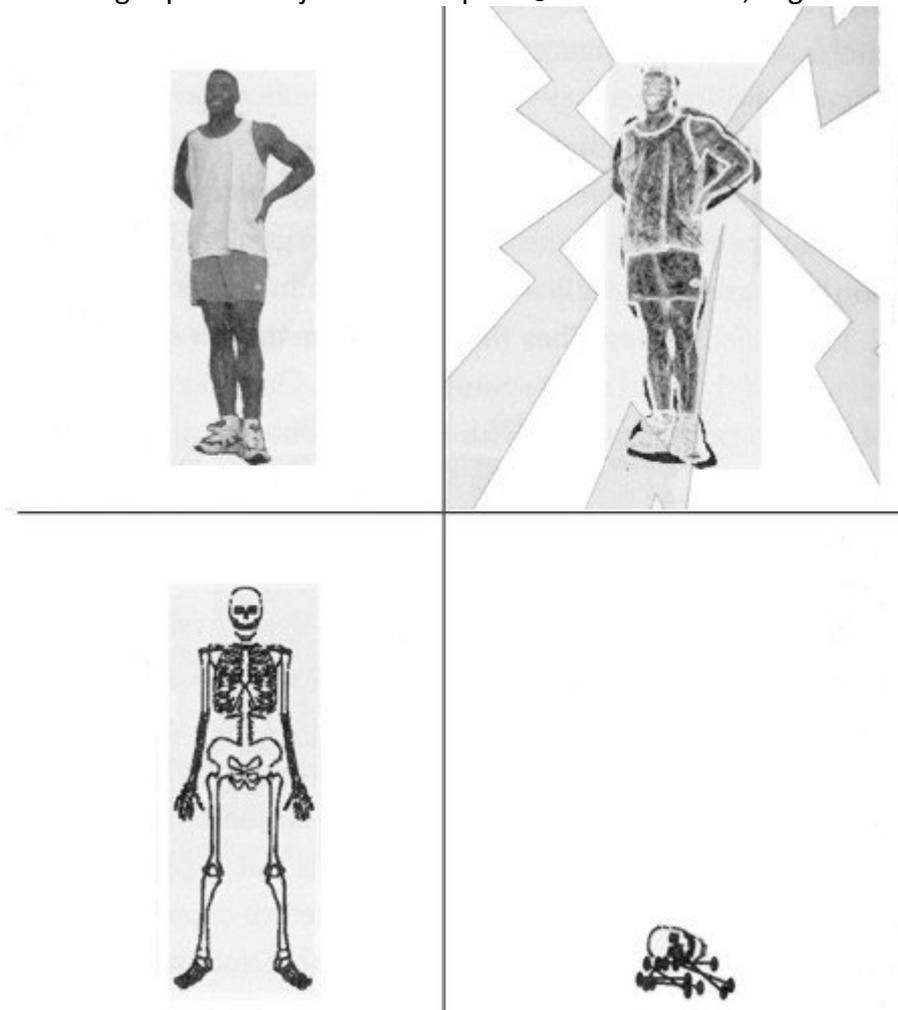
x e y yacen en el mismo rayo de luz

Esta función describe las correlaciones en las fluctuaciones cuánticas del campo en dos puntos, x e y . Uno toma la variación de la función de dos puntos con las posiciones de x e y ,

entonces hace que x tienda a y . La función de dos puntos diverge cuando x se aproxima a y , pero uno resta las divergencias que ocurrirían en el espacio plano y las que están caracterizadas por la curvatura local en y . En espaciotiempos curvos sin rayos de luz cerrados, este procedimiento de sustracción hace finito el tensor de energía-momento, aunque posiblemente negativo, como dije antes.

Sin embargo, la función de dos puntos es también infinita si x e y pueden unirse por un rayo de luz. Así, si existe un rayo de luz cerrado o casi-cerrado, uno tiene un infinito extra que no es sustraído por los términos opuestos locales. Uno esperaría por lo tanto que el tensor energía-momento sea infinito en el horizonte de Cauchy, la frontera de la máquina del tiempo, la región en la que uno puede viajar al pasado. Esto fue confirmado por cálculos explícitos en el caso de algunos fondos suficientemente sencillos para que la función de dos puntos sea conocida exactamente. En general, el tensor energía-momento diverge en el horizonte de Cauchy. En la práctica esto significaría que una persona o una sonda espacial que tratara de cruzar el horizonte de Cauchy para entrar en la máquina del tiempo ¡sería aniquilada por un estallido de radiación!

¿Es ésta una advertencia de la naturaleza para que no nos mezclemos con el pasado? En 1990, Kip y Sung-Won Kim sugirieron que la divergencia en el tensor energía-momento en el horizonte podría evitarse gracias a efectos gravitatorios cuánticos. Argumentaban que esto podría suceder antes de que el tensor energía-momento se hiciese suficientemente grande para que alguien lo advirtiese. Aún no sabemos si la gravedad cuántica proporciona un corte efectivo o no, pero incluso si lo hace, pienso que Kip estaría ahora de acuerdo con que el corte no tendría efecto a tiempo para salvar a cualquier sonda espacial de ser destrozada. De modo que el futuro se ve negro para el viaje en el tiempo —¿o debería decir, cegadoramente blanco?

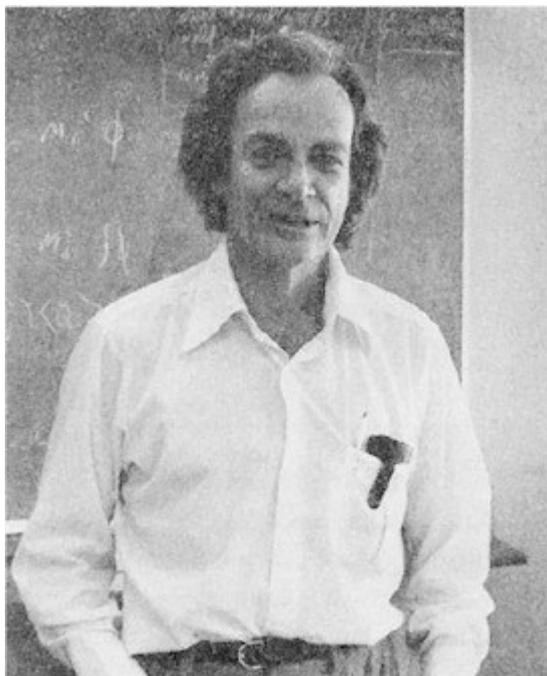


Sin embargo, el valor esperado del tensor energía-momento depende del estado cuántico de los campos de fondo. Cabría especular que podría haber estados cuánticos en donde la densidad de energía fuera finita en el horizonte, y hay ejemplos en que es así. No sabemos cómo conseguir un tal estado cuántico, o si sería o no estable frente a los objetos que cruzan el horizonte. Pero podría estar dentro de las capacidades de una civilización avanzada. El que esto sea o no posible es una cuestión que los físicos deberían poder discutir libremente, sin ser motivo de escarnio.

Incluso si resulta que el viaje
en el tiempo es imposible,
es importante que entendamos
por qué es imposible

Para dar respuestas definitivas sobre los estados cuánticos en el horizonte necesitamos considerar fluctuaciones cuánticas de la métrica espaciotemporal así como de los campos de materia. Uno podría esperar que estas fluctuaciones provoquen cierta borrosidad en el cono de luz, y en el concepto global de ordenación temporal. En realidad, uno puede considerar que la radiación de los agujeros negros se está fugando porque las fluctuaciones cuánticas de la métrica significan que el horizonte no está exactamente definido. Puesto que aún no tenemos una teoría completa de la gravedad cuántica es difícil decir cuáles serán los efectos de las fluctuaciones de la métrica. En cualquier caso, podemos confiar en obtener algunos indicadores a partir del enfoque de otro físico de Caltech, Richard Feynman.

Aparte de tocar los bongós, la gran contribución de Feynman a la humanidad fue su idea de que un sistema no tiene sólo una única historia, como nos diría el sentido común. Más bien tiene todas las historias posibles, cada una con su propia amplitud de probabilidad. Debe haber una historia en la que el equipo de fútbol americano de Caltech gane la Rose Bowl, ¡aunque quizá la probabilidad sea baja!



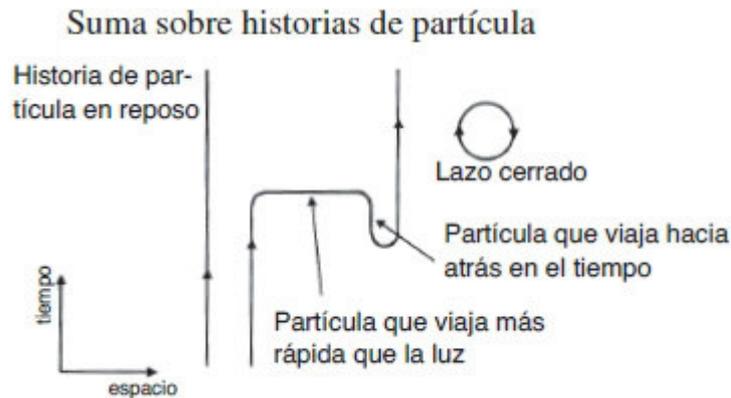
Richard Feynman delante de la pizarra. [Cortesía del California Institute of Technology, Melanie Jackson Agency].

En el caso en que el sistema es el universo entero, cada historia será un espaciotiempo curvo con campos de materia en él. Puesto que se supone que uno suma sobre todas las historias posibles, y no sólo sobre aquellas que satisfacen ciertas ecuaciones de movimiento, la suma debe incluir espaciotiempos que están suficientemente distorsionados para viajar al pasado. De modo que la pregunta es, ¿por qué no está sucediendo el viaje en el tiempo en todas partes? La respuesta es que el viaje en el tiempo está teniendo lugar en una escala microscópica, pero

nosotros no lo advertimos.



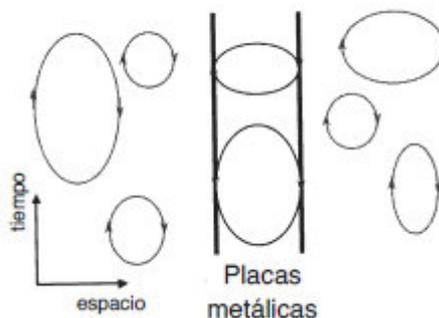
Si uno aplica la idea de Feynman de suma-sobre-historias a una partícula que se mueve en un espaciotiempo de fondo, tiene que incluir historias en las que la partícula viaja más rápida que la luz, e incluso hacia atrás en el tiempo. En particular, habrá historias en las que la partícula da vueltas y vueltas en un lazo cerrado en el tiempo y el espacio. Sería como en el film *Ground Hog Day (Atrapado en el tiempo)*, en el que un reportero tiene que vivir el mismo día una y otra vez.



Uno no puede observar directamente partículas con semejantes historias de lazo cerrado con un detector de partículas. Sin embargo, sus efectos indirectos han sido medidos en varios experimentos. Uno de ellos es un pequeño cambio en la luz emitida por átomos de hidrógeno, causado por electrones que se mueven en lazos cerrados. Otro es el efecto Casimir, una pequeña fuerza entre placas metálicas paralelas debida al hecho de que el número de historias de lazo cerrado que pueden encajar entre las placas es ligeramente menor que el de historias en la región exterior.

¡Así pues la existencia de historias de lazo cerrado está confirmada por el experimento!

Efecto Casimir



Se podría discutir si estas historias de partícula de lazo cerrado tienen algo que ver con la distorsión del espaciotiempo, porque ocurren incluso en fondos fijos tales como el espacio plano. Pero en años recientes hemos encontrado que hay fenómenos en física que a menudo tienen descripciones duales e igualmente válidas. Pienso que se puede decir igualmente que

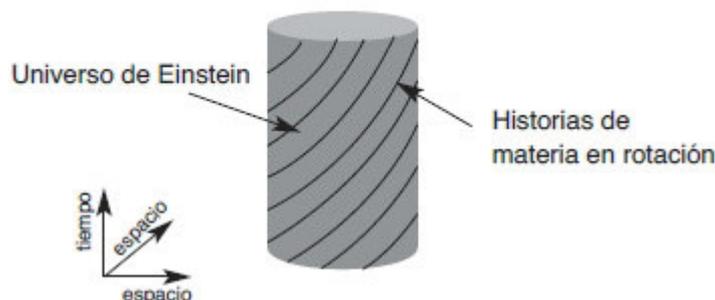
una partícula se mueve en un lazo cerrado en un fondo fijo dado, o que la partícula permanece fija y el espacio y el tiempo fluctúan a su alrededor. Es simplemente una cuestión de si se hace primero la suma sobre trayectorias de partículas y luego la suma sobre espaciotiempos curvados, o viceversa.

Parece, por consiguiente, que la teoría cuántica permite el viaje en el tiempo en una escala microscópica. Sin embargo, esto no es de mucha utilidad para fines de ciencia ficción, como volver y matar al abuelo de uno. Por consiguiente, la pregunta es, ¿puede la probabilidad en la suma sobre historias tener un máximo cerca de espaciotiempos con curvas macroscópicas cerradas de género tiempo?

Podemos investigar esta cuestión estudiando la suma sobre historias de campos de materia en una serie de espaciotiempos de fondo que están cada vez más cerca de admitir curvas cerradas de género tiempo. Uno esperaría que algo espectacular suceda cuando aparecen por primera vez curvas cerradas de género tiempo, y esto está confirmado en un ejemplo sencillo que yo estudié con mi alumno Mike Cassidy.^[8] Los espaciotiempos de fondo en la serie estaban estrechamente relacionados con lo que se denomina el universo de Einstein. Éste es un espaciotiempo estático, en el que el tiempo corre desde el infinito pasado hasta el infinito futuro. Las direcciones espaciales, sin embargo, son finitas y se cierran sobre sí mismas, como la superficie de la Tierra, pero en las tres dimensiones. Así pues, el espaciotiempo es como un cilindro, cuyo eje longitudinal representa la dirección temporal y cuya sección transversal representa las tres direcciones espaciales. Puesto que no se está expandiendo, el universo de Einstein no representa al universo en el que vivimos. En cualquier caso es un fondo conveniente para discutir el viaje en el tiempo, porque es suficientemente sencillo para que uno pueda hacer la suma sobre historias.

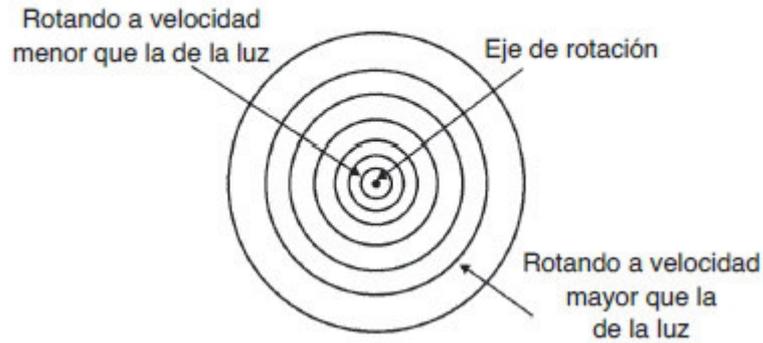
Universo de Einstein en rotación

Cassidy y SWH, *Phys. Rev.*, D57 (1998), pp. 2.372-2.380



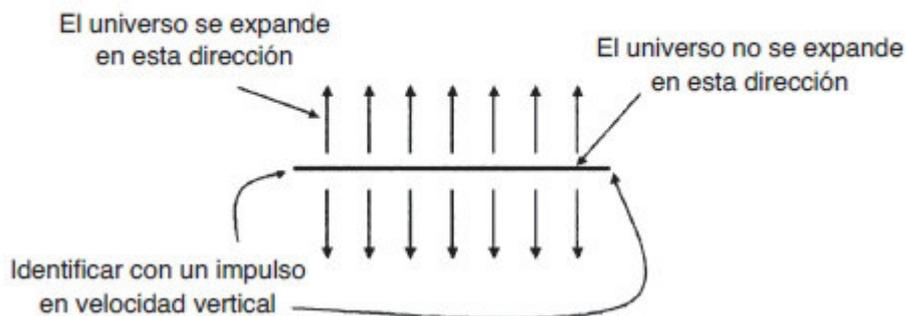
Olvidando por un momento el viaje en el tiempo, uno puede considerar campos cuánticos a temperatura finita en un universo de Einstein que esté rotando alrededor de cierto eje. Si uno estuviera en el eje, podría permanecer en el mismo punto del espacio. Pero si uno no estuviera en el eje, se estaría moviendo a través del espacio cuando rota alrededor de aquél. Si el universo fuera infinito en el espacio, puntos suficientemente alejados del eje tendrían que estar rotando más rápidos que la luz. Sin embargo, puesto que el universo de Einstein es finito en las direcciones espaciales, hay un ritmo crítico de rotación por debajo del cual ninguna parte del universo está rotando más rápido que la luz.

Rotando en el espacio plano



Uno puede ahora considerar la suma sobre historias de partícula en un universo de Einstein en rotación. Cuando la rotación es lenta, la partícula puede tener muchas trayectorias, cada una de ellas con una cantidad dada de energía de la partícula. Así pues, muchas trayectorias pueden contribuir a la suma sobre todas las historias de partícula. Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad de rotación del universo de Einstein, la suma sobre historias de partícula tendrá un máximo pronunciado alrededor de la única trayectoria de partícula que está clásicamente permitida, a saber, una que se está moviendo a la velocidad de la luz. Esto significa que la suma neta sobre historias de partícula será pequeña. Así pues, la probabilidad de estos fondos será relativamente baja en la suma sobre todas las historias en el espaciotiempo curvo.

Fondos con curvas cerradas de género tiempo



¿Qué tienen que ver los universos de Einstein en rotación con el viaje en el tiempo y las curvas cerradas de género tiempo? La respuesta es que son matemáticamente equivalentes a otros fondos que admiten curvas cerradas de género tiempo. Estos otros fondos son universos que se están expandiendo en dos direcciones espaciales pero no en la tercera dirección espacial, que es periódica. Es decir, si uno camina una cierta distancia en esta dirección, uno vuelve a donde partió. Sin embargo, cada vez que uno completa una vuelta de la tercera dirección espacial, la velocidad en la primera o la segunda dirección recibe un impulso.

Si el impulso es pequeño, entonces no hay curvas cerradas de género tiempo. Sin embargo, uno podría considerar una secuencia de fondos con impulsos crecientes. Para cierto impulso crítico, aparecerían curvas cerradas de género tiempo. No es sorprendente que este impulso crítico corresponda a la velocidad de rotación crítica del universo de Einstein equivalente. Puesto que los cálculos de sumas-sobre-historias en estos fondos son matemáticamente equivalentes, uno puede concluir que la probabilidad de estos fondos tiende a cero conforme se acercan a la distorsión necesaria para que haya curvas cerradas de género tiempo. Esto apoya la «conjetura de protección de cronología», según la cual las leyes de la física conspiran para impedir el viaje en el tiempo de objetos macroscópicos.

Conjetura de protección de cronología

Las leyes de la física conspiran para impedir el viaje en el tiempo de objetos macroscópicos.

Aunque las curvas cerradas de género tiempo están permitidas por la suma sobre historias, las

probabilidades son extraordinariamente pequeñas. De hecho, basado en los argumentos de dualidad que mencioné antes, yo estimo que la probabilidad de que Kip pudiera volver y matar a su abuelo es menor que 1 frente a 10 con un billón de billones de billones de billones de billones de ceros tras él. Ésta es una probabilidad bastante pequeña, pero si ustedes miran de cerca a Kip, ¡quizá vean que su perfil está ligeramente difuminado! Esto corresponde a la difusa posibilidad de que algún bastardo del futuro vuelva y mate a su abuelo, ¡de modo que él no está realmente allí!

Probabilidad de que Kip pudiera volver
y matar a su abuelo
Menor que
1 frente a 10
con un
billón de billones de billones de billones de billones
de ceros
tras él.



Como jugadores, Kip y yo apostaríamos sobre estas cosas. El problema es que no podemos apostar uno contra otro, porque ambos estamos ahora en el mismo lado. Por otra parte, yo no apostaría con ningún otro. ¡Podría venir del futuro y saber que el viaje en el tiempo funciona!

3

Las distorsiones del espaciotiempo y el mundo cuántico: especulaciones sobre el futuro

KIP S. THORNE

Acabo de pasar una celebración de cumpleaños abrumadora. Mi amigo Jim Hartle me dice que hay dos peligros en tales celebraciones. El primero es que tus amigos te avergüencen exagerando tus méritos. El segundo es que no exageren. Afortunadamente, mis amigos exageraron.

En la medida en que hay semillas de verdad en sus exageraciones, muchas de éstas fueron sembradas por John Wheeler. John fue mi mentor en la escritura, la dirección y la investigación. Él empezó siendo mi director de tesis doctoral en la Universidad de Princeton hace casi cuarenta años y luego se convirtió en un amigo íntimo, un colaborador en dos libros y una perenne fuente de inspiración. La celebración de mi sexagésimo cumpleaños me recuerda mucho a nuestra celebración de los sesenta años de Johnnie, hace treinta años.

Cuando recapacito sobre mis cuatro décadas de vida dedicadas a la física, me sorprenden los enormes cambios en nuestra comprensión del universo. ¿Qué otros descubrimientos nos depararán las cuatro próximas décadas? Hoy especularé sobre algunos de los grandes descubrimientos en aquellos campos de la física en los que yo he trabajado. Mis predicciones quizá parezcan estúpidas cuando se vean en perspectiva dentro de cuarenta años. Pero nunca me ha importado parecer estúpido, y las predicciones pueden estimular la investigación. ¡Imaginen a montones de jóvenes proponiéndose demostrar que estoy equivocado!

Empezaré recordándoles las ideas fundamentales de los campos en los que he trabajado. Trabajo, en parte, en la teoría de la relatividad general. La relatividad fue la primera revolución del siglo xx en nuestra comprensión de las leyes que gobiernan el universo, las leyes de la física. Esa primera revolución nos fue traída por Albert Einstein en dos pasos: la relatividad especial en 1905 y la relatividad general en 1915, con una lucha de diez años entre medias, muy similar a la lucha intelectual que Alan Lightman describe en este volumen.



FIGURA 1. Albert Einstein a los 26 años, cuando estaba formulando la relatividad especial —el primer paso en la primera revolución del siglo xx en nuestra comprensión de las leyes de la naturaleza. [Cortesía de los Albert Einstein Archives de la Universidad Hebrea de Jerusalén, Israel].

Al final de su lucha, Einstein concluyó que el espacio y el tiempo están distorsionados por la

materia y la energía, y que esta distorsión es responsable de la gravedad que nos mantiene en la superficie de la Tierra. Nos dio un conjunto de ecuaciones a partir de las cuales se puede deducir la distorsión del tiempo y el espacio alrededor de los objetos cósmicos que pueblan nuestro universo. En los ochenta y cinco años transcurridos desde entonces, miles de físicos han luchado con las ecuaciones de Einstein tratando de extraer sus predicciones sobre la distorsión espaciotemporal.

En mi libro *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* narro la historia de esa lucha, incluyendo el descubrimiento más interesante al que dio lugar: la predicción de los agujeros negros. Robert Oppenheimer, a caballo entre la Universidad de California en Berkeley y Caltech a finales de la década de 1930, hizo la primera y provisional forma de la predicción, pero fueron necesarios los esfuerzos concertados de otros centenares de físicos, en los años cincuenta, sesenta y setenta, para revelar los detalles completos de lo que es un agujero negro y cómo debería comportarse. Mi mentor, John Wheeler, fue el pionero moderno de los agujeros negros, y mi amigo Stephen Hawking, el más reciente profeta.

Un agujero negro es lo definitivo en distorsión espaciotemporal, según las ecuaciones de Einstein: está hecho única y exclusivamente a partir de dicha distorsión. Su enorme distorsión está causada por una enorme cantidad de energía altamente compactada: energía que reside no en la materia, sino en la propia distorsión. La distorsión genera distorsión sin la ayuda de materia. Ésta es la esencia de un agujero negro.

Si yo tuviera un agujero negro del tamaño de la calabaza más grande del mundo, de unos 10 metros de circunferencia, entonces sabiendo las leyes de la geometría de Euclides se podría esperar que su diámetro fuera 10 metros dividido por $\pi = 3,14159\dots$, o aproximadamente 3 metros. Pero el diámetro del agujero es mucho mayor que 3 metros, quizá algo más parecido a 300 metros. ¿Cómo puede ser esto? Muy simple: las leyes de Euclides fallan en el espacio altamente distorsionado.

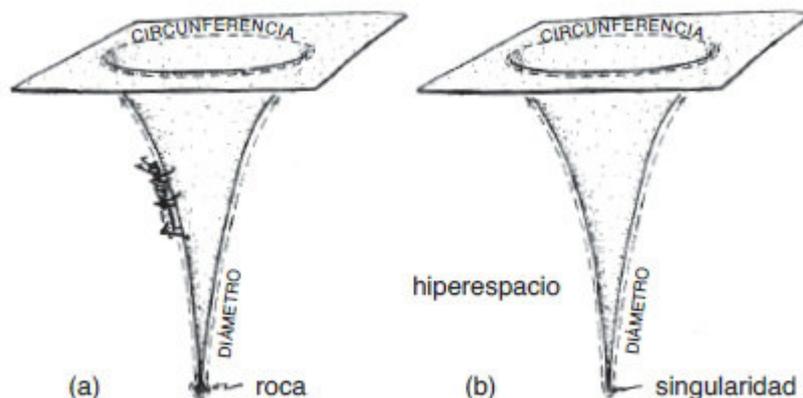


FIGURA 2. (a) Una cama elástica de niño deformada por una roca pesada que está siendo explorada por una hormiga inteligente. (b) El espacio deformado de un agujero negro visto por un hiperser que vive en el hiperespacio.

Consideremos una analogía sencilla. Tomemos una lámina elástica: la cama elástica de un niño. Extendámosla entre las puntas de cuatro postes altos, y luego coloquemos una roca pesada en su centro. La roca combará la lámina elástica hacia abajo como se muestra en la figura 2a. Supongamos ahora que ustedes son hormigas que viven en la lámina elástica. La lámina es su universo entero. No sólo son ustedes hormigas sino que son hormigas ciegas, de modo que no pueden ver con los ojos los postes ni la roca que distorsiona la lámina. Pero siendo hormigas inteligentes e inquisitivas, se proponen explorar su universo. Recorren el límite circular del hoyo formado en la lámina, trazando su circunferencia: 30 metros, concluyen. Siendo instruidos en las matemáticas de Euclides, ustedes predicen un diámetro de unos 10 metros, pero siendo también escépticos acerca de cualquier pronóstico, deciden medir el diámetro. Caminan hacia el centro; caminan y caminan y caminan, y finalmente salen ustedes al otro lado después de

300 metros de viaje, no los 10 metros predichos por Euclides. «El espacio de mi universo está distorsionado», concluyen: fuertemente distorsionado.

Esta historia es una descripción bastante precisa de un agujero negro. Podemos considerar que el espacio tridimensional dentro y alrededor de un agujero negro está distorsionado dentro de un espacio plano de dimensión más alta (a menudo llamado «hiperespacio»), igual que la lámina elástica bidimensional está distorsionada como se describe en la figura 2a. Si yo fuera un «hiperser» de dimensiones más altas que vive en el hiperespacio vería que el espacio del agujero negro tiene una forma muy parecida a la de la lámina elástica (véase la fig. 2b).

Lo más intrigante de los agujeros negros es que, si caigo en uno, no tengo forma de salir ni enviar señales a ustedes que me esperan fuera. Esto se ilustra en la figura 3a con un Kip bidimensional que cae en un agujero negro tal como lo ve un hiperser en el hiperespacio. (He suprimido una de las tres dimensiones de nuestro universo para hacer comprensible la imagen). Mientras caigo dentro llevo conmigo una antena de microondas que les transmite señales a ustedes, diciendo lo que veo.

Ahora bien, no sólo está distorsionado el espacio por el que yo me muevo, sino que también lo está el tiempo según las ecuaciones de Einstein: el flujo del tiempo se frena cerca del agujero, y en un punto de no retorno (llamado el «horizonte» del agujero, o límite), el tiempo está tan fuertemente distorsionado que empieza a fluir en una dirección que normalmente sería espacial; el flujo de tiempo futuro está dirigido hacia el centro del agujero. Nada puede moverse hacia atrás en el tiempo,^[9] insisten las ecuaciones de Einstein; de modo que una vez dentro del agujero, yo y mis señales de microondas somos arrastrados irremisiblemente hacia abajo con el flujo del tiempo, hacia una «singularidad» escondida en el corazón del agujero. Ustedes, que esperan fuera, nunca podrán recibir mis señales desde detrás del horizonte. Éstas quedan atrapadas por el flujo del tiempo y aisladas de ustedes. Yo he pagado el precio final por explorar el interior del agujero: no puedo publicar mis descubrimientos.

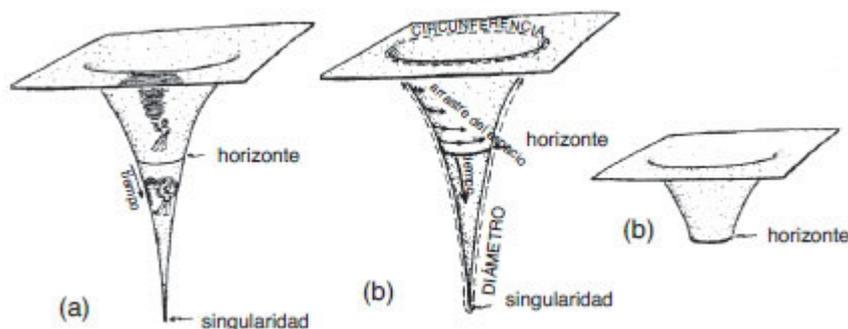


FIGURA 3. (a) Kip cayendo en un agujero negro y tratando de transmitir señales de microondas a quienes están en el exterior. (b) La distorsión del espacio y el tiempo, y el arrastre del espacio en un movimiento tipo tornado alrededor de un agujero negro en rotación. (c) La distorsión del espacio fuera del horizonte. El diagrama sirve como plantilla para varias de las figuras que siguen.

Además de la curvatura del espacio y el frenado y ralentización del flujo del tiempo, hay un tercer aspecto en la distorsión espaciotemporal de un agujero negro: un torbellino similar a un tornado de espacio y tiempo que da vueltas y vueltas alrededor del horizonte del agujero (figura 3b). Así como el torbellino es muy lento lejos del corazón de un tornado, también el torbellino de espaciotiempo es muy lento lejos del horizonte del agujero. Más cerca del núcleo o del horizonte, el torbellino es más rápido. Y próximo al horizonte, el torbellino de espaciotiempo es tan rápido e intenso que arrastra a *todos* los objetos que ahí se aventuran en un movimiento orbital arremolinado. Por muy potentes que puedan ser los motores de una nave espacial, una vez que cruce el horizonte no podrá resistir al torbellino. El flujo hacia adelante del tiempo la arrastra inexorablemente a dar vueltas y vueltas —y una vez dentro del horizonte, también es arrastrada hacia abajo por el flujo de avance del tiempo, hacia la profunda singularidad en el corazón del agujero.

El torbellino de espaciotiempo alrededor de un agujero negro fue descubierto en 1963, enterrado en las matemáticas de las ecuaciones de Einstein, por Roy Kerr, un físico matemático de Christchurch, Nueva Zelanda. De la misma forma que la curvatura del espacio y la distorsión del tiempo están producidas por la enorme energía del agujero (la energía de las propias curvatura y distorsión), también el remolino de espaciotiempo está producido por el enorme momento angular de rotación del agujero (un momento angular que reside en el propio remolino espaciotemporal). La energía y el momento angular de la distorsión crean la distorsión, según las ecuaciones de Einstein. La distorsión genera distorsión.

Puesto que no podemos ver el interior de un agujero negro desde el exterior, ignoraré su interior por un momento. Cortaré mis imágenes de agujeros por el horizonte y sólo mostraré los exteriores de los agujeros, como en la figura 3c.

Los físicos relativistas nos hemos sentido terriblemente frustrados durante el último cuarto del siglo xx. En 1975 habíamos descubierto estas predicciones de agujero negro en las ecuaciones de Einstein y nos dirigíamos hacia los astrónomos para su confirmación o refutación observacional. Pero a partir de entonces, pese a su enorme esfuerzo, los astrónomos no han podido obtener medidas cuantitativas de ninguna distorsión espaciotemporal de agujero negro. Sus grandes triunfos han consistido en varios descubrimientos casi incontrovertibles de agujeros negros en el universo, pero han sido incapaces de cartografiar, ni siquiera de forma cruda, la distorsión espaciotemporal alrededor de cualquiera de los agujeros descubiertos.

Sentados estos fundamentos, estoy listo para empezar a pronosticar. Empezaré con una predicción en la que tengo gran confianza.

Predicción 1: Entre 2010 y 2015, un detector de ondas gravitatorias en vuelo espacial llamado LISA (Laser Interferometer Space Antenna) revelará la distorsión del espaciotiempo alrededor de muchos agujeros negros masivos en el universo lejano, y cartografiará dicha distorsión con exquisito detalle —los tres aspectos de la distorsión: la curvatura del espacio, la distorsión del tiempo y el torbellino del espaciotiempo alrededor del horizonte.

Estos mapas de agujeros negros, cada uno de ellos una imagen del aspecto que tendría el agujero visto por un hiperser en el hiperespacio, completarán la transformación de los agujeros negros de entidades puramente teóricas en objetos susceptibles de exploración observacional.

Las figuras 4 y 5 muestran el fundamento de los mapas de LISA. Supongamos que un agujero negro pequeño está en órbita alrededor de un agujero negro mucho más grande en el universo lejano (figura 4a). El agujero pequeño podría pesar tanto como diez veces el Sol y tener una circunferencia de unos 180 kilómetros (el tamaño de San Francisco). El agujero grande podría pesar el equivalente a un millón de soles y tener una circunferencia de unos 18 millones de kilómetros (cuatro veces mayor que el Sol). El agujero pequeño volaría alrededor del agujero grande a una velocidad aproximadamente igual a la mitad de la de la luz, en una órbita sólo unas pocas veces mayor que el horizonte del agujero grande.

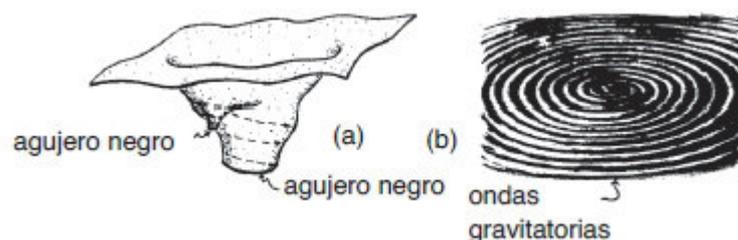


FIGURA 4. (a) Un agujero negro pequeño en órbita en torno a un agujero negro grande. (b) Las ondas gravitatorias producidas por el movimiento orbital del agujero pequeño.

El agujero pequeño describe su órbita una y otra vez alrededor del agujero grande, como cuando ustedes remueven con su dedo una y otra vez el agua de un estanque. De la misma forma que su dedo crea rizos en la superficie del agua, que fluyen hacia afuera a través del estanque llevando información sobre el movimiento de su dedo, también la distorsión

espaciotemporal del agujero pequeño y a gran velocidad crea rizos de curvatura en el tejido del espaciotiempo alrededor del agujero grande. En cada vuelta completa alrededor del agujero negro, el agujero pequeño produce dos oscilaciones completas de rizos salientes: dos crestas y dos vientres. Los rizos, llamados «ondas gravitatorias» (véase la fig. 4b), se propagan hacia el universo a la misma velocidad que la luz. Hace unos pocos años, Fintan Ryan, un estudiante de doctorado al que yo dirigía, demostró que estas ondas llevan codificadas en sus «formas de onda» un mapa detallado de la distorsión espaciotemporal del agujero grande, que está siendo explorado por el agujero pequeño mientras describe sus órbitas.

Estas ondas gravitatorias cruzan los vastos confines del espacio intergaláctico, miles de millones de años-luz. Finalmente llegan a nuestra Vía Láctea y entran en ella, y luego en nuestro sistema solar, donde sacuden a LISA (véase la fig. 5). LISA está diseñado para detectar los rizos de las ondas cuando pasan y registrar todas sus batallas. A partir de estos detalles esperamos descifrar el mapa que llevan las ondas: el mapa de los tres aspectos de la distorsión del agujero grande.

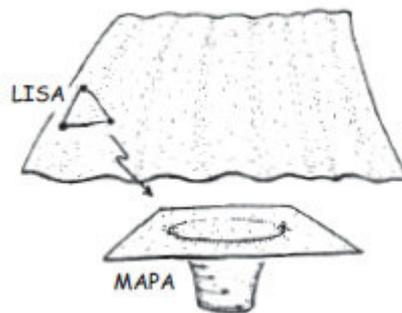


FIGURA 5. Después de atravesar los vastos confines del espacio intergaláctico, las ondas gravitatorias sacuden a LISA. LISA observa y registra las formas de onda de las ondas, y a partir de las formas de onda registradas extraemos un mapa de la distorsión espaciotemporal del agujero negro grande.

El principio en el que se basa LISA se muestra en la figura 6. Dos naves espaciales, que flotan en el espacio interplanetario, son análogas a dos corchos que flotan en la superficie de un estanque. Cuando pasan las ondas de agua, sus crestas y vientres dilatan y comprimen la distancia entre los corchos. El movimiento relativo de los corchos puede detectarse con gran precisión utilizando la misma técnica que utilizan los topógrafos: el viaje de ida y vuelta de un rayo láser.

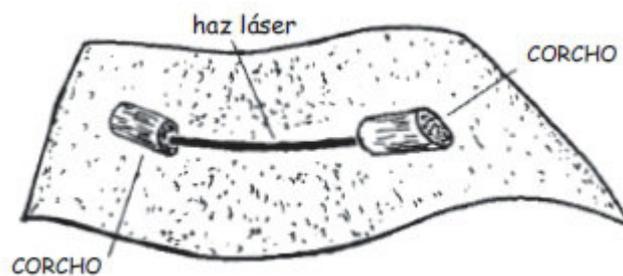


FIGURA 6. Del mismo modo que las ondas de agua en un estanque pueden ser observadas utilizando un rayo láser para medir la distancia entre dos corchos flotantes, también LISA detectará las ondas gravitatorias utilizando un rayo láser para medir la distancia entre naves espaciales.

Análogamente, las ondas gravitatorias dilatan y comprimen el espacio cuando pasan, haciendo que las naves espaciales de LISA se muevan hacia atrás y hacia adelante una con respecto a la otra, y dicho movimiento relativo es detectado por rayos láser. Cuanto mayor es la separación L entre las naves espaciales, mayores serán las minúsculas oscilaciones, ΔL , en su separación. El radio de oscilación $\Delta L/L$ es igual al campo de la onda gravitatoria oscilante. El patrón de las oscilaciones en función del tiempo t , $\Delta L(t)/L$, es la forma de onda gravitatoria del campo. Esta forma de onda es análoga a los patrones que producen las ondas sonoras cuando se muestran

en un osciloscopio, y lleva el mapa del agujero negro grande.

La figura 7 muestra cómo está codificado un aspecto de dicho mapa —el torbellino tipo tornado del espacio alrededor del agujero grande— en la forma de onda. El torbellino espacial arrastra con él la órbita del agujero pequeño, provocando la precesión de la órbita. Tal como se ve desde la Tierra (si pudiéramos verlo a esa distancia con los ojos), la órbita pasa alternativamente de estar de perfil a estar casi frontal. En correspondencia, la amplitud de las oscilaciones de las ondas (dos oscilaciones por circuito orbital) se hace alternativamente más pequeña y más grande, de modo que las ondas están moduladas tal como se muestra en la figura 7(b). Con dos fases de perfil en cada precesión completa, la forma de onda tiene una modulación dos veces más rápida que los torbellinos espaciales.

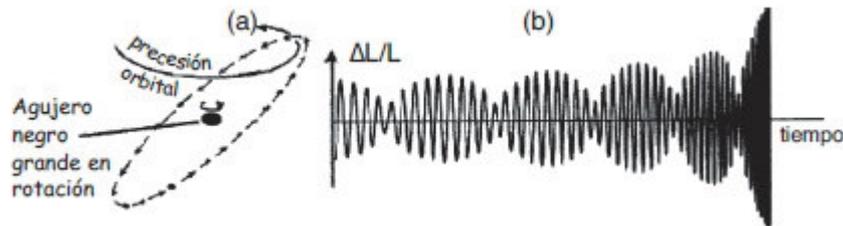


FIGURA 7. (a) El giro del agujero negro grande arrastra al espacio en un movimiento alrededor del mismo, lo que provoca una precesión de la órbita del agujero pequeño. (b) Las ondas gravitatorias procedentes del agujero pequeño en órbita con precesión producen minúsculas oscilaciones en la diferencia ΔL entre las longitudes de los dos brazos de LISA. Esta gráfica muestra $\Delta L/L$ en función del tiempo. Cada recorrido del agujero pequeño alrededor del agujero grande produce dos oscilaciones en ΔL ; la precesión de la órbita causa una modulación de la amplitud y la fase de las oscilaciones.

Supongamos, por simplicidad, que la órbita es circular y sólo está ligeramente inclinada respecto al ecuador del agujero grande, que el agujero pequeño pesa 10 soles, y que el agujero grande gira muy rápidamente^[10] y pesa un millón de soles. Entonces, un año antes de que el agujero pequeño se hunda a través del horizonte del agujero grande, su circunferencia orbital es sólo 3,4 veces mayor que el horizonte y quedan 92 000 órbitas (184 000 ciclos de onda) hasta que se hunda. El período de oscilación de las ondas es de 4,8 minutos, de lo que inferimos un período orbital (medido por relojes con sede en la Tierra) de $2 \times 4,8$ minutos. Y el período de modulación de la forma de onda es de 42 minutos, *de lo que inferimos que en circunferencias de 3,4 horizontes, el período del torbellino espacial es de $2 \times 42 = 84$ minutos.*

Un mes antes de hundirse, la circunferencia orbital es sólo 1,65 veces mayor que el horizonte, el período de oscilación de las ondas es de 1,6 minutos, y quedan 40 000 ciclos de onda hasta que se hunda. El período de modulación de la forma de onda es de 8,6 minutos, *de lo que inferimos un período del torbellino espacial de 17,2 minutos a circunferencias de 1,65 horizontes.*

Un día antes de hundirse, la circunferencia orbital es 1,028 veces mayor que el horizonte, el período de la onda es de 38 segundos y quedan 2000 ciclos de onda. El período de modulación observado es de 43 segundos, *de modo que el período del torbellino espacial a circunferencias de 1,028 horizontes es de 2 minutos.*

De esta manera, a partir del patrón de modulación variable de la forma de onda podemos representar el ritmo del torbellino espacial en función de la posición fuera del horizonte. Con 184 000 ciclos de ondas con los que trabajar en el último año de vida del agujero pequeño, todos ellos procedentes de una región de 5,8 veces el tamaño del horizonte del agujero grande, esperamos conseguir un mapa exquisitamente preciso.

LISA consistirá en tres naves espaciales unidas por haces láser que constituirán los vértices de un triángulo equilátero (figura 8). Mediante una variante de la interferometría láser (un método que se explica más adelante en este ensayo), se controlarán las diferencias en las longitudes de los tres brazos del triángulo, y a partir de las diferencias de las longitudes de dos brazos independientes deduciremos dos formas de onda independientes. Para extraer el mapa

completo y conocer simultáneamente la masa y la rotación del agujero pequeño, los detalles de la órbita, la orientación espacial del agujero grande y la distancia de los agujeros a la Tierra, debemos registrar ambas formas de onda, no sólo una.

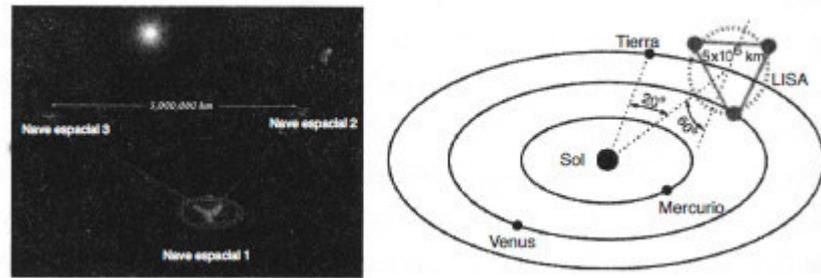


FIGURA 8. (a) LISA consistirá en tres naves espaciales, unidas por láser, que constituyen los vértices de un triángulo equilátero de 8 millones de kilómetros de lado. (b) El tamaño de LISA está aquí exagerado en un factor de aproximadamente 10 con respecto a las órbitas planetarias.

Las distancias L entre las tres naves espaciales de LISA serán de 5 millones de kilómetros (13 veces mayores que la separación Tierra-Luna). Viajarán alrededor del Sol en la misma órbita que la Tierra, pero 20 grados por detrás de la Tierra (50 millones de kilómetros). Después de atravesar las grandes distancias del espacio intergaláctico, las ondas gravitatorias se habrán hecho muy débiles: $\Delta L/L$ será un poco menor que 10^{-21} —una parte en mil millones de billones. En correspondencia, las minúsculas oscilaciones ΔL en las separaciones de las naves espaciales serán de aproximadamente 10^{-10} centímetros, que es una millonésima de la longitud de onda de la luz láser utilizada para registrar las oscilaciones, y una centésima parte del diámetro de un átomo. ¡Nuestra capacidad para medir tales movimientos minúsculos es un tributo a la tecnología moderna!

LISA será construido y operado conjuntamente por la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA) y su lanzamiento está planeado provisionalmente para 2010. Fue concebido (aunque no con este nombre) a mediados de la década de 1970 por varios de mis amigos físicos: Peter Bender de la Universidad de Colorado, Ronald Drever de la Universidad de Glasgow y Rainer Weiss del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Muchos físicos han trabajado duramente durante estos últimos 25 años para perfeccionar el diseño de LISA, para calcular qué tipos de objetos emisores de ondas debería haber y qué ciencia puede extraerse de sus ondas, y para convencer a la NASA y la ESA de que LISA debería lanzarse. Por fin, el año pasado LISA obtuvo el apoyo de los comités de científicos políticamente poderosos y ahora parece estar en una vía rápida hacia la satisfacción de mi primera predicción: mapas exquisitamente precisos de agujeros negros enormes en el período 2010-2015.

Ahora pasaré a mi segunda predicción.

Predicción 2: En algún momento entre 2002 y 2008 (en otras palabras, antes del lanzamiento de LISA en 2010), detectores de ondas gravitatorias situados en la superficie de la Tierra observarán agujeros negros que colisionan y observarán que sus colisiones provocan vibraciones salvajes de la distorsión espaciotemporal. Comparando las ondas observadas con simulaciones realizadas en un supercomputador, descubriremos cómo se comporta la distorsión cuando interacciona de forma dinámica y no-lineal consigo misma.

Cuando las olas se hacen tan altas que interaccionan de forma dinámica y no-lineal consigo mismas, el resultado puede ser la ruptura de la ola, que vuelca y engulle a los surfistas —o puede ser una enorme onda de marea que viaja a través de los océanos a gran velocidad, barre las costas y provoca catástrofes. El análogo comportamiento dinámico no-lineal de la distorsión espaciotemporal es hoy básicamente un misterio. Esperamos descubrirlo mediante una combinación de observaciones de ondas gravitatorias y simulaciones por supercomputador.

El vehículo para nuestro descubrimiento es una colisión entre dos agujeros negros en el universo lejano. Los dos agujeros negros describen inicialmente órbitas uno alrededor del otro

y en una «espiral decreciente» (reduciendo poco a poco el radio orbital) debido a la pérdida de energía en ondas gravitatorias salientes. Los dos agujeros se fusionan entonces en una «colisión» para formar un único agujero negro final. Finalmente, el agujero negro final sufre vibraciones amortiguadas de amplitud decreciente.

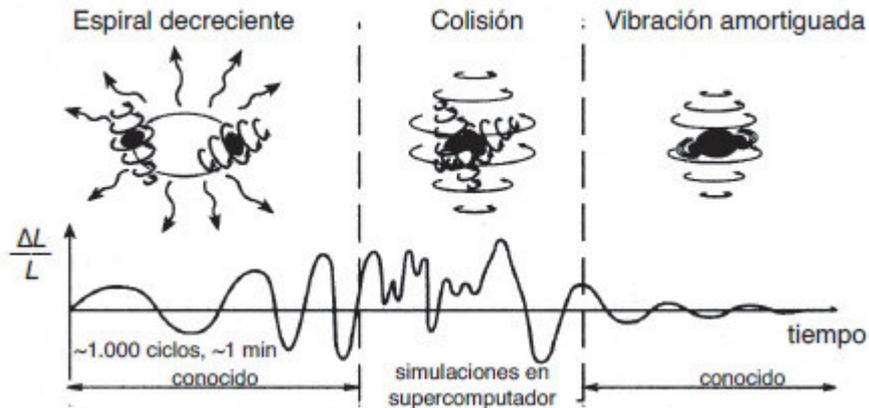


FIGURA 9. *Parte superior:* La caída en espiral y colisión de dos agujeros negros cada uno de ellos en órbita en torno al otro. *Parte inferior:* Una gráfica esquemática de la forma de onda gravitatoria emitida por los agujeros.

Como se muestra en la figura 9, cada agujero es similar a un tornado. Los torbellinos espaciotemporales alrededor de su horizonte se parecen al aire arremolinado alrededor del núcleo de un tornado. A medida que los agujeros describen órbitas uno alrededor del otro, su enorme momento angular orbital también arrastra al espaciotiempo en un movimiento arremolinado, de modo que tenemos dos tornados inmersos en un tercer y mayor tornado, que se aplastan uno contra otro. Queremos saber qué sucede cuando los tornados están hechos no de aire arremolinado, sino de una distorsión espaciotemporal arremolinada. Aprender la respuesta requerirá un ataque en tres frentes: simulaciones por supercomputador, observaciones de ondas gravitatorias y comparación detallada de las simulaciones con las observaciones.

Las simulaciones están siendo realizadas por unos cincuenta científicos en Europa, Estados Unidos y Japón. A estos científicos se les llama «relativistas numéricos» porque están intentando resolver numéricamente, en computadores, las ecuaciones de la relatividad general de Einstein. Yo he apostado con estos relativistas numéricos a que se detectarán ondas gravitatorias procedentes de colisiones de agujeros negros antes de que sus cálculos sean suficientemente sofisticados para simularlas. Espero ganar, pero no me importaría perder, porque los resultados de la simulación son cruciales para interpretar las ondas observadas.

La figura 10 es un ejemplo del estado actual de las simulaciones. Muestro algunas características de una colisión casi frontal de dos agujeros negros de tamaños diferentes y que no están rotando. No sucede nada extraordinario en *esta* colisión como resultado de las no-linealidades dinámicas de la distorsión. Por el contrario, cuando los agujeros están girando rápidamente con direcciones de giro arbitrarias y colisionan tras describir una órbita circular que se contrae (véase la fig. 9), yo espero que haya vibraciones complicadas e incontroladas de la distorsión.

La figura 11 muestra tres de los detectores de ondas gravitatorias basados en tierra que, si mi predicción es correcta, descubrirán las ondas procedentes de colisiones de agujeros negros en algún momento entre 2002 y 2008. Estos tres detectores, dos en una instalación común en Hanford, Washington (véase la fig. 11.a) y uno en Livingston, Luisiana (véase la fig. 11b), constituyen LIGO, el Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory. LIGO forma parte de una red internacional que incluye a un detector franco-italiano llamado VIRGO, en Pisa, Italia; un detector anglo-germano llamado GEO600, en Hannover, Alemania; y un detector japonés llamado TAMA en las afueras de Tokyo.

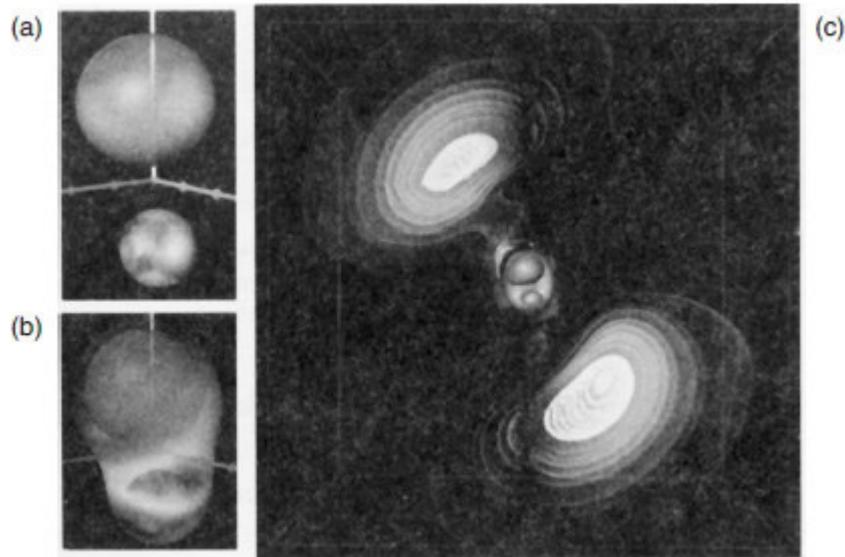


FIGURA 10. Simulación de la colisión oblicua, pero casi frontal, de dos agujeros negros de tamaños diferentes, computada numéricamente en un supercomputador por un grupo del Instituto Albert Einstein de Golm, Alemania, dirigido por Edward Seidel y Berndt Brügmann. (a) Horizontes aparentes (buenas aproximaciones a los horizontes verdaderos) de los dos agujeros inmediatamente antes de la colisión. (b) Horizonte aparente del agujero fusionado inmediatamente después de la colisión, con los horizontes individuales aparentes en su interior. (c) Patrón de onda gravitatoria con lóbulo doble producido por la colisión, con los tres horizontes aparentes en el centro. [Cortesía del Albert Einstein Institute, Max Planck Society].

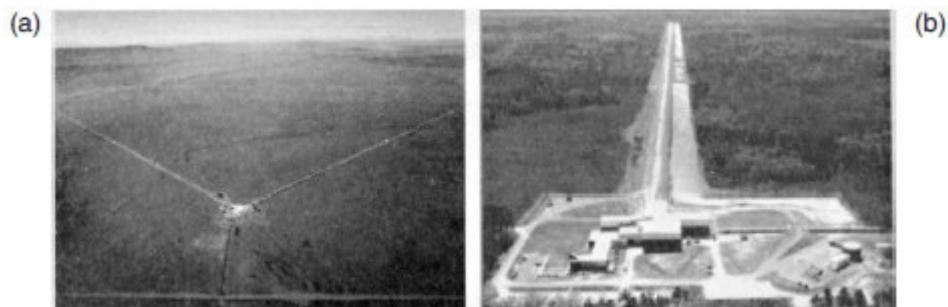


FIGURA 11. Vistas aéreas de los detectores de ondas gravitatorias LIGO en (a) Hanford, Washington, y (b) Livingston, Luisiana. [Cortesía del LIGO Project, California Institute of Technology].

LIGO y sus compañeros son la culminación de cuatro décadas de investigación por parte de centenares de científicos e ingenieros. El propio LIGO empezó en 1983 como el sueño de Rai Weiss en el MIT, y de Ron Drever y yo en Caltech, y se ha hecho una realidad gracias al liderazgo de Weiss del MIT, y Robbie Vogt, Stan Whitcomb y Barry Barish de Caltech, director de LIGO desde el inicio de la construcción en 1994. Barish ha construido LIGO en una colaboración de aproximadamente 350 científicos e ingenieros pertenecientes a aproximadamente 25 instituciones de Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Rusia, Australia, India y Japón. El entusiasmo, dedicación y eficacia de este dotado equipo es una maravilla para contemplar. Cuento con ellos para hacer que mi segunda predicción se haga realidad.

¿Cómo lo harán? ¿Qué tipo de detectores han construido para ver la colisión de agujeros negros? Cada detector de LIGO es similar a LISA. Las tres naves espaciales de LISA, que cabalgan sobre las ondas que pasan como corchos en el agua, están reemplazadas por cuatro espejos cilíndricos colgados mediante cables de soportes superiores (véase la fig. 12), dos en el vértice y uno en cada una de las construcciones terminales de una estructura con forma de L mostrada en la figura 11. Las longitudes de los dos brazos de la L son $L = 4$ kilómetros. Cuando pasan las ondas gravitatorias, oscilando a una frecuencia mucho mayor que la frecuencia de oscilación pendular de los espejos, que es de 1 ciclo por segundo, los espejos cabalgarán como un corcho sobre las ondas a lo largo de direcciones horizontales, aunque los cables les impiden moverse

en dirección vertical sobre las ondas. La dilatación y compresión de las ondas del espacio hace que se agiten los espejos y vibren horizontalmente uno con respecto a otro, de la misma forma que se agitan las naves espaciales de LISA. La agitación es opuesta en los dos brazos del detector (véase la fig. 12), de modo que un brazo se alarga en una cantidad ΔL y el otro se acorta en ΔL . Como en el caso de LISA, la razón variable en el tiempo $\Delta L/L$ es la forma de onda gravitatoria, y se utiliza luz láser para registrar esta forma de onda, tal como sigue.

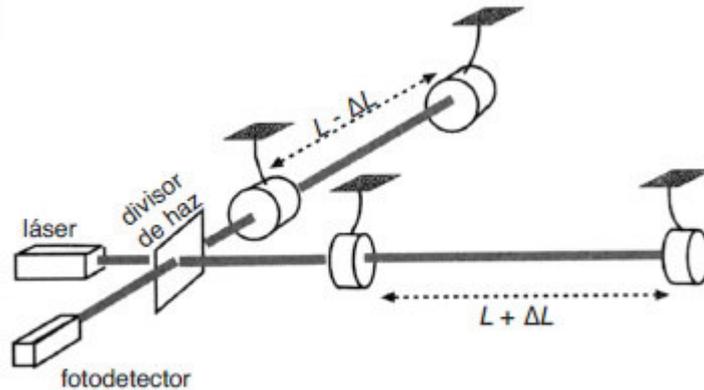


FIGURA 12. Diagrama esquemático de un interferómetro láser terrestre para la detección de ondas gravitatorias.

La luz procedente del láser se hace pasar por un divisor de haz (véase la fig. 12) de modo que en cada brazo entra la mitad de la luz. La luz rebota en los brazos unas 100 veces de un lado a otro, luego sale y los dos haces interfieren en el divisor de haz. Cuando un brazo se alarga y el otro se acorta, la intensidad de la luz que va hacia el fotodetector aumenta; cuando el otro se alarga y el primero se acorta, el fotodetector ve su intensidad disminuida. Esta «interferometría láser» produce una señal en el fotodetector que es proporcional a la forma de onda $\Delta L/L$.

Los tres interferómetros de LIGO estarán completamente operativos para el verano de 2002, y LIGO y sus compañeros internacionales empezarán entonces su primera búsqueda de ondas gravitatorias. La sensibilidad inicial de LIGO, $\Delta L/L$, aproximadamente 10^{-21} , *podría* o no ser suficientemente buena para observar colisiones de agujeros negros, dependiendo de la amabilidad de la naturaleza. Tras tres años de búsqueda (y observación, espero), los detectores iniciales de LIGO serán reemplazados por «detectores avanzados» con una sensibilidad quince veces mayor, de modo que puedan mirar quince veces más lejos en el universo, abarcando un volumen aproximadamente 1000 veces mayor. Estos detectores avanzados deberían ser capaces de ver colisiones de agujeros negros a «distancias cosmológicas» (una gran fracción del universo). A estas distancias, los astrofísicos esperan muchas colisiones por año, y quizá muchas por día. Esta estimación me hace confiar en mis predicciones: LIGO y sus compañeros empezarán a observar colisiones de agujeros negros en algún momento entre 2002 y 2008.

Ahora paso de predicciones confiadas para la presente década a una especulación bien informada sobre la década de 2020 a 2030.

Especulación informada 3: En la década de 2020 a 2030, LIGO y sus compañeros, y un sucesor espacial de LISA, observarán todas las colisiones de agujeros negros en el universo con masas de agujeros por debajo de 3 millones de soles, y toda colisión entre un agujero negro y una estrella de neutrones, y toda colisión entre dos estrellas de neutrones. Verán muchas colisiones cada día. El resultado, después de comparar las ondas observadas con simulaciones numéricas de la relatividad, será un enorme catálogo de colisiones y sus propiedades detalladas, muy parecido a los catálogos de estrellas y galaxias elaborados por los astrónomos ópticos, radioastrónomos y astrónomos de rayos X en el siglo xx.

Las «estrellas de neutrones» en esta especulación son objetos gobernados por una combinación de las leyes de la relatividad general para la distorsión espaciotemporal y las leyes de la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica fue la segunda gran revolución del siglo xx en nuestra comprensión de la ley física. Mientras que las leyes de la distorsión espaciotemporal (la primera revolución) actúan

normalmente en escalas macroscópicas, sobre objetos del tamaño de un ser humano o mucho mayor, las leyes de la mecánica cuántica actúan en escalas microscópicas, sobre objetos del tamaño de átomos o menores. Las leyes cuánticas son tan diferentes de la experiencia cotidiana como lo son las leyes de la distorsión espaciotemporal, pero de una forma aún más extraña: insisten en que propiedades tan sencillas como la posición y la velocidad de una partícula son intrínsecamente imprecisas, y que estas propiedades pueden definirse sólo de forma probabilista —una cierta probabilidad de encontrar la partícula aquí, otra de encontrarla allá, y así sucesivamente. Pronto discutiré esta extrañeza.

La mecánica cuántica gobierna, entre otras cosas, la «fuerza nuclear»: la fuerza que une neutrones y protones en los núcleos atómicos. Normalmente sondamos la fuerza nuclear en aceleradores de partículas lanzando protones o neutrones o núcleos atómicos unos contra otros. Estos experimentos de colisiones nos han enseñado muchos detalles de la fuerza nuclear, pero no todos: nos han enseñado sorprendentemente poco sobre cómo se comporta la fuerza nuclear cuando uno tiene un enorme número de neutrones constreñidos en un pequeño volumen para formar materia nuclear. La razón es que los núcleos atómicos no son muy grandes. Llegan hasta unos pocos centenares de neutrones y protones en un núcleo único, pero no más.

¿Qué sucede cuando se tienen millones o multillones de neutrones y protones todos constreñidos en un volumen minúsculo? Por lo que sabemos, el único lugar donde se da tal «materia nuclear en masa» en el universo actual es dentro de una estrella de neutrones, donde las densidades pueden ser treinta veces más altas que en un núcleo atómico. De modo que las estrellas de neutrones son la clave para desvelar los misterios de la materia nuclear.

La fuerza nuclear mecanocuántica determina la enorme presión en el núcleo de una estrella de neutrones, una presión que trata de hacer que la estrella explote. La distorsión espaciotemporal produce la enorme atracción gravitatoria que trata de aplastar la estrella de neutrones, convirtiéndola en un agujero negro. (La enormidad de la distorsión está tipificada por la curvatura del espacio dentro y alrededor de la estrella, tal como se muestra en la figura 13). Dentro de la estrella, la aplastante fuerza de la gravedad está compensada exactamente por la fuerza explosiva de la presión nuclear. La circunferencia de la estrella está determinada por este equilibrio: cuanto más intensa es la presión nuclear, mayor es la circunferencia. Midiendo la circunferencia y también la masa podemos determinar la fuerza de la gravedad de la estrella, a partir de la cual podemos inferir la intensidad de la presión nuclear —o, más exactamente, podemos saber la «ecuación de estado» nuclear: la presión nuclear en función de la densidad.

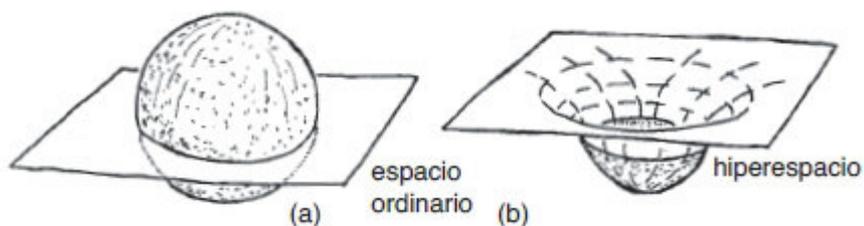


FIGURA 13. La distorsión del espacio dentro y alrededor de una estrella de neutrones: (a) Un corte ecuatorial a través de una estrella, cuando se observa desde un hiperespacio plano de dimensión más alta en el que está inmerso nuestro universo, tiene la forma mostrada en (b). La circunferencia de la estrella puede ser de aproximadamente dos veces su diámetro en lugar de π veces su diámetro.

Aunque se han descubierto centenares de estrellas de neutrones con radiotelescopios, telescopios ópticos y telescopios de rayos X, y muchas de sus características se han investigado de este modo, estas observaciones electromagnéticas sólo nos han dado un conocimiento tosco de las circunferencias de las estrellas y, por lo tanto, de la ecuación de estado nuclear. Se han medido las masas de aproximadamente una docena de estrellas de neutrones, siendo

todas ellas muy próximas a 1,4 soles, de modo que contienen del orden de 10^{57} neutrones; pero sus circunferencias han sido medidas de una forma tan poco precisa que sólo sabemos que tienen algún valor entre unos 25 y 50 kilómetros.

Esto lleva a mi siguiente predicción.

Predicción 4: En algún momento entre los años 2008 y 2010, los detectores avanzados de LIGO, y los de sus compañeros, empezarán a sondear las propiedades de la materia nuclear registrando las ondas gravitatorias que se producen cuando un agujero negro desgarrar una estrella de neutrones. Las ondas observadas, combinadas con las evoluciones en relatividad numérica de la destrucción de la estrella, nos dirán la circunferencia de la estrella con una precisión de un 10 por 100 aproximadamente. Esta y otras características de las ondas nos enseñarán mucho sobre la ecuación de estado nuclear.

La figura 14 muestra un ejemplo de la destrucción de una estrella de neutrones por un agujero negro, con la consiguiente emisión de ondas gravitatorias. La estrella y el agujero se mueven inicialmente una alrededor del otro en una órbita que se contrae poco a poco a medida que cede energía a las ondas gravitatorias. A partir de estas ondas en espiral decreciente podemos inferir las masas y rotaciones del agujero y la estrella. Conforme la estrella se aproxima al horizonte del agujero, encuentra una distorsión espaciotemporal cada vez mayor, que finalmente desgarrar la estrella. Cuanto mayor es la circunferencia de la estrella, más fácilmente se deforma, de modo que antes empieza el desgarrar. Así pues (como ha demostrado mi alumna de doctorado Michele Vallisneri), a partir del inicio del desgarrar podemos inferir la circunferencia de la estrella y con ello algunos detalles de su ecuación de estado; comparando las ondas producidas durante el desgarrar con las simulaciones de la relatividad numérica, deberíamos ser capaces de inferir otros detalles de la ecuación de estado.

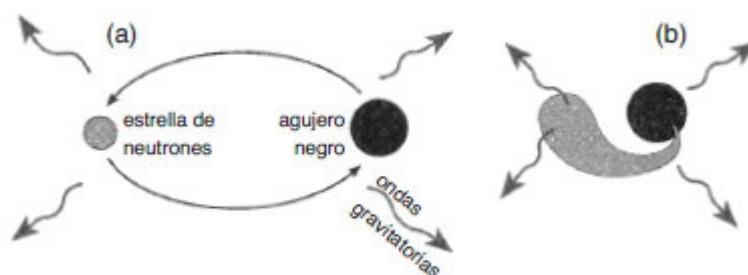


FIGURA 14. (a) Una estrella de neutrones y un agujero negro en órbita una alrededor del otro describirán una espiral que se va cerrando a medida que pierden energía en forma de ondas gravitatorias. (b) A medida que la estrella se acerca al agujero, la distorsión espaciotemporal del agujero puede desgarrar la estrella de neutrones.

Las colisiones de agujeros negros y la destrucción de estrellas de neutrones son solamente dos de los muchos tipos de fuentes de ondas gravitatorias que LISA, LIGO y sus compañeros verán y utilizarán para sondear las leyes fundamentales de la naturaleza y sus papeles en el universo. Pero más que discutir otras, me dirigiré ahora a una notable predicción sobre la tecnología humana y la mecánica cuántica.

Predicción 5: En LIGO en 2008 empezaremos a observar el comportamiento mecanocuántico de cilindros de zafiro de 40 kilogramos. Se creará una «tecnología de no-demolición cuántica» para tratar este comportamiento cuántico, y ya en el año 2008 se incorporará en los detectores avanzados de ondas gravitatorias de LIGO. Esta nueva tecnología será una rama de un nuevo campo de actividad humana llamado «ciencia de la información cuántica», que incluye la «criptografía cuántica» y la «computación cuántica».

Esta predicción es notable. Los libros de texto dicen que el dominio de la mecánica cuántica es el mundo microscópico, el mundo de átomos y moléculas y partículas fundamentales. Hemos sabido desde hace tiempo que *en principio* el comportamiento cuántico podría también manifestarse en el mundo macroscópico, el mundo de los seres humanos, pero las posibilidades eran tan remotas que lo dejábamos fuera de nuestros libros de texto; lo ocultábamos a nuestros estudiantes. Ya no debemos ocultarlo más. Debemos estar preparados,

en 2008, para ver que el «principio de incertidumbre» mecanocuántico saca la cabeza al macromundo —en los espejos de 40 kilogramos de LIGO— y debemos aprender a esquivar el principio de incertidumbre.

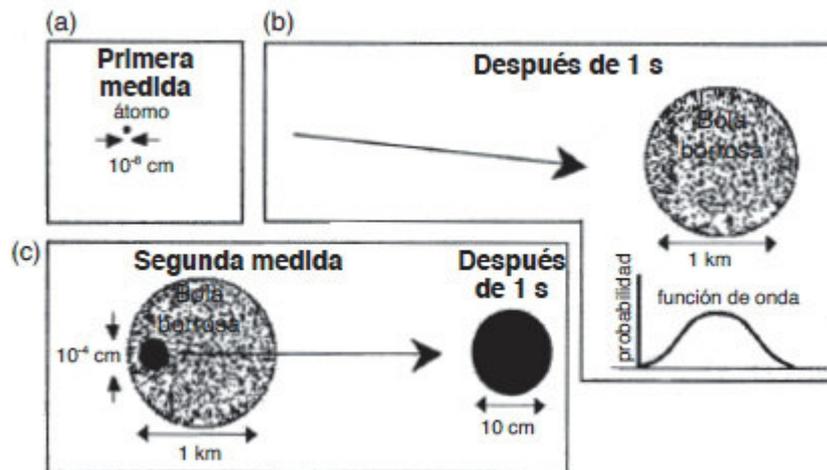


FIGURA 15. El principio de incertidumbre ilustrado por medidas sucesivas de la posición de un átomo.

La figura 15 ilustra el principio de incertidumbre en el dominio de los átomos, donde ha imperado desde hace tiempo. Supongamos que hacemos dos medidas sucesivas de la posición de un átomo, y que en nuestra primera medida conseguimos una precisión igual al tamaño del propio átomo, 10^{-8} centímetros (figura 15a). El principio de incertidumbre dice que por nuestro mismo acto de medir dónde está el átomo creamos una incertidumbre en la velocidad del átomo. Esta incertidumbre hará que el átomo se mueva en una dirección desconocida e *incognoscible*, a una velocidad desconocida e *incognoscible*. Como resultado, es imposible predecir dónde estará el átomo en el momento de la segunda medida. Sólo podemos decir que tiene una alta probabilidad de estar localizado en alguna región concreta, a veces denominada la «bola borrosa cuántica» del átomo (véase la fig. 15b). Cuanto más tiempo esperamos entre medidas, mayor será la bola borrosa. Si esperamos tan sólo 1 segundo, el principio de incertidumbre predice un tamaño de la bola borrosa de ¡1 kilómetro! La probabilidad de encontrar el átomo en puntos diversos dentro de esta bola borrosa de 1 kilómetro está descrita por la «función de onda» del átomo (véase la fig. 15b). Las leyes de la mecánica cuántica nos proporcionan maneras precisas de predecir esta función de onda —es decir, la probabilidad de dónde está el átomo— pero la posición exacta es impredecible.

Supongamos que cuando la bola borrosa se ha expandido hasta 1 kilómetro hacemos una segunda medida de la posición del átomo, esta vez con una precisión 10 000 veces peor que la primera —una precisión de 10^{-4} centímetros. Este segundo acto de medida contrae repentinamente la bola borrosa de 1 kilómetro a 10^{-4} centímetros (véase la fig. 15c) y también produce una nueva incertidumbre en la velocidad. De acuerdo con el principio de incertidumbre, la incertidumbre en la velocidad es inversamente proporcional a la precisión de la medida de posición, de modo que durante el segundo de tiempo posterior a nuestra segunda medida, la bola borrosa crece hasta un tamaño de 1 kilómetro dividido por 10 000, sólo 10 centímetros (véase la fig. 15c).

Por extraño que pueda parecer el principio de incertidumbre, es la realidad. Ha sido verificado en muchos experimentos de laboratorio. Una característica clave del principio de incertidumbre es que la incertidumbre en la velocidad creada por una medida de posición no es sólo inversamente proporcional a la precisión de la posición sino que también es inversamente proporcional a la masa del objeto medido. Por esto es por lo que todavía no hemos visto nunca un objeto de tamaño humano comportarse mecanocuánticamente: nuestras enormes masas humanas — 10^{28} veces mayores que la masa de un átomo— hacen que las incertidumbres de

nuestra velocidad y las bolas borrosas cuánticas sean exquisitamente pequeñas. Constituye un extraordinario tributo a los científicos de LIGO el hecho de que su tecnología revelará el comportamiento de la minúscula bola borrosa de espejos de 40 kilogramos en el 2008 (si mi predicción es correcta). La figura 16 muestra el tipo de espejos de los que estoy hablando. Los espejos de las fotografías son los de los primeros detectores de LIGO, los detectores que empezarán su búsqueda de ondas gravitatorias en 2002. Estos espejos iniciales pesan 11 kilogramos, no 40, y están hechos de cuarzo, no de zafiro, pero los espejos avanzados de zafiro de 40 kilogramos en 2008 serán muy parecidos a éstos.



FIGURA 16. (a) Un espejo de los interferómetros LIGO iniciales, apoyado sobre un cojín de terciopelo. (b) El espejo colgado de cables en su cuna en LIGO. [Cortesía de LIGO Project, California Institute of Technology].

La influencia del principio de incertidumbre en uno de los espejos de zafiro avanzados de 40 kilogramos de LIGO se muestra en la figura 17. El haz luminoso que mide la posición del espejo lo hace promediando sobre una mancha luminosa de 10 centímetros de diámetro en la superficie del espejo, y promediando sobre aproximadamente 1 milisegundo de tiempo —un tiempo mucho mayor que los períodos de vibración térmica de los átomos individuales del espejo. Este promedio garantiza que el haz mide la posición media de todos los átomos: es decir, mide la posición del «centro de masas» del espejo. En efecto, el espejo en esta medida se comporta como una única partícula que pese 40 kilogramos, en lugar de como un conglomerado de 10^{28} átomos que chocan unos con otros.

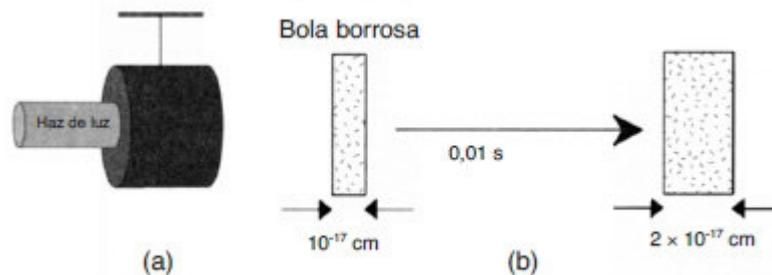


FIGURA 17. Las consecuencias del principio de incertidumbre para medidas sucesivas del centro de masas de un espejo LIGO avanzado.

El haz luminoso no mide la posición del centro de masas en las tres dimensiones, sino sólo en una: a lo largo de la dirección del haz. Entre 2008 y 2010 medirá dicha posición con exquisita precisión: aproximadamente 10^{-17} centímetros -1/10 000 del diámetro de un núcleo atómico, 1 milmillonésima parte del diámetro de un átomo, 10^{-13} (una diez billonésima) de la longitud de onda de la luz. Esta fantástica precisión localizará el centro de masas del espejo en la bola borrosa de 10^{-17} centímetros de grosor mostrada en la figura 17b. Si dicha bola borrosa no crece entre las medidas, entonces mediante medidas sucesivas de 10^{-13} centímetros podríamos detectar ondas gravitatorias que muevan los espejos de LIGO en distancias tan pequeñas como $\Delta L = 2 \times 10^{-17}$ centímetros. Sin embargo, el principio de incertidumbre obliga a crecer a la bola borrosa: la primera medida, con su precisión extrema, induce una incertidumbre en la

velocidad suficientemente grande para duplicar el grosor de la bola borrosa en la mitad de un período de una onda gravitatoria (aproximadamente 1/100 segundos). Este crecimiento ocultará los efectos de cualquier onda de gravedad tan pequeña como $\Delta L = 2 \times 10^{-17}$ centímetros —a menos que podamos encontrar alguna forma de esquivar el principio de incertidumbre.

En 1968, mi buen amigo ruso Vladimir Braginsky identificó el principio de incertidumbre como un obstáculo potencial para los detectores de ondas gravitatorias y otros aparatos de medida de alta precisión en el futuro lejano, y en los años setenta Braginsky tuvo la previsión de empezar a idear formas de esquivarlo: formas a las que les dio el nombre de «no-demolición cuántica», lo que significa «no dejar que el principio de incertidumbre destruya la información que uno está tratando de extraer de sus aparatos de medida». Yo y mis alumnos nos unimos a Braginsky en su búsqueda durante algunos años a finales de los setenta, y recientemente renovamos nuestra colaboración con vigor cuando comprendimos que LIGO debe enfrentarse al principio de incertidumbre en 2008. Gracias a ideas de Braginsky y sus colegas rusos, y a un reciente trabajo de Alessandra Buonanno y Yanbei Chen en mi propio grupo, estaremos preparados en 2008: ahora conocemos formas viables de proteger la información de las ondas gravitatorias contra el principio de incertidumbre cuando pasan a través de los espejos mecanocuánticos de 40 kilogramos de LIGO.

Las claves para esta no-demolición cuántica son varias, y son fundamentalmente demasiado complejas para discutir las hoy aquí, pero una idea clave puede establecerse de forma muy simple: en los detectores avanzados *nunca* debemos medir las posiciones de los espejos, ni las separaciones entre ellos (que contendrían información de la posición). En su lugar, debemos medir solamente *cambios* en las separaciones, sin medir siquiera las propias separaciones. De esta forma, podemos evitar los embates del principio de incertidumbre.

Al principio de este ensayo me he mostrado a mí mismo intentando inútilmente enviar señales fuera de un agujero negro mientras era atraído a la singularidad en su núcleo (véase la fig. 3a). La naturaleza de dicha singularidad es un gran misterio, pero la distorsión espaciotemporal cercana no lo es. A principios de la década de 1970, tres amigos rusos míos, Vladimir Belinsky, Isaac Khalatnikov y Yevgeny Lifshitz, investigaron la curvatura de la singularidad resolviendo las ecuaciones de Einstein, y descubrieron el comportamiento violento y caótico mostrado en la figura 18.^[11] Cuando yo estoy cerca de la singularidad, la distorsión me estira desde la cabeza a los pies al mismo tiempo que me comprime lateralmente, luego me estira lateralmente mientras me comprime de cabeza a pies, y luego se repite el proceso, cada vez más rápido, en una pauta caótica continuamente variable. Pronto mi cuerpo cede y yo me «espaguetizo» (por utilizar un término técnico acuñado por John Wheeler). Luego los átomos individuales de mi cuerpo se espaguetizan y se hacen irreconocibles, y luego el propio espacio se espaguetiza.

Estoy convencido, por argumentos dados por Wheeler en 1957, de que el punto final de la espaguetización —la propia singularidad— está gobernado por una unión, o matrimonio, de las leyes de la mecánica cuántica y las de la distorsión espaciotemporal. Esto debe ser así, puesto que la distorsión espaguetiza el espacio a escalas tan extraordinariamente microscópicas que están profundamente influenciadas por el principio de incertidumbre.

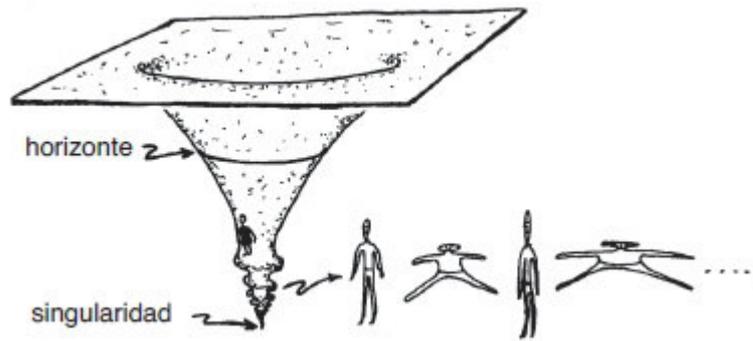


FIGURA 18. Kip cae en un agujero negro. A medida que se aproxima a la singularidad en su núcleo, es estirado y comprimido de forma caótica por la extrema distorsión espaciotemporal.

Las leyes unificadas de la distorsión espaciotemporal y la mecánica cuántica se denominan «leyes de la gravedad cuántica», y han sido un santo grial para los físicos desde los años cincuenta. A principios de los sesenta, cuando yo era alumno de Wheeler, pensaba que las leyes de la gravedad cuántica eran tan difíciles de comprender que nunca las descubriríamos durante mi tiempo de vida, pero ahora estoy convencido de lo contrario. Una aproximación a su comprensión, denominada «teoría de cuerdas», parece tremendamente prometedora.

La teoría de cuerdas tiene una mala reputación en algunos círculos porque todavía no ha hecho predicciones que puedan ser puestas a prueba en el laboratorio o mediante observaciones astronómicas o cosmológicas. Las singularidades, al ser objetos gravitatorios cuánticos, pueden rectificar esto, si podemos observarlas.

Ahora bien, las singularidades dentro de los agujeros negros no son de mucha utilidad puesto que no pueden verse desde la Tierra. Si uno llegara a verlas, moriría sin publicarlo. ¿Hay otras singularidades que podamos observar sin morir? Sí, existe al menos una: la singularidad del big bang que dio origen a nuestro universo, y las ondas gravitatorias son la herramienta ideal para sondarla.

El big bang produjo tres tipos de radiación: radiación electromagnética (fotones), radiación de neutrinos y ondas gravitatorias; (véase la fig. 19). Durante sus primeros 100 000 años de vida, el universo estaba tan caliente y denso que los fotones no podían propagarse; eran creados, dispersados y absorbidos antes de que apenas pudieran recorrer cualquier distancia. Finalmente, a los 100 000 años de edad, el universo se había expandido y enfriado lo suficiente para que los fotones sobrevivieran, y ellos empezaron su viaje a la Tierra. Hoy los vemos como un «fondo cósmico de microondas» (CMB), que llega de todas direcciones y lleva una imagen del universo cuando tenía 100 000 años.

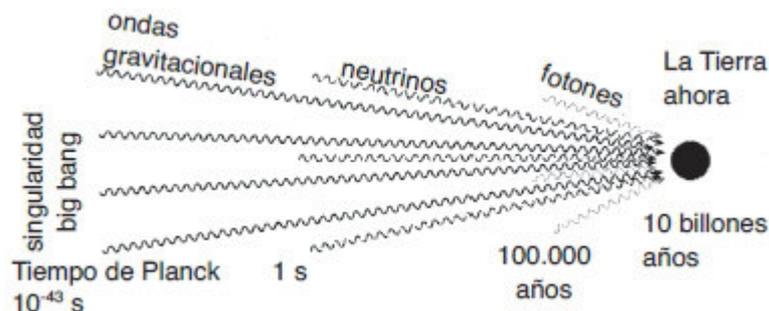


FIGURA 19. Fotones, neutrinos y ondas gravitatorias procedentes de la creación del universo en un big bang.

Los neutrinos son mucho más penetrantes que los fotones. Algún día la tecnología de detectores de neutrinos llegará a ser suficientemente buena para detectar y medir los neutrinos del big bang. Cuando eso suceda, nos proporcionarán una imagen del universo cuando tenía 1 segundo; antes de eso, el universo estaba demasiado caliente y denso para que

los neutrinos sobrevivieran.

Las ondas gravitatorias son mucho más penetrantes que los neutrinos: tan penetrantes, según cálculos de mis amigos rusos Yakov Borisovich Zel'dovich e Igor Novikov, que nunca habrían sido absorbidas o dispersadas por la materia del universo. Deberían haber viajado a salvo de la materia desde los primeros momentos del universo: desde la propia singularidad del big bang. Por consiguiente podríamos ofrecernos una imagen de los esfuerzos de parto del universo —esfuerzos de parto que, durante un tiempo de aproximadamente 10^{-23} segundos (conocido como el «tiempo de Planck»), destruyeron la singularidad y crearon el espacio, el tiempo, la materia y la radiación.

Las ondas gravitatorias del big bang, por débiles y escasas que sean, deberían haber sido fuertemente amplificadas en el primer segundo de la vida del universo. Esta amplificación (predicha por mi amigo ruso Leonid Grishchuk a mediados de los años setenta) es debida a interacciones no-lineales de las ondas con la distorsión espaciotemporal del universo, y eso ofrece esperanzas de que las ondas sean suficientemente intensas para ser detectadas. Esto lleva a mi siguiente predicción —en realidad una especulación informada, porque yo tengo menos confianza en ella que en las cosas a las que llamo predicciones.

Especulación informada:^[12] En algún momento entre 2008 y 2030 se descubrirán ondas gravitatorias procedentes de la singularidad del big bang. A esto seguirá una era, que durará al menos hasta el 2050, en la que se harán grandes esfuerzos para medir el espectro de las ondas gravitatorias primordiales (su intensidad como función de la longitud de onda) desde longitudes de onda de 10 000 millones de años-luz hasta longitudes de onda de 100 metros, y representar el patrón de intensidad de las ondas en el cielo. Estos esfuerzos revelarán detalles íntimos de la singularidad del big bang, y con ello verificarán que alguna versión de la teoría de cuerdas es la teoría cuántica correcta de la gravedad. También revelarán una gran riqueza de fenómenos en el primer segundo de la vida del universo.

¿Por qué estoy tan inseguro acerca de la fecha del descubrimiento de ondas procedentes de la singularidad del big bang (2008 al 2030)? Porque somos extraordinariamente ignorantes de las propiedades de la singularidad y del primer segundo de vida del universo. A la comunidad física establecida le gusta un modelo para el primer segundo denominado «inflación», que predice que las ondas gravitatorias del big bang son tan débiles que detectarlas podría requerir la tecnología del 2030. Sin embargo, yo soy escéptico acerca de esta predicción de la comunidad física porque su modelo inflacionario no tiene en cuenta detalladamente las (todavía desconocidas) leyes de la gravedad cuántica. Un intento inicial por incorporar la teoría de cuerdas (nuestra mejor conjetura sobre la gravedad cuántica) en la física del big bang ha sido realizado por Gabriel Veneziano en Suiza y otros. Su modelo de cuerdas para el big bang predice ondas que podrían ser suficientemente intensas para ser detectadas por LIGO en 2008 o LISA en 2010. Pero la teoría de cuerdas está aún en su infancia, y el modelo de cuerdas es necesariamente tosco y provisional, de modo que tengo poca confianza en sus predicciones. De todas formas, estas predicciones son una advertencia de que el big bang y sus ondas gravitatorias pueden ser completamente diferentes de las opiniones inflacionarias pesimistas de la comunidad; muy bien pudiera ser que las ondas del big bang fueran detectadas antes de 2030.

La comunidad también nos dice con mucha confianza que en el primer segundo de vida del universo debe haber habido una rica y variada actividad. Por ejemplo, conforme el universo se expandía se enfriaba a partir de una temperatura inicial increíblemente caliente. Inicialmente, todas las fuerzas fundamentales —la fuerza gravitatoria, la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear débil y la fuerza nuclear fuerte— estaban unificadas en una única fuerza. Posteriormente, en momentos discretos en la expansión y enfriamiento, cada fuerza adquirió repentina y violentamente su propia identidad, quizá produciendo intensas ondas gravitatorias con tal violencia. Por ejemplo, se predice que la fuerza electromagnética ha adquirido su propia identidad final escindiéndose de la fuerza nuclear débil cuando la temperatura del universo era

del orden de 10^{16} grados y su edad era del orden de 10^{-15} segundos (una milésima de una billonésima de segundo, también llamado un femtosegundo). Las ondas gravitatorias producidas en este «nacimiento de la fuerza electromagnética» deberían estar hoy dentro de la banda de longitudes de onda de LISA, y podrían ser suficientemente intensas para que LISA las detecte y utilice para observar el nacimiento del electromagnetismo.

Aunque las ondas gravitatorias de la singularidad del big bang quizá sean una forma prometedora de investigar las leyes de la gravedad cuántica, están lejos de ser una apuesta segura. Sería mucho más bonito si tuviéramos otras singularidades que sondear.

¿Hay alguna esperanza de encontrar y estudiar singularidades en el universo actual? La respuesta que da la comunidad de «probablemente no» está plasmada en la «conjetura de censura cósmica» de Roger Penrose, que dice que todas las singularidades excepto el big bang están ocultas dentro de agujeros negros; es decir, están vestidas por horizontes. *No hay singularidades desnudas.*

En 1991, Stephen Hawking por una parte y John Preskill y yo por otra hicimos una apuesta sobre la censura cósmica, que se muestra en la figura 20. Hawking, como defensor de la comunidad (¡él ha sido incluso ungido «compañero de honor de su majestad la Reina de Inglaterra»!), insiste en que las «singularidades desnudas están... prohibidas por las leyes de la física», mientras que Preskill y yo, retando a la comunidad, mantenemos que las singularidades desnudas son «objetos cuánticos que pueden existir sin estar vestidos por horizontes, a la vista de todo el Universo».

Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager with odds of 100 pounds sterling to 50 pounds sterling, that when any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, the result can never be a naked singularity.

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable concessionary message.



John P. Preskill Kip S. Thorne

Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 24 September 1991

FIGURA 20. La apuesta de 1991 en la que Hawking defiende la conjetura de censura cósmica, y Preskill y Thorne se oponen a ella. (De Kip S. Thorne, *Agujeros negros y tiempo curvo*, utilizada con autorización).

Puesto que Stephen W. Hawking cree firmemente que las singularidades desnudas son anatema y deberían estar prohibidas por las leyes de la física clásica, / Y puesto que John Preskill y Kip Thorne consideran las singularidades desnudas como objetos gravitatorios cuánticos que podrían existir sin estar revestidos de horizontes, a la vista de todo el universo, / Hawking ofrece, y Preskill/Thorne aceptan, una apuesta de 100 libras esterlinas contra 50 libras esterlinas, a que cuando cualquier forma de materia o campo clásico que es incapaz de hacerse singular en el espaciotiempo plano se acopla a la relatividad general vía las ecuaciones de Einstein clásicas, el resultado nunca puede ser una singularidad desnuda. / El perdedor recompensará al ganador con ropa para cubrir la desnudez del ganador. La ropa estará adornada con un adecuado mensaje de concesión.

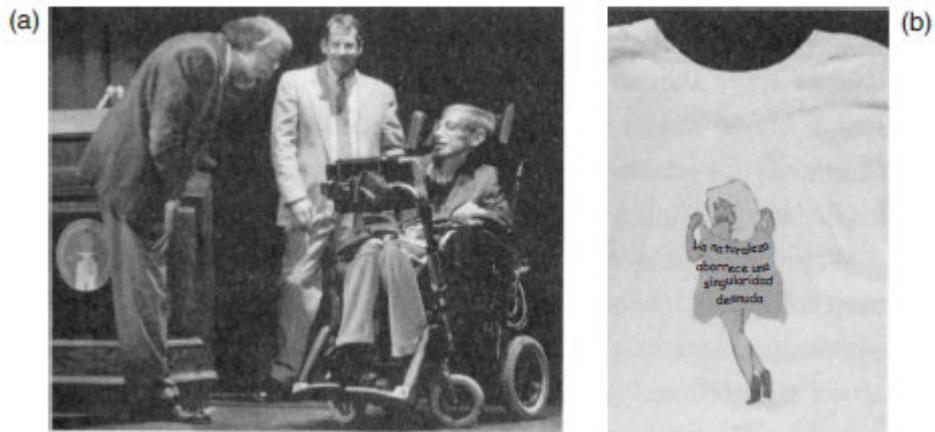


FIGURA 21. (a) Hawking admite que ha perdido nuestra apuesta sobre la censura cósmica, mientras Thorne se inclina gustosamente y Preskill observa con regocijo. (b) La camiseta políticamente incorrecta que nos dio Hawking. [foto (a) tomada en Caltech, cortesía de Irene Fertik, University of Southern California].

El caso es que Preskill y yo teníamos poca confianza en ganar la apuesta, pero Hawking nos lo concedió en 1997 (véase la fig. 21.^a), aunque a regañadientes. Nuestra apuesta especificaba que «El perdedor recompensará al ganador con ropa para cubrir la desnudez del ganador. La ropa estará adornada con un adecuado mensaje de concesión». La ropa que Hawking nos dio era una camiseta políticamente incorrecta que la esposa de Preskill y la mía nos prohibieron llevar en público, pero que muestro aquí en la figura 21b para que todo el mundo la vea. Aunque Hawking estaba admitiendo que las leyes de la física permiten singularidades desnudas, el mensaje de la camiseta insiste —como Hawking sigue haciendo— en que «la Naturaleza aborrece una singularidad desnuda». Difícilmente era esto un «adecuado mensaje de concesión».

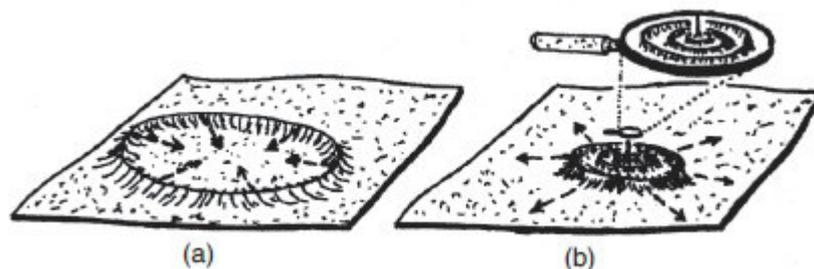


FIGURA 22. Un esbozo de las simulaciones en supercomputador de ondas en implosión que hicieron que Hawking admitiera que las leyes de la física permiten singularidades desnudas, al menos en teoría.

Para intentar explicar la insistencia de Hawking, esbozo en la figura 22 la evidencia que provocó su concesión. Dicha evidencia procedía de simulaciones en un supercomputador de un pulso de ondas esférico en implosión (véase la fig. 22a). Las simulaciones originales, hechas por Matthew Choptuik en la Universidad de Texas, eran un *tour de force* en relatividad numérica —mucho más precisas que cualesquiera computaciones previas en relatividad numérica— pero se referían a un sencillo tipo de onda que pudiera no existir en el universo: una «onda escalar clásica». Simulaciones posteriores por parte de Andrew Abrahams y Chuck Evans en la Universidad de Carolina del Norte incluían ondas gravitatorias en implosión y dieron los mismos resultados.

Cuando a las ondas en implosión se les daba una gran amplitud, de modo que contuvieran grandes cantidades de energía, las no-linealidades dinámicas de la implosión producían una singularidad vestida por un horizonte de agujero negro, como habían esperado todos los físicos gravitatorios. Cuando a las ondas se les daba una amplitud pequeña, de modo que contuvieran sólo poca energía, las ondas iban hacia adentro, se cruzaban mutuamente sin ser afectadas por

las no-linealidades, y reemergían como ondas salientes. También esto era esperado.

La gran sorpresa llegó cuando la amplitud de las ondas se ajustaba cuidadosamente para que fuera infinitesimalmente menos que suficiente para hacer un agujero negro. Entonces, como se muestra en la figura 22b, las ondas en implosión interaccionaban entre sí dinámicamente y no-linealmente para producir una espuma hirviente de distorsión espaciotemporal de la que continuamente escapaban ondas salientes. Un examen detallado de la ebullición en el núcleo mostraba que la longitud de onda de las ondas se contraía —continua, rápidamente y con una pauta sorprendentemente regular— hasta que se creaba una singularidad desnuda infinitesimalmente pequeña, que (sospechamos) vive durante un tiempo infinitesimalmente corto antes de autodestruirse.

Con estas simulaciones como guía, fuimos capaces de volver a previos estudios analíticos de las ecuaciones de Einstein, realizados, esta vez con papel y lápiz, por Demetrios Christodolou (un antiguo alumno posdoctoral mío, ahora profesor de matemáticas en la Universidad de Princeton) y ver que éstos confirmaban que la implosión podría producir una singularidad desnuda. Es un tributo a la relatividad numérica el hecho de que sólo después de que simulaciones numéricas revelaran todos los detalles de la espuma de ondas en implosión fuéramos capaces de entender claramente lo que las matemáticas de Christodolou estaban tratando de decirnos. ¡Qué maravillosas herramientas han llegado a ser los computadores gracias a personas como Choptuik, Abrahams y Evans!

De modo que ¿por qué insiste Hawking en que la naturaleza aborrece las singularidades desnudas? Porque para hacer sus singularidades desnudas, Choptuik, Abrahams, Evans y Christodolou tuvieron que ajustar de forma muy precisa la amplitud de las ondas en implosión (véase la fig. 22b). Con una amplitud ligeramente mayor se formaría una singularidad pero estaría oculta por un horizonte de agujero negro; con una amplitud ligeramente menor, las ondas interaccionarían y hervirían, y luego reexplotarían sin formar ninguna singularidad. Sólo una amplitud muy delicadamente escogida produciría una singularidad desnuda, y esa singularidad desnuda sería infinitesimal en tamaño, energía y (presumiblemente) tiempo de vida. Es extraordinariamente improbable que tal ajuste fino de amplitudes se dé en la naturaleza —aunque podría suceder que civilizaciones altamente avanzadas lo consiguiesen en sus laboratorios. Por desgracia, la civilización humana es totalmente incapaz de producir y ajustar finamente las ondas requeridas— y lo es hoy, el año que viene, el próximo siglo y probablemente el próximo milenio.

Hawking, Preskill y yo persistimos en nuestra búsqueda de verdad y diversión, de modo que hemos renovado nuestra apuesta (véase la fig. 23). Hawking insiste ahora en que si descartamos el ajuste fino (en las palabras de la apuesta, para «condiciones iniciales genéricas»), no pueden formarse singularidades desnudas, lo que significa que no pueden aparecer de forma natural. Preskill y yo discrepamos de nuevo, y exigimos que la próxima vez la ropa esté adornada con un *auténtico* mensaje de reconocimiento.

Aventuraré una predicción sobre el resultado de nuestra apuesta.

Whereas Stephen W. Hawking (having lost a previous bet on this subject by not demanding genericity) still firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne (having won the previous bet) still regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist, unclothed by horizons, for all the Universe to see,

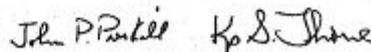
Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager that

When any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, then

A dynamical evolution from generic initial conditions (i.e., from an open set of initial data) can never produce a naked singularity (a past-incomplete null geodesic from I_+).

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable, truly concessionary message.

Stephen W. Hawking


John P. Preskill & Kip S. Thorne

Pasadena, California, 5 February 1997

FIGURA 23. La nueva versión de la apuesta, en 1997, en la que Hawking defiende la conjetura de censura cósmica, y Preskill y Thorne se oponen a ella. Las itálicas hacen la apuesta más precisa al utilizar la jerga técnica de la física teórica.

Puesto que Stephen W. Hawking (habiendo perdido una apuesta anterior sobre este tema que no exigía condiciones genéricas) sigue creyendo firmemente que las singularidades desnudas son anatema y deberían estar prohibidas por las leyes de la física clásica, / Y puesto que John Preskill y Kip Thorne (habiendo ganado la apuesta anterior) siguen considerando las singularidades desnudas como objetos gravitatorios cuánticos que podrían existir sin estar revestidos de horizontes, a la vista de todo el universo, / Hawking ofrece, y Preskill/Thorne aceptan, una apuesta a que cuando cualquier forma de materia o campo clásico que es incapaz de hacerse singular en el espaciotiempo plano se acopla a la relatividad general vía las ecuaciones de Einstein clásicas, entonces una evolución dinámica a partir de condiciones iniciales genéricas (por ejemplo, a partir de un conjunto abierto de datos iniciales) nunca puede producir una singularidad desnuda (una geodésica nula con pasado incompleto a partir de I_+). El perdedor recompensará al ganador con ropa para cubrir la desnudez del ganador. La ropa estará adornada con un auténtico y adecuado mensaje de concesión.

Predicción 7: Antes de que Hawking, Preskill y yo muramos, nuestra nueva apuesta sobre la censura cósmica quedará resuelta. ¿Quién ganará? Me temo que Hawking, pero no es obvio y no voy a arruinar nuestra apuesta con la predicción. Sin embargo, sí que predigo que los esfuerzos por resolver nuestra apuesta —descubrir si pueden o no formarse singularidades desnudas sin ajuste fino— implicarán tres frentes: cálculos con papel y lápiz, cálculos de relatividad numérica y búsquedas de ondas gravitatorias.

La búsqueda de ondas gravitatorias será parte del proyecto de LISA para hacer mapas detallados de la distorsión espaciotemporal alrededor de agujeros negros masivos (véanse las figs. 5 y 7). Si uno o más de los mapas difieren de las predicciones de agujeros negros de la relatividad general, puede ser que el objeto central en torno al cual el agujero de masa pequeña está describiendo una espiral sea una singularidad desnuda en lugar de un agujero negro masivo. Las probabilidades de esto son pequeñas, pero tendremos las herramientas para buscar, de modo que buscaremos.

Ahora paso a mi conjunto final de predicciones, todas las cuales se centran en las leyes de la gravedad cuántica y lo que éstas nos enseñarán.

Predicción 8: En 2020 los físicos comprenderán las leyes de la gravedad cuántica, y encontrarán que son una variante de la teoría de cuerdas. En 2040 habremos utilizado dichas leyes para producir respuestas de gran fiabilidad a muchas cuestiones profundas y enigmáticas, incluyendo:

¿Cuál es la naturaleza completa de la singularidad del big bang, en la que nacieron el espacio, el tiempo y el universo?

¿Qué había antes de la singularidad del big bang? o ¿había siquiera algo semejante a un «antes»?

¿Existen otros universos? Y si es así, ¿qué relación o conexión tienen con nuestro propio universo?

¿Cuál es la naturaleza completa de las singularidades dentro de agujeros negros?

¿Pueden crearse otros universos en singularidades de agujero negro?

¿Permiten las leyes de la física que civilizaciones altamente avanzadas creen y mantengan agujeros de gusano para viajes interestelares, y creen máquinas del tiempo para viajar hacia atrás en el tiempo?

Los agujeros de gusano y las máquinas del tiempo se discuten detenidamente en los ensayos de Novikov y Hawking, que preceden en este volumen, y en el último capítulo de mi libro *Black Holes and Time Warps* —y también son bien conocidos para cualquier consumidor de televisión y películas de Hollywood. La figura 24 muestra un ejemplo ilustrativo de un agujero de gusano, utilizando dibujos adaptados de mi libro.

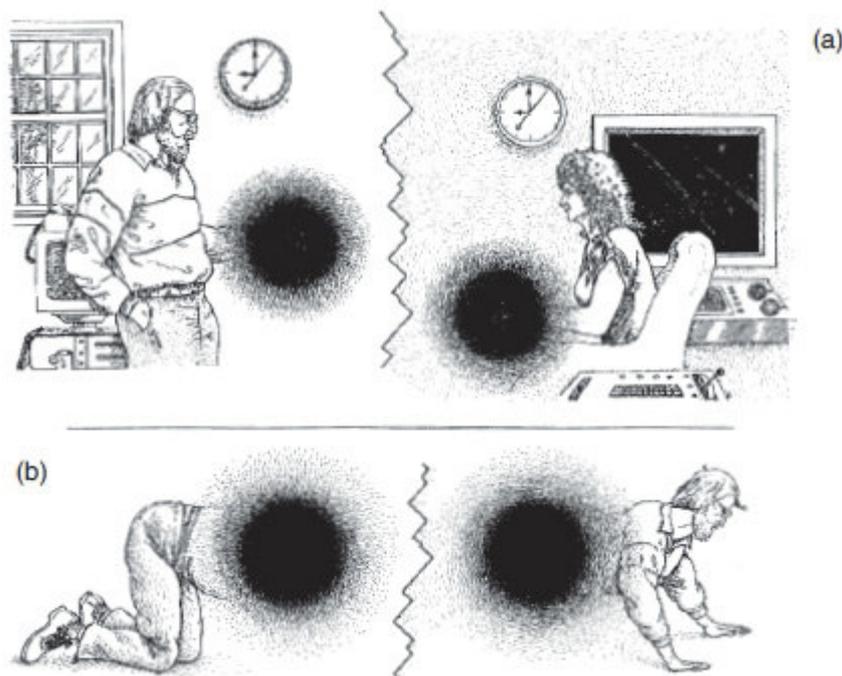


FIGURA 24. (a) Carolee viaja a través del universo en una nave espacial. Yo me quedo en casa en la Tierra, y nos cogemos las manos a través de un agujero de gusano. (b) Yo gateo a través del agujero de gusano desde la Tierra a la nave espacial. [Adaptado de dibujos de Matthew Zimet en *Agujeros negros y tiempo curvo*, de Kip Thorne, reproducido con autorización].

Mi esposa, Carolee Winstein, y una boca de un agujero de gusano están en una nave espacial lejos de la Tierra, y yo estoy en nuestra casa en Pasadena cerca de la otra boca. La distancia a través del agujero de gusano es muy corta, de modo que Carolee y yo podemos cogernos románticamente las manos a través del mismo, mientras ella parte en un viaje interestelar (véase la fig. 24a). Si queremos hacer más que tenernos cogidas las manos, entonces puedo ir hasta su nave espacial gateando a través del agujero de gusano (véase la fig. 24b).

En mi libro explico una consecuencia crucial de las leyes de Einstein de la distorsión espaciotemporal: para mantener un agujero de gusano abierto de modo que yo o cualquier otro objeto pueda viajar a través de él, el agujero de gusano debe estar ensartado con «material exótico» —material que, visto por alguien en reposo dentro del agujero de gusano, tiene una enorme tensión de tipo banda elástica; una tensión mayor que su enorme densidad de energía. (Nunca he explorado si yo podría pasar a través del material exótico con impunidad,

puesto que sabemos muy poco sobre el material exótico).

Sí sabemos que tal material exótico, como Hawking describe en su ensayo y yo discuto en mi libro, puede existir realmente en minúsculas cantidades y en circunstancias muy especiales. Sin embargo, la comunidad de físicos sospecha fuertemente que las leyes de la física prohibirán a cualquiera concentrar este tipo de materia en cantidad suficiente para mantener abierto un agujero de gusano de tamaño humano un tiempo suficientemente largo. Una razón para este prejuicio es que alguien que se moviera a través del material exótico a alta velocidad, en lugar de estar en reposo en él, vería una densidad de energía negativa. Esto significa que viola la «condición de energía débil» discutida en el ensayo de Hawking, y la comunidad de los físicos tiene una relación amorosa con la condición de energía débil.

En los años transcurridos desde que escribí mi libro, varios de mis amigos físicos han tratado arduamente de descubrir si las leyes de la física permitirían a una civilización muy avanzada colocar suficiente material exótico en un agujero de gusano de tamaño humano para mantenerlo abierto. La respuesta final no existe todavía, y pudiera no estar disponible hasta que las leyes de la gravedad cuántica sean completamente entendidas. Sin embargo, los resultados provisionales, fundamentalmente de mi antigua alumna Eanna Flanagan y de mis amigos Bob Wald, Larry Ford y Thomas Roman no parecen buenos para los agujeros de gusano. Pese a esto, yo sigo siendo optimista. Si me apremiaran a especular (como me apremio yo hoy), ofrezco lo siguiente.

Especulación 9 No-Tan-Bien-Informada: Resultará que las leyes de la física sí permiten suficiente materia exótica en agujeros de gusano de tamaño humano para mantener abiertos los agujeros de gusano. Pero resultará también que la tecnología para hacer agujeros de gusano y mantenerlos abiertos está inimaginablemente más allá de las capacidades de nuestra civilización humana.

¿Por qué soy optimista sobre grandes cantidades de materia exótica? Quizá fundamentalmente a causa de mi escepticismo sobre nuestro conocimiento actual de los tipos de materia que pueden existir en el universo. Este escepticismo está impulsado por un descubrimiento cosmológico reciente.

Sólo aproximadamente un 5 por 100 de la masa del universo es del tipo de material del que estamos hechos los seres humanos —«materia bariónica» (moléculas, átomos, protones, neutrones, electrones y demás). Aproximadamente el 35 por 100 está en alguna forma desconocida de «materia oscura fría», que (como la materia bariónica) puede ser atraída por la gravedad para formar halos alrededor de las galaxias, y también podría formar «galaxias», «estrellas» y «planetas» de materia oscura que no emiten luz. En cuanto al 60 por 100 restante de la masa del universo: está en alguna forma igualmente desconocida de «energía oscura» (como la llaman los cosmólogos) que impregna el universo entero y posee una enorme tensión.^[13] ¿Es su tensión mayor que su densidad de energía? ¿Pudiera entonces ser el tipo de material exótico necesario para mantener abiertos los agujeros de gusano? No lo sabemos con seguridad, pero la comunidad de los físicos tiene un prejuicio muy fuerte a favor de que su tensión es igual a su densidad de energía, o quizá algo menor, pero no mayor. Tiendo a estar de acuerdo: ¡tendríamos tanta suerte si la naturaleza nos proporcionase material exótico en profusión en cualquier parte del universo!

De todas formas, la energía oscura me da esperanzas de que el material exótico pueda existir de hecho en grandes cantidades. ¿Por qué? Por la sencilla razón de que la energía oscura nos advierte de lo muy ignorantes que somos.

¿Y qué pasa con las máquinas del tiempo? En *Black Holes and Time Warps* describía un mecanismo universal, identificado por mi alumno posdoctoral Sung-Won Kim y yo en 1990, que siempre podría hacer que una máquina del tiempo se autodestruya en el momento en que tratamos de activarla. Hawking discute este mecanismo en su ensayo, utilizando las extrañas palabras «En general, el tensor energía-momento diverge en el horizonte de Cauchy». Una descripción más visual y fantasiosa se muestra en la figura 25.

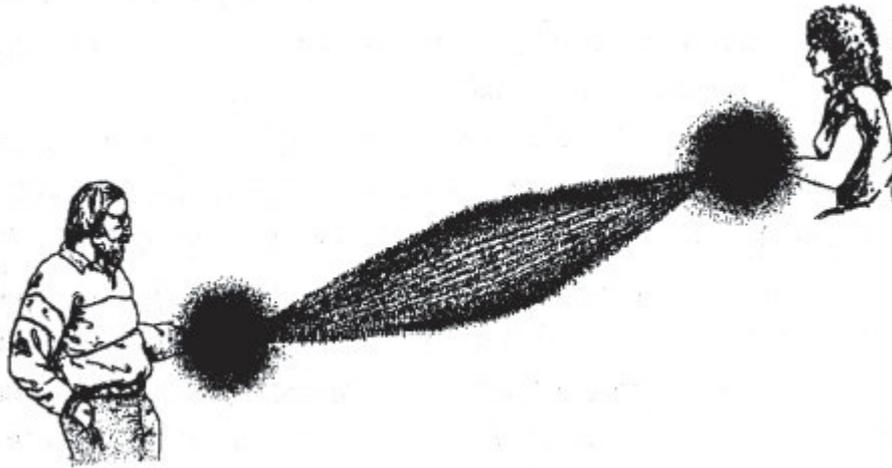


FIGURA 25. La autodestrucción de una máquina del tiempo en el momento en que es activada por primera vez. [Dibujo de Matthew Zimet en *Agujeros negros y tiempo curvo*, de Kip Thorne, reproducido con autorización].

En mi casa en Pasadena, el flujo del tiempo está frenado un poco por la masa de la Tierra, mientras que en la nave espacial de Carolee en el espacio interestelar, sin ningún cuerpo masivo cercano, el tiempo fluye a su ritmo normal y más rápido. Como Novikov describe en su ensayo, al cabo de algún tiempo esta diferencia de ritmo de flujo transforma el agujero de gusano en una máquina del tiempo: Carolee puede viajar hacia atrás en el tiempo atravesando el agujero de gusano, y entonces puede salir en otra nave espacial y volar al espacio interestelar y encontrarse allí con su versión más joven.

Hay un primer momento, en la nave espacial de Carolee, en el que el viaje en el tiempo se hace posible: el momento de «activación de la máquina del tiempo». Éste es el momento en que la entidad viajera más rápida de todas, un fragmento de radiación que se mueve a la velocidad de la luz, puede atravesar el agujero de gusano desde la nave espacial hasta la Tierra, y luego volver a la nave a la velocidad de la luz a través del espacio interestelar, llegando en el mismo instante en que partió.^[14] El resultado es dos copias de cada fragmento de radiación, la copia más joven y la copia más vieja, que habitan en el mismo punto en el espacio y el tiempo. Estas dos copias viajan entonces a través del agujero de gusano y regresan para hacer cuatro copias, luego ocho, luego dieciséis, y así sucesivamente. El resultado es un número enorme de fragmentos de radiación, con una enorme energía explosiva que destruye al agujero de gusano, según mis cálculos con Kim.

Sin embargo, nuestros cálculos estaban basados en la relatividad general y la teoría cuántica en sus formas no unificadas. En 1990, Kim y yo, revisando minuciosamente nuestros cálculos, conjeturamos que las mal entendidas leyes unificadas de la gravedad cuántica intervendrían y detendrían la explosión antes de que destruyese la máquina del tiempo. Stephen Hawking discrepó y nos mostró un punto de vista más convincente —uno que nos convenció de que la gravedad cuántica sólo intervendría en el último momento, exactamente cuando la máquina del tiempo estuviese en trance de destruirse. Parecía que la gravedad cuántica mantendría la respuesta rígidamente dentro de su control. No podríamos saber el destino de las máquinas del tiempo hasta que entendiéramos plenamente las leyes de la gravedad cuántica.

Ése era el estado de cosas en 1994, cuando se publicó mi libro. En los últimos seis años, nuevos cálculos han dado indicios contrapuestos: por una parte, como dice Stephen en su ensayo, «Cabría especular que podría haber estados cuánticos [situaciones] en donde la densidad de energía fuera finita en el horizonte [de Cauchy], (es decir, donde la máquina del tiempo no se acercaría a la autodestrucción), y hay ejemplos [de cálculos] en los que es así». Creando tales estados cuánticos [situaciones], una civilización avanzada podría hacer y activar con éxito una máquina del tiempo. Sin embargo, estos estados cuánticos parecen poco realistas; yo dudo de

que puedan hacerse en el universo real.

Por otra parte, Stephen y su alumno Mike Cassidy han utilizado una versión provisional y delirante de las leyes de la gravedad cuántica para estimar lo que éstas dicen sobre la autodestrucción. Esta versión de la gravedad cuántica predice una probabilidad exquisitamente minúscula de que una máquina del tiempo escape a la autodestrucción: 1 parte en 10^{60} —una millonésima de una trillonésima de una trillonésima de una trillonésima. ¿Podemos creernos este cálculo? No lo sé, pero probablemente es nuestra mejor guía actual sobre el destino de las máquinas del tiempo.

Todas las versiones de las leyes de la gravedad cuántica son hoy delirantes. Pero se están haciendo mucho más firmes con el paso del tiempo, y hacia 2020 (si mi predicción 8 es correcta), serán completamente firmes. ¿Qué nos dirán entonces sobre las máquinas del tiempo? Ofrezco lo siguiente.

Especulación 10: Resultará que las leyes de la física prohíben el viaje hacia atrás en el tiempo, al menos en el mundo macroscópico de los seres humanos. Por mucho que lo intente una civilización altamente avanzada, no puede impedir que una máquina del tiempo se autodestruya en el momento de la activación.

Lamentablemente, Stephen no apostará conmigo sobre esto. Ambos nos encontramos en el mismo lado. Él me ha convencido, pero sólo en el nivel de especulación informada.

Así que ahí las tienen: diez especulaciones y predicciones sobre el futuro. Las diez serán probadas o refutadas mucho antes de mi próxima gran fiesta de cumpleaños, dentro de sesenta años. La investigación que las pruebe cambiará radicalmente nuestro punto de vista sobre las distorsiones del espaciotiempo y sobre el mundo cuántico.

Sobre la divulgación de la ciencia

TIMOTHY FERRIS

La ciencia es joven. La empresa científica lleva en marcha menos de la mitad de los 1000 años que Alfred North Whitehead estimaba necesarios para que un nuevo modo de pensamiento penetre en el corazón de una cultura. Pese a todo, la ciencia ya ha transformado profundamente el mundo, al menos de tres maneras: tecnológica, intelectual y políticamente.

Los logros tecnológicos de la ciencia han hecho al mundo desarrollado más rico y más sano, si no siempre más prudente, pero también ha elevado su nivel de ansiedad. Parte de esta ansiedad surge de la razonable aprensión de que el poder tecnológico, como todo poder, tiene sus peligros. Pero algo de ello tiene que ver con el hecho de que muchas personas se encuentran rodeadas —y, a veces, amenazadas— por máquinas cuyo funcionamiento no entienden, y tras las que hay una actividad científica que tampoco entienden.

Intelectualmente, la ciencia ha creado una nueva forma de pensar, en la que el miedo, la superstición y la obediencia ciega a la autoridad se reemplazan por una forma de indagación razonada y sin prejuicios basada en la observación y el experimento. Como resultado, los que tienen formación científica se ven ahora engranados en una madeja de vida de la que han brotado, pasajeros a bordo de uno entre miles de millones de planetas en un universo en expansión de extensión desconocida y quizá infinita. Para algunos, esta nueva visión es excitante y estimulante, pero para otros es vagamente amenazadora. Estos últimos retiran la vista del telescopio para preguntar: «¿No hace todo esto que te sientas insignificante?». Quizá un término más preciso sea «inseguro». La ciencia amenaza con minar no sólo las viejas concepciones sobre nosotros mismos (como la idea de que ocupamos el centro del universo) sino también las viejas maneras de pensar (por ejemplo, que nuestra profunda sensación de que algo debe ser verdadero tiene relación con la cuestión de si realmente puede demostrarse que es verdadero). Esta amenaza es real en ambos aspectos, y debería ser reconocida como tal por los que nos dedicamos a divulgar la ciencia —aunque también somos libres, si nos sentimos cómodos viviendo con tales peligros, para explicar por qué.

En tercer lugar, y mucho menos discutida hasta ahora, está la que podría llamarse la contribución política de la ciencia. No es casual que la publicación de los *Principia* de Isaac Newton en 1687 esté en las fuentes de la Ilustración. O que entre los fundadores de los movimientos democráticos en las colonias americanas y en otros lugares se encontrara un número desproporcionadamente alto de pensadores científicos. O que los científicos figuren hoy de forma destacada entre los movimientos disidentes en los países totalitarios. La ciencia es intrínsecamente antiautoritaria: reemplaza los sistemas de arriba-abajo de pensamiento político que Thomas Paine agrupaba bajo el término «despotismo», por un sistema de abajo-arriba, en el que cualquiera capaz de hacer observaciones competentes y realizar experimentos controlados puede ser acertadamente considerado como una fuente potencial de autoridad —una autoridad que reside no en el individuo sino en sus resultados.

La ciencia nos anima —en realidad, nos obliga— a vivir con la duda y la ambigüedad, y a apreciar la vastedad de nuestra propia ignorancia. Estos hábitos mentales han calado, hasta cierto punto, en el dominio de los asuntos políticos tanto como de los científicos. Como decía Richard Feynman, «El gobierno de los Estados Unidos se desarrolló bajo la idea de que nadie sabía cómo formar un gobierno, o cómo gobernar. El resultado es la invención de un sistema para gobernar cuando no se sabe cómo hacerlo. Y la forma de conseguirlo es permitir un sistema, como el que nosotros tenemos, en el que nuevas ideas puedan desarrollarse, ensayarse y desecharse».^[15]

Además, la práctica de la investigación científica exige libertad de expresión y de asociación. Ya

es suficientemente difícil hacer física sin que te digan también que no puedes ir a la mitad de las conferencias relevantes, y que tus ideas deben adecuarse a la filosofía oficial del gobierno. Esta exigencia de libertad hace aliados a científicos, escritores y artistas. También impone un handicap considerable a las naciones que tratan de competir en un mundo cada vez más científico y tecnológico mientras niegan la libertad a sus ciudadanos. Y así, en mi opinión, aunque la ciencia es responsable de haber inventado armas terroríficas, es también al menos parcialmente responsable del hecho de que casi la mitad de la humanidad vive ahora en sociedades más o menos democráticas, y que el año 2000 amaneció sobre un mundo en el que no había dos naciones en guerra. Culpada por construir bombas, la ciencia también combate por la libertad.

Para resumir: tecnológica, intelectual e incluso políticamente, la ciencia reside en algún lugar cerca del centro de nuestra cultura, por la que entiendo la sociedad de todas las personas que valoran su libertad, hacen honor a sus responsabilidades, conocen su ignorancia y están dispuestas a seguir aprendiendo. Y al mismo tiempo, sin embargo, la mayoría de los ciudadanos de estas mismas sociedades permanecen ajenos a la ciencia.

Todos los años leemos historias en los periódicos sobre lo que se está denominando «analfabetismo científico». Nos dicen, por ejemplo, que casi la mitad de los americanos niegan que los seres humanos hayan evolucionado a partir de especies animales anteriores, que una mayoría no saben que el sistema solar está localizado en la Vía Láctea, y que sólo la cuarta parte ha oído que el universo se está expandiendo. Tales conclusiones son lamentables, pero más preocupante todavía es el hecho de que tan pocos parezcan entender la ciencia como proceso.

Para mí no es tan terriblemente importante si un estudiante sabe, digamos, cuántos planetas hay en el sistema solar. Para empezar, los astrónomos todavía están discutiendo sobre si Plutón puede contarse como un planeta. Además, los estudiantes pueden obtener la respuesta «correcta» de una forma equivocada. Pueden haber aprendido de un libro que el Sol tiene nueve planetas, o se lo han oído decir en la televisión a un científico con voz autoritaria. Los hechos científicos adquiridos de esta forma no tienen un significado más profundo que el parloteo de un rey a los cortesanos, o la cháchara de un profesor diciendo que no puede haber tal cosa como el progreso porque así lo han dicho Nietzsche o Schopenhauer. El analfabetismo científico denunciado en los periódicos —como aquella ocasión en que un equipo con cámara oculta, espionando a graduados universitarios con sus togas y birretes en el día de la graduación, descubrió que muchos de ellos no sabían cuál es la causa de las estaciones— es preocupante principalmente como síntoma de un problema más profundo: que no han aprendido cómo se investigan tales cuestiones. Al fin y al cabo, lo que uno piensa es menos importante que cómo lo piensa.

Se nos ha dicho que a los estudiantes no se les enseña lógica, que no saben cómo razonar, pero eso no es ni la mitad de la historia. Tuvimos lógica durante miles de años antes de que tuviéramos ciencia real, y lo que aprendimos era que la lógica puede producir fantásticos conjuntos de conclusiones que tienen poco que ver con el mundo. En otras palabras, hay un número infinito de universos lógicamente consistentes; la ciencia pregunta en cuál de estos universos vivimos realmente. Los estudiantes que no han aprendido esto han fracasado en captar la ciencia, independientemente de que puedan construir un silogismo o decir que el neón es un gas noble. Para ellos, la ciencia es una máquina peligrosa que opera de formas tan misteriosas como los hechizos. Poco sorprende, entonces, que haya tantas personas que temen y desconfían de la ciencia, de modo que en las películas y obras de TV —que pretenden reflejar el modo de pensar de la gente— es más probable que mueran violentamente los científicos que los miembros de cualquier otra profesión, incluyendo a los pistoleros.

Una razón para divulgar la ciencia es ayudar a la gente a entrar en contacto con su propia

cultura en desarrollo. Esta cultura tiene, por supuesto, muchas otras y más viejas raíces, tales como el arte, la religión, la filosofía y la historia. Éstas son más familiares, habiendo cumplido los mil años de permanencia de Whitehead, y por ello parecen más naturales. Pero nada es más natural que la ciencia, porque nada ha hecho más por mostrarnos cómo funciona realmente la naturaleza. Parte del trabajo del divulgador de la ciencia es ayudar a la gente a darse cuenta de esto, de modo que puedan vivir mejor en un mundo integrado antes que en un mundo dividido y en guerra consigo mismo.

Sin embargo, los divulgadores no hemos hecho un trabajo muy bueno hasta ahora. Durante décadas hemos estado haciendo programas de TV sobre ciencia, y escribiendo libros y artículos en revistas e historias para las secciones científicas de los periódicos. Pero aún nos encontramos viviendo en una nación donde, según un estudio, menos del 7 por 100 de los adultos pueden calificarse de científicamente ilustrados según la definición más generosa, sólo un 13 por 100 tiene al menos un nivel mínimo de conocimientos del proceso de la ciencia, y un 40 por 100 cree en la astrología.

¿Dónde nos equivocamos?

Bien; para empezar, somos pocos. Solamente hay unos 3000 escritores sobre ciencia en Estados Unidos, y quizá 10 000 en todo el mundo, muchos de los cuales trabajan por cuenta propia y hacen colaboraciones periodísticas ocasionales mientras mantienen sus trabajos cotidianos. Las buenas noticias son que hoy hay más escritores sobre ciencia de los que solía haber, y que, en grado creciente, estamos siendo ayudados por científicos con talento para la escritura que también han alcanzado audiencias razonablemente amplias. Pero podríamos reclutar más miembros.

La apremiante necesidad cívica de más periodistas científicos no es, sin embargo, mi principal motivo al urgir a los jóvenes escritores para que se planteen el cubrir la ciencia. En realidad, yo no creo mucho en practicar el arte por el bien público; escribir ya es suficientemente duro de hacer por razones egoístas, sin tener que cargarse también con esperanzas de mejorar al gran público. Lao Tse decía que gobernar una gran nación es como cocinar un pequeño pez. Escribir también lo es. Uno no tiene que obsesionarse con ideas acerca de lo bueno que es para la gente el comer pescado y que todo el mundo debería comer más pescado. Todo lo que uno tiene que hacer es cocinar un pescado, adecuadamente, cada vez. Yo digo a mis estudiantes que la ciencia es una gran historia —la historia más grande, en cierto sentido— y que al escribir sobre ciencia pueden abrir perspectivas sobre cualquier otra cosa. Eso es al menos lo que me sucedió a mí.

Cuando yo empecé como periodista, entre mis colegas todavía podían encontrarse reporteros duros a la vieja usanza que se mostraban orgullosos de su falta de formación y que miraban con desdén cualquier cosa que se pareciera a una reflexión. Algunos ni siquiera escribían: conseguían la historia y luego la llevaban a lo que se denominaba «mesa de reescribir», donde se le daba forma. Muchos de estos hombres —y en aquellos días casi todos eran hombres— eran excelentes reporteros, hábiles y experimentados en patear y cubrir los ayuntamientos, los tribunales y las redadas de la policía. Pero la ciencia no formaba parte de su mundo.

Para que se hagan una idea de esta época, permítanme citar unas pocas líneas de una entrevista realizada por un reportero para el *Wisconsin State Journal* en abril de 1929. El entrevistado era el físico visitante Paul Dirac, quien era famoso por su laconismo, aumentado en respuesta a estas preguntas.

El reportero preguntaba: «Ahora, doctor, ¿podría darme, en pocas palabras, información de todas sus investigaciones?».

DIRAC: «No».

PERIODISTA: «¿Sería correcto si lo planteo así: “El profesor Dirac resuelve todos los problemas de la física matemática, pero es incapaz de encontrar una forma mejor de calcular el promedio de bateo de Baby Ruth”?».

DIRAC: «Sí».

PERIODISTA: «¿Qué es lo que más le gusta de América?».

DIRAC: «Las patatas».^[16]

Nos hemos hecho un poco más cerebrales desde entonces. Hoy, la mayoría de los periodistas tienen títulos universitarios, y estoy encantado de decir que la mayoría de los licenciados en periodismo hoy en Estados Unidos son mujeres, de modo que nosotros los periodistas podemos presumir al menos de estar por delante de algunas ciencias en explotar la fuerza cerebral de la otra mitad de la especie humana. En los noticiarios de los medios de comunicación, donde el sesgo anticientífico ha sido especialmente fuerte, las actitudes están empezando a cambiar. Y, en parte, ello se debe a Internet. El 20 de julio de 1976 la nave *Viking* se posó en Marte precisamente en el instante en que los programas matutinos de las grandes cadenas estaban en el aire, en directo en la Costa Este. Pese a todo, sus productores declinaron emitir las primeras imágenes en directo desde la superficie de Marte. Veinte años más tarde, cuando la *Pathfinder* aterrizó en Marte, el número de personas que visitaron la página web de la *Pathfinder* para ver las imágenes superó a las audiencias combinadas de aquellos tres programas de la mañana.

Así que los productores estaban equivocados. La gente está interesada en la ciencia, y hay una audiencia para los programas científicos. Una encuesta, llevada a cabo por la National Science Foundation en 1995, encontró que el 86 por 100 de los americanos estaban de acuerdo en que «la ciencia y la tecnología están haciendo nuestras vidas más sanas, más fáciles y más confortables», y que el 72 por 100 estaban de acuerdo en que los beneficios de la ciencia son mayores que cualesquiera efectos dañinos. En términos de confianza, el público colocaba a los científicos en segundo lugar, sólo por detrás de los médicos, y seguidos de los jueces del Tribunal Supremo de Estados Unidos. (En el último lugar de la lista, dicho sea de paso, estaban el Congreso, la prensa y la TV).^[17]

Pero aunque hay una audiencia y está siendo servida algo mejor que en el pasado, sigue existiendo el problema de cómo hacer entender lo que es realmente la ciencia: su funcionamiento como un proceso, como una forma de acercarse al mundo. A esta cuestión deseo dedicar el resto de este ensayo.

Muchos americanos quieren saber más sobre la ciencia, pero no están suficientemente familiarizados con ella para entender de qué trata la investigación científica. Para ellos, leer un informe sobre la investigación en células madre o la cartografía de la radiación cósmica de fondo realizada desde un globo es como leer la puntuación de un partido de *cricket* si uno no ha jugado nunca al *cricket* ni lo ha visto jugar. Es fácil echar la culpa de esta situación a nuestras escuelas, y quizá haya algo de razón en ello. Sólo una quinta parte de los americanos graduados en enseñanza secundaria han tomado cursos de física, y de los que lo han hecho, sólo la cuarta parte han recibido enseñanzas de alguien que tenía un título en física, y sólo una pequeña fracción de dichos profesores habían hecho investigación en física. ¿Cómo lo harían los equipos de fútbol de los institutos si las tres cuartas partes de los entrenadores no hubieran estudiado nunca el fútbol y casi nadie lo hubiese jugado?

Pero las encuestas reflejan simplemente una realidad más amplia: que la ciencia no ha llegado todavía a integrarse en la corriente principal de la cultura. Esto hace difícil tratar de la ciencia en la televisión, las películas y otros medios de comunicación de la cultura popular, precisamente porque la ciencia es aún nueva, lo que significa que los desafíos planteados a los científicos en activo son poco familiares para el gran público. Una audiencia que llena una sala para ver una película de amor, de deportes o de guerra tiene alguna experiencia o una cierta comprensión de lo que es ganar o perder en el amor, los deportes o la guerra. No es éste el caso de la ciencia.

¿Cómo podría afrontarse este desafío?

En lugar de predicar en términos teóricos, ofrezco algunas escenas escritas para una película en

la que yo traté de abordar este problema. Era un largometraje, planeado por los Estudios Walt Disney, sobre la vida de Albert Einstein. La película no se rodó nunca; ni yo escribí el guión. Pero sí escribí algunas escenas que pretendían transmitir algunas de las ideas de Einstein. La mayoría de éstas implicaban secuencias con efectos especiales. Concebí la película como un musical sin cantar, en el que los efectos especiales ocupaban el lugar de las canciones. En otras palabras, hay pasajes en los que la audiencia es sustraída del flujo narrativo de la vida de Einstein y transportada al reino de sus pensamientos.

Entonces no me hacía muchas ilusiones, y pocas me hago hoy, por la dificultad de esta tarea. Tampoco presento este trabajo como solución del problema de formación de la audiencia que acabo de describir. Pero representa un esfuerzo por mi parte para combinar narrativa y biografía del pensamiento científico. Así que permítanme citar algo del mismo.

Así se abre el film:

Título en negro. El título se difumina. Fundido en negro. Una lámina de luz blanca deslumbrante: estamos viendo el big bang. Sonido de truenos a medida que el universo se enfría y expande. Una época de oscuridad descendi animada por chispas doradas, plateadas y azules de partículas de alta energía.

Tema musical.

En la oscuridad empiezan a formarse las galaxias: lucen débilmente remolinos en cuyos centros estallan cuásares brillantes. Ondas de choque barren las nubes de polvo y gas cercanas, provocando el nacimiento de miles de millones de estrellas en cada galaxia. Las explosiones sacuden las galaxias mientras éstas se separan por la expansión en curso del universo. En el fondo, el brillo del big bang desaparece lentamente, pasando de los tonos azules al rojo apagado por la expansión del universo. El brillo se desvanece en la invisibilidad, dejando la oscuridad del espacio como telón de fondo para las galaxias.

Nos acercamos a una galaxia —la Vía Láctea— que viaja por el espacio. Los brazos espirales barren el disco como un pincel de fuego. La galaxia evoluciona desde un predominio de estrellas azules brillantes a una rica mezcla de estrellas azules, rojas y amarillas. Volamos sobre el disco de la Vía Láctea, sobre el dorado bulto central, atravesamos los dos brazos espirales y nos hundimos en el disco, planeando a través de nubes de color rubí donde están naciendo nuevas estrellas bajo nubes que ascienden desde el disco como cabezas de coral.

Delante están las estrellas de la vecindad del Sol. Cruzamos el cúmulo de las Hiadas en Tauro —el cúmulo que veremos en el cielo en la infancia de Einstein y, más tarde, como fondo de un eclipse solar.

Nos acercamos al Sol, caemos hacia la Tierra, hacia América y, lentamente, entramos por el tejado de la casa de Einstein en Mercer Street en Princeton.

Primerísimo plano: la esfera amarillenta de una vieja brújula.

Corte a interior, estudio de Einstein, noche. La brújula está en la mano de Einstein. Él la gira lentamente y observa, tan cautivado como se sentía en la infancia, que la aguja mantiene su dirección.

Sigue una serie de escenas del Einstein que todos conocemos: el Einstein viejo, la leyenda, durante un día de su vida en Princeton. Esa noche, después de cenar, Einstein sube a su estudio. Se le ha prohibido fumar, pero guarda una pipa y tabaco escondidos; estaba buscándolos la noche anterior cuando encontró la brújula. Encuentra su pipa y la llena, la enciende y luego toma la brújula una vez más. Esta vez empezamos con la brújula en primerísimo plano, y avanzamos:

La aguja llena la pantalla. Tiembla con tensión, respondiendo al campo magnético de la Tierra. Más cerca: el alambre enrollado alrededor de la aguja de la brújula llena la pantalla. Más cerca aún: la superficie del metal del que está formado el alambre parece tan irregular y agujereada como la superficie de la Luna. Se ven cristales metálicos en la aguja a medida que seguimos avanzando; parecen tan regulares como las hileras de un tejado. Un solo cristal llena ahora la pantalla: es como estar en el interior de una catedral. Descendemos por capas hasta el nivel de los átomos, y llegamos al interior de un núcleo atómico. El núcleo se desintegra, y la pantalla se inunda repentinamente de luz blanca, idéntica a la luz blanca que vimos al principio en el big bang.

Zoom de retroceso hasta volver a la esfera de la brújula.

Corte a interior; hogar de infancia de Einstein en los arrabales de Munich, noche, 1885. Einstein, con cinco años de edad, está en cama con un catarro. La brújula está en las manos de su padre, Hermann. Es un regalo para el niño. Einstein la gira lentamente en su mano, sorprendido de que la aguja apunte siempre hacia el norte. Años más tarde recordará que su reacción era que «algo profundamente oculto tenía que

haber detrás de las cosas».

EINSTEIN: ¿Cómo funciona?

HERMANN EINSTEIN: Responde al campo magnético de la Tierra.

EINSTEIN: ¿Qué es un campo magnético?

HERMANN EINSTEIN: Es un tipo de energía enrollada alrededor del mundo.

EINSTEIN: ¿Alrededor de todo el mundo?

Corte a exterior, fuera de la casa de Einstein en los arrabales de Munich, por la tarde, uno o dos días más tarde. Einstein, con cinco años de edad, está sobre la hierba observando las estrellas del cúmulo de las Híadas cuando aparecen en el cielo azul-negro del atardecer.

Primer plano de Einstein. Una malla brillante de líneas doradas se refleja en sus ojos. Fuera de plano, la voz de su madre le llama para que entre.

Einstein, de espaldas, andando sin prisas hacia la puerta trasera de la casa mientras mira las estrellas. Por encima de él, proyectado por su imaginación, el campo magnético de la Tierra se extiende en el cielo de norte a sur. Está hecho de bandas doradas brillantes como los mimbres de una cesta. Cuando el niño cruza la puerta, la malla dorada no se desvanece.

La escena siguiente tiene lugar unos días más tarde, en la pequeña planta energética que el padre y el tío de Einstein han instalado en el patio trasero:

Interior, día, la planta eléctrica puesta en marcha por el padre de Einstein, Hermann, y su tío, Jakob, día. La tienda es ruidosa, agitada, hecha con cuatro cuartos, una aventura en la tecnología del día, aunque en este caso está destinada al fracaso.

Hermann y Jakob están reparando una pequeña dinamo. El joven Einstein lo observa.

EINSTEIN: ¿Qué hace eso?

JAKOB: Produce electricidad, Albert. Mira aquí. ¿Ves estos imanes? Cuando los giramos así, generan electricidad en estas bobinas de alambre.

EINSTEIN: ¿Cómo pasa la electricidad de los imanes al alambre, tío?

JAKOB: El giro crea un campo magnético.

EINSTEIN: ¿Como con la brújula?

JAKOB (CONTENTÍSIMO): Pues claro, eso es correcto, Albert. El imán produce la electricidad.

EINSTEIN: ¿Está ahora allí la electricidad?

JAKOB: No, ahora no. Los imanes tienen que estar girando para que produzcan electricidad. Por eso lo estamos reparando, para que los imanes puedan girar.

EINSTEIN: Así que es el movimiento el que produce la electricidad.

Saltaré algunas escenas, incluyendo una en Italia cuando Einstein, a los dieciséis años, se imagina montado en un rayo de luz y da con la idea fundamental de lo que iba a ser la teoría de la relatividad especial. Vayamos a sus años en la universidad:

Interior, día. Laboratorio de física de Herr Heinrich Weber en el Instituto Politécnico de Zurich. La luz entra por las ventanas, pero el laboratorio está en sombras. Weber está mostrando una dinamo a la clase. Es un tema importante para él, en parte porque su departamento en el Instituto se fundó con dinero proporcionado por los fabricantes de las grandes dinamos hidroeléctricas que entonces se estaban construyendo en los principales ríos de Alemania. Pero Weber, como todos los otros físicos de su tiempo, no entiende completamente cómo funciona una dinamo. Este fallo es especialmente embarazoso porque les impide predecir de forma precisa el rendimiento de las dinamos en las que tanto dinero se está invirtiendo.

La respuesta, empieza a ver Einstein, está en extrapolar las ecuaciones de campo de Maxwell. Pero Weber se niega incluso a enseñar las ecuaciones de Maxwell. En la clase, Einstein plantea a Weber cuestiones sobre la naturaleza del campo electromagnético en la dinamo, mencionando las ecuaciones de Maxwell. Weber, furioso, ordena finalmente a Einstein que salga del laboratorio.

Mientras sale Einstein, tras haber recogido sus libros...

WEBER: Su problema, Einstein, es que nadie puede decirle nada.

Interior, en el pasillo de fuera. Einstein baja al salón.

Exterior, Instituto Politécnico, día. Einstein cierra la puerta, sale de la oscuridad a una brillante luz solar y da un salto en el aire. Por el momento, es libre.

Corte a interior. La habitación de la batería en el Instituto Politécnico, a última hora de la noche. Herr Weber está realizando experimentos al límite de la electrocución, poniéndose él mismo como sujeto. Está sentado en una especie de silla eléctrica.

Weber coloca electrodos en sus brazos y piernas, humedece los contactos con salmuera para asegurar una buena conductividad, luego da una orden y un ayudante conecta el interruptor. Él es galvanizado por un millar de voltios de corriente alterna. Einstein y sus amigos, ocultos en un escondite en el techo del ático, observan. Los amigos están sorprendidos. Einstein no. Ya ha aprendido que el mundo de los asuntos humanos está al menos medio loco.

Finalmente, dos escenas que tienen que ver con la relatividad general.

Exterior. Isla del Príncipe en la costa africana, día. Arthur Stanley Eddington y sus colegas astrónomos han plantado tiendas de campaña, un telescopio y una cámara para registrar el eclipse. Ráfagas de viento y lluvias intermitentes dificultan sus esfuerzos, sacudiendo las tiendas. Nubes ligeras oscurecen el Sol, ahora reducido a un creciente por el eclipse en curso. En el último momento se abre un claro entre las nubes que permite a los astrónomos fotografiar el eclipse.

Exterior, el eclipse solar tal como se ve desde el espacio. La Luna se desliza entre la Tierra y el Sol, arrojando una sombra gigante que barre rápidamente el océano y se acerca a la isla. Las estrellas del cúmulo de las Hiadas rodean al Sol eclipsado, brillando a través de su corona rosa-y-blanca. Cuando el Sol pasa por delante del cúmulo, las estrellas se desplazan en el cielo (como hemos visto antes en un experimento mental).

Exterior, el lugar de observación del eclipse. Llega el eclipse total, una visión sorprendente. Los ayudantes están boquiabiertos. Uno llama repetidamente a Eddington para que lo vea. Eddington, inclinado sobre la cámara, ocupado en tomar fotografías, nunca levanta la vista.

Corte a interior, una tienda en la isla, noche. Una improvisada habitación oscura. Lluve fuera. El viento hace ondear las paredes de las tiendas. Eddington está inclinado sobre las bandejas, revelando las primeras fotografías del eclipse. Toma un negativo, aún húmedo, lo pone en la mesa, coloca un mapa de estrellas transparente sobre él. Las estrellas se han desplazado de sus posiciones normales en el cielo. Toma un segundo mapa, el de la predicción de Einstein, lo extiende sobre la fotografía. Las estrellas caen donde estaba predicho.

Corte a interior. Despacho de Einstein en Zurich, 27 de septiembre de 1919. Einstein lee pasajes de un libro sobre relatividad a una estudiante, Ilse Rosenthal Schneider.

EINSTEIN (LEYENDO EN VOZ ALTA): «Einstein es completamente ininteligible». ¡Qué maravilloso reconocimiento por parte del autor!

Llega un mensajero con un telegrama. Einstein lo abre y lo lee distraídamente.

Primer plano del telegrama. Dice: «Eddington encontró desplazamiento de estrellas en el borde del Sol. Medida preliminar entre nueve décimas de segundo y el doble de este valor».

EINSTEIN (PASÁNDOLE EL TELEGRAMA): Esto podría interesarte.

Ella lo lee.

ILSE: ¡Es maravilloso! ¡Éste es precisamente el resultado que predice su teoría!

EINSTEIN (EN TONO DE BROMA): ¿Lo dudabas?

ILSE: Bueno, no. Claro que no, pero ¿qué hubiera dicho usted si la observación del eclipse no hubiera confirmado la teoría?

EINSTEIN: Lo hubiera sentido por el buen Dios. La teoría es correcta.

Lo que trato de hacer aquí es, por supuesto, llevar la ciencia a una amplia audiencia, a través de una personalidad famosa —el «Hombre del siglo» para la revista *Time*— y transmitir algo de su pensamiento mediante metáforas, relatos y efectos especiales. Uno de los objetivos es mostrar que sus ideas no son simplemente ideas, sino que están ligadas a la observación y el experimento. Einstein está impávido, no porque sea arrogante sino porque es valiente. Es como un héroe tradicional que se embarca en un lance amoroso o entra en combate. Sabe que el veredicto del experimento puede ser peligroso, como lo son el amor y la guerra, pero enfrentarse al peligro con espíritu alegre y confiado es parte de su trabajo.

En conclusión, déjenme decir que es un placer poder escribir sobre alguien como Einstein, y durante años he tenido la suerte de encontrar varios científicos destacados que son un ejemplo no sólo por sus logros intelectuales sino también por su carácter. Gran parte del periodismo tiene que ver con desenterrar secretos, hacer que la gente te cuente cosas que no quiere que se sepan, hurgar entre los engaños y simulaciones para llegar a la verdad. Pero aunque los científicos son seres humanos y difícilmente están libres de las debilidades humanas, la ciencia

en general es mucho más abierta que la política o las finanzas. La ciencia es una especie de agujero blanco del que brota información, y la posición por defecto de la mayoría de los científicos que he encontrado es explicar lo máximo posible, y lo más claramente posible, sobre lo que ellos piensan que son los hechos de la naturaleza.

Esto se me manifestó con especial claridad un día hace años cuando estábamos rodando un film llamado *La creación del Universo*. Estábamos en el CERN, el Centro Europeo para Investigación Nuclear, cerca de Ginebra, en Suiza. El equipo de rodaje necesitaba tiempo para montarlo todo, lo que me dejaba poco que hacer salvo ensayar mis líneas. Así que recorrí las salas, y cada vez que veía una puerta abierta con alguien dentro trabajando, entraba y preguntaba qué estaban haciendo. Ninguno de estos científicos, interrumpido en medio del trabajo por un completo desconocido, me echó ni trató de librarse de mí con una respuesta brusca. En lugar de ello, cada uno de ellos se puso a contarme, de la forma más eficaz posible, todo sobre su investigación. Me pregunto cómo sería el mundo si hubiera más gente así.

Además, muchos científicos dedican tiempo a escribir sobre ciencia para amplias audiencias. Hay, por supuesto, razones interesadas para ello, que implican no sólo el ganar dinero o fama, e informar a un público cuyos impuestos sirven para financiar la investigación, sino también alcanzar claridad interna. Niels Bohr insistía en que la física, por fantástica que fuera, debía ser explicada en última instancia en el lenguaje ordinario. Ernest Rutherford solía decir que a menos que uno pueda explicar su teoría a una camarera, la teoría será probablemente mala. Uno de los mejores entre los científicos divulgadores es el hombre a quien honramos en este Festival Kip —no sólo por sus logros intelectuales sino también por su carácter. Yo conozco a Kip desde hace muchos años, no sólo como científico— uno de los máximos investigadores mundiales del universo en expansión abierto por la relatividad de Einstein sino también como hombre íntegro. Durante todo ese tiempo, ni una sola vez he visto a Kip decir una palabra de desánimo, denigrar egoístamente a un colega o darse excesiva importancia, hacer las cosas deprisa para ahorrarse el trabajo duro, u ofuscarse, falsear o fingir.

Yo no creo que después de la muerte nos veamos delante de san Pedro o algún otro juez que revise nuestras vidas, pero la idea de un juicio semejante proporciona una excelente forma de meditación diaria. Pues al final, la cuestión no es sólo qué piensas y cómo actúas y qué consigues, sino quién tuvo esas ideas e hizo estas acciones y consiguió estas cosas. Diógenes, caminando por el ágora con una linterna en la mano a plena luz del día y preguntado por lo que estaba haciendo, decía: «Busco un hombre». Todavía hoy se discute el verdadero sentido de su afirmación y normalmente se cita como «Busco un hombre honesto», pero la honestidad sólo es una parte. Diógenes quería decir que estaba buscando un *hombre* —alguien que pueda decir, «yo sé quién es quien hace mi trabajo y tiene mis ideas, y las defiende, y asume la responsabilidad de ellas». Si Diógenes hubiera encontrado a Kip en el ágora aquel día, podría haber apagado su linterna.

El físico como novelista

ALANLIGHTMAN

Kip Thorne ha escrito unos cuarenta artículos para el gran público. En 1971, cuando yo tuve la suerte de convertirme en uno de los alumnos de doctorado de Kip, vi un día en la oficina de la secretaria una pila de reimpresiones de su artículo «Muerte de una estrella» que había ganado un premio para artículos de divulgación científica. Hoy día, muchos científicos escriben para el gran público, pero en 1972 el número era minúsculo. «Muy interesante», pensé para mí. «Así que Kip está robando parte de su precioso tiempo de investigación para escribir para el público». Tomé nota. Revisé mi imagen del joven y brillante físico de barba roja que llevaba túnicas africanas, que parecía trabajar día y noche garabateando fórmulas en sus hojas de papel blanco liso, que nos decía a los atemorizados estudiantes en el primer día de clase que le llamásemos «Kip», y que se enzarzaba en discusiones científicas con personas llamadas Yakov Borisovich Zel'dovich y Vladimir Braginsky e Igor Novikov. De modo que Kip era también un escritor. Tomé nota. Mi opinión sobre la faceta literaria de Kip se reforzó cuando nos devolvió a mi compañero de estudios David Lee y a mí el borrador de nuestro primer artículo científico, inundado de tinta roja. Una nota adjunta decía: «La aceptación de vuestros artículos, y el impacto que tengan, dependerán mucho de cómo estén escritos». Me atrevería a conjeturar que pocos científicos, entonces y ahora, hacen comentarios tan detallados y útiles sobre la calidad de la escritura de sus estudiantes.

En la época en que era estudiante de doctorado en el grupo de relatividad de Kip, yo ya tenía un gran interés en escribir. De hecho, desde la infancia había compartido la pasión por las ciencias y las artes. En el instituto construía cohetes y también escribía poesía. Estos intereses dobles tendían a dividir a mis amigos en dos grupos, y a menudo yo mismo me sentía dividido. Aproximadamente siete u ocho años después de mi doctorado en física teórica, mis intereses literarios afloraron y empecé a escribir ensayos de divulgación científica. El ensayo es un género extraordinariamente flexible. En el ensayo se puede ser informativo o filosófico, personal o poético. Pronto empecé a experimentar con el ensayo, ampliando sus límites, y escribí algunas piezas extrañas que podrían llamarse fábulas: mitad hechos, mitad ficción, tratando siempre con la ciencia pero de una manera oblicua. La ciencia como metáfora. La ciencia como una forma de ver el mundo. Hace aproximadamente una década abandoné por completo el terreno firme y entré de lleno en la ficción.

Una mañana me desperté y descubrí que me había convertido en un miembro de una segunda comunidad. Utilizo aquí la palabra «comunidad» en un sentido vago, porque la comunidad de escritores es muy diferente de la comunidad de científicos. Un científico en activo está en estrecho contacto con docenas de otros científicos, suele hacer su investigación en una universidad o laboratorio entre otros científicos, imparte seminarios sobre investigación reciente, telefonea o escribe *e-mails* diariamente a otros colegas, intercambia artículos antes de que se publiquen y asiste a varios congresos cada año. Por el contrario, los escritores trabajan aislados. Las dos organizaciones más importantes de escritores, el PEN Club y la Author's Guild, tienen como fin principal el defender los derechos legales y políticos de los escritores y conceder premios. La mayoría de los escritores no asisten a encuentros. La mayoría de los escritores escriben en casa, solos.

Un novelista puede pasar cinco años trabajando en un libro. Durante estos cinco años podría hablar con uno o dos escritores más cada seis meses, hablar con su agente un par de veces, hablar con un editor al cuarto año. Ocasionalmente puede asistir a una feria del libro u ofrecer una sesión de lectura con otros dos escritores. Un novelista vive en el desierto. Sabe de la existencia de otros novelistas principalmente a través de las huellas ocasionales con que topa,

en forma de libros y reseñas. Lee los libros de otros escritores con admiración y celos, y luego regresa a su celda individual. Ésa es la comunidad de escritores.

Como miembro de estas dos comunidades, tal como son, yo me he sentido fascinado por sus diferentes formas de trabajar, sus diferentes formas de pensar, sus diferentes formas de aproximarse a la verdad. Y, al mismo tiempo, por las similitudes. Boston, donde yo vivo, es una ciudad donde abundan ambos tipos —escritores y científicos— y a veces, cuando viajo en el metro, juego conmigo mismo y trato de identificar a los literatos o a los científicos por su aspecto. Ese tipo que mira la oscuridad a través de la ventana con una expresión de intriga en su rostro, con pantalones verdes a cuadros y camisa de nailon con cuadros escoceses, una funda con cuatro plumas en su bolsillo delantero, un maletín gastado que debería haber sido licenciado hace una década..., apuesto a que es un físico teórico. Y ese tipo de la chaqueta de *tweed* y pana, despeinado y con una cuidada barba de dos días, con gesto adusto, un cuaderno en donde garabatea mientras observa atentamente a cada pasajero del tren, que me examina ahora cuando yo le examino a él... apostarí a que es un escritor... Pero encuentro que estos estereotipos basados en la apariencia no siempre funcionan. Guardo mi propio cuaderno y calculo cuántos minutos quedan hasta la parada de Kendall Square.

Una gran diferencia que he encontrado entre físicos y novelistas, o entre científicos y artistas en general, se refiere a lo que yo llamaría «poner nombre a las cosas». Hablando en términos muy generales, los científicos tratan de poner nombre a las cosas y los artistas tratan de evitar el dar nombre a las cosas. Hay muchos aspectos en esta diferencia. Describiré algunos.

Para dar nombre a un objeto hay que tomarlo, hay que destilarlo y purificarlo, hay que tratar de identificarlo con claridad y precisión. Uno ha puesto una caja encima de él y ha dicho: «Lo que hay en esta caja es el objeto, y lo que no hay no lo es». Por ejemplo, consideremos la palabra «electrón», un tipo de partícula subatómica. Por lo que sabemos, todos los tropecientos millones de electrones del universo son idénticos. Sólo hay un tipo de electrón. Y para un físico moderno la palabra «electrón» significa una ecuación concreta, la ecuación de Dirac con operadores de campo. Esta ecuación resume de forma cuantitativa y matemáticamente precisa todo lo que sabemos sobre los electrones, todas las interacciones, todo lo que sería medido por nuestros colisionadores de átomos y calibres y magnetómetros. Las energías de los electrones en diversos tipos de átomos, las desviaciones y los giros concretos de los electrones debidos a campos eléctricos y magnéticos concretos, los minúsculos efectos de los electrones y sus antipartículas que se materializan a partir de la nada y desaparecen de nuevo —todo lo cual puede predecirse de forma precisa con muchas cifras decimales mediante la ecuación de Dirac con operadores de campo. Se puede discutir este o aquel aspecto de los electrones, si un electrón gira como una peonza o se invierte, si está en órbita o se cierne inmóvil, si se dispersa como una onda o se concentra como una semilla de amapola, pero la ecuación de Dirac da una representación mucho más precisa y objetiva del electrón. En sentido estricto, el nombre de electrón se refiere a dicha ecuación. Los físicos modernos conocen y aman la ecuación de Dirac. Los científicos se proponen expresar todos los objetos físicos del universo con la misma precisión. Poder nombrar así a las cosas da una gran comodidad, una sensación de poder, una sensación de control.

A los objetos y conceptos con los que trabaja el novelista no se les puede dar un nombre. El novelista podría utilizar las palabras «amor» o «miedo», pero estos nombres no resumen ni transmiten mucho al lector. Para empezar, hay mil tipos diferentes de amor: está el amor que uno siente por la madre que le escribe todos los días durante el primer mes que pasa fuera de casa en un campamento de verano; está el amor que uno siente por una madre que le da una bofetada cuando llega a casa conduciendo bebido desde el baile, y luego le abraza; está el amor que uno siente por un hombre o una mujer con quien acaba de hacer el amor, el amor que uno siente por un amigo que te llama para apoyarte cuando acabas de separarte de tu mujer. Y

muchos más. Pero no son sólo los diferentes tipos de amor lo que impide al novelista dar nombre verdaderamente al objeto. Es que la sensación de amor, la sensación concreta entre los mil tipos diferentes de amor, el dolor concreto, debe ser mostrado al lector, y no nombrado, pero mostrado a través de las acciones de los personajes.

Y si el amor se muestra en lugar de ser nombrado, cada lector lo experimentará, y lo hará a su propio modo. Cada lector disfrutará de sus propias aventuras o desventuras con el amor. El amor significa una cosa para una persona y otra cosa totalmente diferente para otra. Todos los electrones son idénticos, pero cada amor es diferente. El novelista no quiere eliminar estas diferencias, no quiere clarificar y destilar el significado del amor de modo que quede un significado único, como la ecuación de Dirac, porque ninguna destilación semejante podría representar el amor. Y cualquier intento de una destilación semejante destruiría la autenticidad de las reacciones de los lectores, destruiría la experiencia creativa y participativa que tiene lugar cuando un buen lector lee un buen libro. En cierto sentido, una novela no está completa hasta que no es leída por un lector. Y cada lector completa la novela de una forma diferente.

Ahora bien, en este asunto de poner o no poner nombres hay mucho más que la identidad de los electrones frente a las variedades del amor. Incluso un mismo lector cambia de un momento de su vida al siguiente. Su experiencia y su relación con el mundo cambian y, en consecuencia, el significado de la historia o un personaje o incluso una simple palabra cambian con él en el curso del tiempo. Una vez asistí a una conferencia de la Asociación del Lenguaje Moderno, que es la suprema organización profesional para críticos literarios y profesores de inglés, y había una sesión dedicada a la ciencia como literatura. Uno de los profesores se levantó y dijo que el texto científico ideal debería ser tan conciso, claro y exacto —tratando como lo hace con un mundo de exactitud— que un lector sólo necesitaría leerlo una vez. Pero el texto literario ideal, tal como una novela, sería un texto que un lector tuviera que leer una y otra vez, porque tendría las complejidades y ambigüedades del comportamiento humano, y con cada nueva lectura el lector estaría en un momento diferente de su vida y apreciaría cosas diferentes y sacaría algo nuevo del libro.

Daré otro ejemplo de la diferencia entre poner y no poner nombres. Permítanme representar la ciencia por una escritura ensayística. Igual que la ciencia, una obra de ensayo adopta un enfoque reduccionista y razonado acerca del mundo. Uno tiene una posición o argumento, estructura su argumento en pasos lógicos, amontona hechos y evidencias para convencer a sus lectores de cada afirmación, y lleva a su lector por una ruta más o menos directa desde cierto punto de partida a un punto final con un conocimiento aumentado. Todos aprendemos que en el ensayo resulta excelente empezar cada párrafo con una sentencia categórica. Una sentencia categórica, en efecto, pone nombre a la idea del párrafo. Empieza por decir al lector lo que va a aprender en el párrafo y cómo debe organizar sus ideas.

Pero en la escritura de ficción, una sentencia categórica suele ser fatal, pues la fuerza de la escritura de ficción es emocional y sensual. Uno quiere que su lector sienta lo que uno está diciendo, que lo oiga y lo huelga, que sea parte de la escena. Uno quiere que su lector no mire a otro lado, para hacerle ir a ese lugar mágico. Cada lector viajará de forma diferente, dependiendo de sus propias experiencias vitales. Decir de entrada al lector cómo se supone que debe pensar sobre algo anula el viaje. Y si hay una idea involucrada —y muchas novelas tratan con ideas tanto como con personajes y narraciones— uno no quiere establecerla directamente, sino dejar que se vaya filtrando lenta y gradualmente, por los bordes, de modo que el lector debe barrer el terreno una y otra vez buscando significado, embrujado. Con una sentencia categórica no se deja lugar para la propia imaginación y creatividad del lector. La diferencia entre estos dos tipos de escritura puede establecerse en términos corporales. En la escritura ensayística uno quiere llegar al cerebro del lector. En la escritura creativa, uno quiere puentear al cerebro y llegar a las tripas o el corazón.

Un patrón de pensamiento íntimamente relacionado con poner nombres es la tradición de formular problemas en términos de preguntas y respuestas. Normalmente los científicos trabajan buscando problemas interesantes que luego descomponen en partes, cada una de las cuales puede ser dilucidada en términos de una pregunta precisa con una respuesta precisa. De hecho, una buena parte del juego de la ciencia consiste en plantear un problema con precisión y claridad suficientes para garantizar una solución. Entonces se construye el mundo, pieza a pieza, a partir de estos problemas solubles. Por ejemplo, un problema científico típico podría ser: ¿cómo cambia una estrella con el tiempo? Una pieza de este problema sería: ¿cuál es la estructura de una estrella con una composición química dada y una presión y densidad dadas en su centro? Éste es un problema bien planteado y con una solución definida. Otra pieza de este problema sería: ¿cuál es la tasa de las reacciones nucleares de una mezcla dada de hidrógeno y helio gaseosos a una temperatura y densidad dadas? Y así sucesivamente. A los científicos se les enseña desde el principio de su aprendizaje que no deben perder el tiempo en preguntas que no tienen respuestas claras y definidas.

Pero los artistas no suelen preocuparse por la respuesta porque no existen respuestas definidas. Las ideas en una novela o un cuadro son complicadas debido a la intrínseca ambigüedad de la naturaleza humana. En realidad, las exquisitas contradicciones e incertidumbres del corazón humano hacen la vida interesante. Son ellas la causa de que las acciones de los personajes de una buena novela puedan debatirse incesantemente, de que reaccionemos visceralmente a Gore o a Bush, de que Dios sostuviera la manzana frente a Eva y luego le prohibiera comérsela. Para los artistas hay muchas preguntas interesantes sin respuestas, tales como ¿Qué es el amor?, o ¿Seríamos más felices si viviéramos hasta los 1000 años?, o ¿Por qué nos parece bella una puesta de sol? De hecho, para muchos artistas la pregunta es mucho más importante que la respuesta. Como escribió hace un siglo el poeta Rainer Maria Rilke: «Deberíamos tratar de amar las preguntas mismas, como habitaciones cerradas y como libros que están escritos en una lengua muy extraña».^[18]

Una consecuencia de esta diferencia entre tener o no tener respuestas definidas se manifiesta en el trabajo diario de un científico frente al de un artista. Cuando yo trabajaba en física, a veces quedaba atrapado por un problema científico de modo que no podía pensar en nada más; me consumía de día y seguía por la noche, inclinado sobre la mesa de la cocina con mi pluma y cuaderno de papel blanco mientras el mundo dormía. Trabajaba infatigable, electrificado, hasta mucho más allá del amanecer.

Como escritor, incluso cuando escribo a gusto, no puedo escribir más de seis horas de un tirón. Después de eso estoy exhausto, y mi visión está nublada por las sutilezas e incertidumbres inherentes del trabajo. Entonces debo esperar a que las palabras cambien y se fijen en la página y a recuperar mi fuerza.

Pero como científico podría estar atrapado durante días enteros, días sin descanso, porque yo quería conocer la respuesta. Quería conocer el comportamiento revelador de la materia que cae en espiral a un agujero negro, o la temperatura máxima de un gas de electrones y positrones, o lo que queda después de que un cúmulo estelar ha perdido masa lentamente y se ha contraído y colapsado. Cuando abordaba un nuevo problema, me sentía obligado porque sabía que había una respuesta definida. Sabía que las ecuaciones conducían inexorablemente a una respuesta, una respuesta que nunca antes se había conocido, una respuesta que me estaba esperando. Esa certeza y ese poder, y el intenso esfuerzo que provocan, no pueden encontrarse en la mayoría de las demás profesiones.

Como persona formada en la ciencia y en las diversas maneras de poner nombre a las cosas he mantenido una lucha constante como escritor de ficción. El gran tira y afloja de mi vida en la escritura, y en mi vida en conjunto, ha sido la tensión entre lo racional y lo intuitivo, lo lógico frente a lo ilógico, la certeza frente a la incertidumbre, lo lineal frente a lo no lineal, lo

deliberado frente a lo espontáneo, lo predecible frente a lo impredecible. Yo experimento esta tensión como un retortijón constante en mi estómago cuando soy consciente de mi cuerpo, y siempre como una conmoción mental. He aprendido a vivir con esta incomodidad. Realmente puede ser una fuente de fuerza. Con el tiempo he llegado a creer que tanto la certeza como la incertidumbre son necesarias en el mundo. Quizá esta idea sea obvia para la mayoría de las personas, pero no es tan fácil de reconocer para alguien formado en las ciencias.

Incluso como escritor, hay una gran diferencia entre no ficción y ficción. Cuando escribo ensayos o informes o artículos sobre ciencia sé que puedo investigar un tema, recopilar mi material, esbozar una presentación. En resumen, siento que tengo el control. Sé muy bien dónde voy. Cuando escribo ficción no siento que tengo el control. No puedo predecir lo que va a suceder. Sé que debo dar a mis personajes de ficción la libertad y la vida suficientes para que puedan sorprenderme. Después de eso, un personaje puede decidir que no le gusta mi argumento. Puede hacer algo que desbarata toda una escena, quizá todo el libro. Gracias por eso, digo yo, y me asombro en silencio. La escritura de ficción me pone nervioso. Me hace feliz, pero nervioso.

He aquí cómo una persona desgarrada entre las virtudes de la certeza y la incertidumbre crea un personaje. En mi primer borrador, tengo los perfiles de un personaje. Pero sólo los perfiles, porque en realidad un personaje se define a sí mismo por su forma de actuar en diversas situaciones, y si yo no sé por adelantado cómo va a actuar un personaje, yo no conozco al personaje. Después del primer borrador y todas sus sorpresas desagradables, yo tengo una mejor idea del personaje. En mi segundo borrador, con mi conocimiento más profundo, reviso el personaje, mejorando diálogos que ya no son muy correctos, modificando acciones que ahora parecen inconsistentes. Tras el segundo borrador tengo una comprensión aún más profunda del personaje y repito el proceso. De esta manera, el personaje se construye mediante una serie de aproximaciones.

Cuando pienso ahora sobre este método para desarrollar un personaje, desconfío. Es demasiado lógico. Crear buenos personajes no es mi punto fuerte. Encuentro más fácil crear escenas y atmósferas. Valoro la originalidad por encima de cualquier otra cosa. Como cabría esperar de alguien formado en la ciencia, las ideas juegan un papel fundamental en mi escritura, pero las ideas, en la ficción, deben ser manejadas como explosivos peligrosos. Las ideas pueden destruir un cuento o una novela cuando los personajes se hacen portavoces del programa intelectual del novelista. Es mejor que las intenciones intelectuales del novelista no irrumpen por la entrada principal, sino que se deslicen silenciosamente por la puerta trasera.

Ahora quiero decir algo sobre la base esencial común al físico y al novelista.

Existe la creencia popular de que los novelistas lo construyen todo y los físicos no construyen nada. Ambas ideas son falsas. La inventiva y la imaginación creativa han sido siempre sello de los buenos físicos, tanto como de los buenos novelistas. Por otra parte, los novelistas deben atenerse a cierto corpus de verdades reconocidas sobre la naturaleza humana, igual que los físicos deben atenerse a la verdad sobre la naturaleza no humana.

Los físicos teóricos, en especial, trabajan en un mundo mental. Es un mundo matemático y abstracto. La realidad física se representa mediante modelos simples que pueden ser visualizados, o por ecuaciones matemáticas que pueden escribirse en una hoja de papel. Por ejemplo, un físico puede imaginar un peso colgado de un muelle, oscilando arriba y abajo, y puede fijar esta imagen mental con una ecuación. Si la fricción del aire se convierte en un matiz indeseado, imagina simplemente que el peso está en un vacío. Ningún peso real colgado de un muelle existe en un vacío perfecto, pero miles lo hacen en la mente de los físicos.

Einstein resaltaba a menudo la importancia de lo que él llamaba la «libre invención» de la mente. El gran físico creía que no podemos llegar a las verdades de la naturaleza sólo por la observación y el experimento. Más bien necesitamos crear conceptos, teorías y postulados de

nuestra propia imaginación, y sólo más tarde confrontar estas construcciones mentales con la experiencia.

Una de las mejores ilustraciones de la libre invención de Einstein en ciencia fue su trabajo sobre la teoría de la relatividad especial, una teoría que condujo a conceptos radicalmente nuevos de espacio y tiempo. Dicho trabajo empieza con el sorprendente postulado de que la velocidad medida de un rayo de luz es siempre la misma, independientemente del movimiento del emisor o del observador. Einstein llamó «postulado» a esta afirmación porque no había ninguna evidencia experimental que la exigiera. De hecho, casi toda la evidencia experimental sugería lo contrario. O bien un objeto móvil es lanzado, como una bola de béisbol, en cuyo caso la velocidad con que pasa frente a un observador depende de la velocidad del lanzador con respecto al observador, o bien viaja como una onda, como una ola en el agua, en cuyo caso la velocidad con que pasa frente al observador depende de la propia velocidad del observador a través del agua.

El postulado de Einstein sobre la constancia de la velocidad de la luz violaba el sentido común. Pero él comprendió que el sentido común podría equivocarse cuando se trataba de velocidades extraordinariamente altas, como la velocidad de la luz, y dio un salto imaginativo con su postulado. Al derivar las consecuencias de su extraño postulado encontró que las ideas estándar sobre el tiempo —que el tiempo es absoluto, que un segundo es un segundo es un segundo— tenían que ser revisadas. Aquí, una vez más, los experimentos no podían haber proporcionado ninguna clave porque las discrepancias en la marcha de los relojes eran demasiado pequeñas para ser medidas. Ciertamente Einstein estaba influido por algunos experimentos sobre electricidad y magnetismo y por el conocimiento de que la luz es una onda viajera de energía electromagnética, pero ninguno de estos experimentos requería su atrevido y creativo postulado.

Un ejemplo más reciente del uso de la invención en física es la teoría de cuerdas. Aquí, los físicos han propuesto que las unidades fundamentales de la naturaleza no son partículas subatómicas, como los electrones, sino minúsculas cuerdas unidimensionales. La longitud típica de una de estas hipotéticas cuerdas primarias es de 10^{-33} centímetros, una cienmillonésima de billonésima del tamaño del núcleo de un átomo. No hace falta decir que nunca se ha visto ninguna de estas cuerdas increíblemente pequeñas, ni es probable que se vean. Hay otro detalle sobre las cuerdas: habitan en un universo de al menos nueve dimensiones, seis más que las tres habituales. Nosotros no vemos las dimensiones extra porque están enrolladas en lazos ultraminúsculos.

Cuando Yoichiro Nambu, Holger Nielsen, Leonard Susskind, John Schwarz y Joel Scherk propusieron por primera vez las ideas de las cuerdas a principios de la década de 1970, estaban haciendo gala de una gran imaginación. Ellos estaban tratando de comprender las fuerzas básicas de la naturaleza. Pero ningún hecho experimental requería el postulado de cuerdas frente a partículas, y ciertamente ninguna observación había sugerido nunca que vivamos en un mundo nonadimensional. La mayoría de las personas ya tienen suficientes problemas tratando con longitud, anchura y altura. Estos físicos estaban siguiendo el método de Einstein de dejar que sus mentes vuelen libremente, estableciendo postulados, y luego calculando las consecuencias de estos postulados. Hasta la fecha, no sabemos de ningún experimento capaz de poner a prueba verdaderamente la teoría de cuerdas. De hecho, la teoría ni siquiera ha hecho ninguna predicción definida. Pese a todo, algunos de los mejores físicos teóricos —artistas todos ellos— están trabajando en la teoría de cuerdas, creando e inventando en sus cabezas.

Por supuesto, los físicos no pueden construir todo, ni siquiera cuando están ideando nuevas teorías. Ya hay un enorme cuerpo de hechos conocidos sobre el universo físico, y estos hechos no pueden ser contradichos. Richard Feynman lo expresó muy bien en su librito *El carácter de*

la ley física: «Lo que necesitamos es imaginación, pero imaginación encorsetada en una terrible camisa de fuerza. Tenemos que hallar una nueva visión del mundo que coincida con todo lo que se conoce, pero que, en algún aspecto, haga predicciones distintas...».^[19]

De la misma forma que el físico tiene que estar de acuerdo con algunos hechos conocidos cuando está construyendo cosas nuevas, también lo tiene que estar el novelista. Pero ¿cuál es la camisa de fuerza del novelista? Es el gran catálogo del comportamiento humano y la psicología del *Homo sapiens*, un catálogo que solemos llamar naturaleza humana. Éstos son los hechos de verdad emocional a que debe atenerse el novelista.

Permítanme dar un ejemplo. Supongamos que el novelista ha creado un personaje de unos cuarenta años de edad, casado y con dos niños, un hombre que acaba de asistir con su esposa a una fiesta de Navidad. Este tipo —le llamaremos Gabriel— no está completamente seguro de sí mismo. Cuando llega a la fiesta se preocupa porque ha insultado accidentalmente a la hija de la criada. Luego se preocupa por la acogida que pueda tener su discurso de sobremesa. Después de la fiesta, él y su esposa marchan hacia un hotel donde van a pasar la noche. Han dejado a sus hijos con un primo en una ciudad vecina. Está nevando, la esposa de Gabriel, Greta, se ha mostrado muy reservada durante la fiesta. Pero Gabriel, caminando solo con ella, está embargado de admiración, amor y deseo hacia ella. La mira tiernamente y recuerda los preciosos momentos de su vida en común. Desea recordárselos, hacerle olvidar los muchos años de su gris convivencia, las rutinas de la vida diaria, los niños, las preocupaciones domésticas. Caminan hasta el hotel nevado a altas horas de la noche, y suben las escaleras hasta su habitación, iluminada sólo por una vela.

Gabriel arde en deseos por ella. Quiere que ella se le ofrezca con el mismo deseo, pero ella se aparta de él y empieza a gritar. Él le pregunta qué pasa, y finalmente ella dice que una canción triste de la fiesta de Navidad le hizo recordar a un joven que conoció hace tiempo, en su juventud. Gabriel empieza a sentir un vago temor pero sigue haciendo preguntas a su esposa sobre este joven del pasado. Tenía diecisiete años, dice Greta, trabajaba en una fábrica de gas, y era un joven tierno y delicado con ojos grandes y oscuros. Solían pasear juntos, por el campo. Gabriel le pregunta a Greta si estuvo enamorada de este muchacho, y ella responde que fue «grande con él en esa época». Luego dice que él murió a los diecisiete años. «¿De qué murió, tan joven?», pregunta Gabriel a su esposa. «Creo que murió por mí», responde Greta. Deja de hablar, abrumada por la pena, y se hunde en la cama, sollozando.

La escena que acabo de describir es, por supuesto, la última escena de la famosa narración de James Joyce «Los muertos». ¿Cómo terminará Joyce la escena? ¿Cuál será la reacción de Gabriel ante la confesión de su mujer? Supongamos que Gabriel no muestra ninguna reacción. ¿Creeríamos esto nosotros, como lectores y con nuestra propia experiencia vital? No. Este final sería falso. O supongamos que Gabriel se siente superior al amante muerto del pasado lejano de Greta y desdeña su dolor. También esta reacción sería falsa. O supongamos que Gabriel se enfurece con su esposa, considera su confesión como si fuera un adulterio y decide abandonarla. Éste es un final posible, pero no encaja con lo que ya sabemos de Gabriel. El final que Joyce escribe realmente es el siguiente: Gabriel se da cuenta de que su mujer ha amado siempre a este joven muerto hace tiempo más de lo que le ha amado a él, se da cuenta de la parte tan pequeña que él, su marido, ha jugado en la vida de ella frente a este recuerdo, se da cuenta de que él mismo no ha amado nunca a ninguna mujer con la fuerza que su esposa acaba de mostrar. Gabriel sólo puede apoyarse en el cristal de la ventana, oyendo la respiración de su esposa mientras duerme, observándola como si él y ella nunca hubieran sido marido y mujer. Nosotros nos creemos este final, sabemos que es cierto, incluso en la ficción, porque coincide con nuestro conocimiento de la naturaleza humana, con nuestra experiencia personal de la vida. Y eso nos provoca angustia.

Ambos, el novelista y el físico, están buscando la verdad: en el caso del novelista, la verdad en

el mundo de la mente y el corazón; en el caso del físico, la verdad en el mundo de fuerzas y masas. Al buscar la verdad, tanto el novelista como el físico inventan. Ambos tipos de invenciones son importantes; ambos deben ser puestos a prueba en última instancia frente al experimento. Los tests en física son más objetivos y definitivos. Por muy bella que sea la invención de un físico, adolece de una terrible vulnerabilidad: puede demostrarse que es falsa. Esta terrible vulnerabilidad frente al experimento es la razón de que yo no pueda estar de acuerdo con la escuela de filosofía de la ciencia que dice que la ciencia es enteramente una construcción humana. A menudo los físicos desean fervientemente que sea verdadera una teoría que más tarde es refutada por los hechos. La idea de Aristóteles de que los planetas se mueven en círculos perfectos era simple y elegante, pero Brahe, Kepler y Newton probaron que era errónea.

La historia o los personajes de un novelista no pueden probarse erróneos, pero pueden sonar falsos y perder así su fuerza. De este modo, el novelista está poniendo a prueba constantemente su ficción frente a la experiencia vital acumulada de sus lectores.

Una experiencia que comparten el físico y el novelista, una experiencia de lo más extraordinario, es el momento creativo.

Todos sabemos que una gran parte de la actividad de científicos y artistas no es especialmente creativa: ajustar los detalles de un cálculo, comprobar la lubricación de un sello de una bomba de vacío, buscar la localización de una novela, poner un color de fondo a un cuadro. Pero hay otros períodos, que podrían durar tan sólo unos pocos segundos o quizá horas, en que sucede algo diferente, cuando el científico o el artista son presa de la inspiración —y aquí pienso que la experiencia es muy similar.

Yo escribo en dos lugares. Uno está en una isla en Maine. Desde mi mesa de trabajo puedo ver el océano a veinte metros. Puedo ver pigargos y arrayanes y el camino de pinochas que lleva desde mi casa colina abajo hasta el muelle. El otro lugar en el que escribo es un trastero junto al garaje de mi casa en Massachusetts, una habitación del tamaño de un armario grande, húmeda, cerrada y sin ventanas. Allí no puedo ver nada excepto la blanca pared de cemento a treinta centímetros de mi mesa. Ambos lugares me han servido igualmente bien en mi escritura porque después de veinte minutos de trabajo me he evadido y reaparecido muy lejos en el mundo imaginario que he creado, ajeno a mis anteriores entornos. En este truco de transporte mágico, me enajeno no sólo de mi entorno real sino también de mi yo, mi ego, mi cuerpo.

¡Qué extraña y bella paradoja de creatividad, la de bucear en nuestro interior profundo para crear algo, extrayendo lo que es más privado y personal, y perdernos completamente en el proceso! Cuando estoy escribiendo me olvido de dónde estoy y de quién soy. Me convierto en un espíritu puro; me fundo con todos los demás espíritus que han sido creados. Estos momentos, pienso yo, son lo más cerca que un ser humano puede estar de la inmortalidad. En estos momentos es cuando más feliz soy.

Mi primera experiencia con el momento creativo en ciencia ocurrió aquí, en el Instituto Tecnológico de California, durante mis años como estudiante de doctorado. Yo tenía veintidós años. Cuando estás haciendo un doctorado en ciencias, además de seguir cursos debes resolver un problema de investigación original y suficientemente importante para que sea publicado. Uno de mis primeros problemas de investigación como estudiante de doctorado tenía que ver con el comportamiento de la gravedad, con la cuestión de si la gravedad debe ser equivalente a una distorsión en la geometría del espacio y el tiempo.

Tras un período inicial de estudio y trabajo, yo había conseguido establecer las ecuaciones que había que resolver. Pero entonces di con un muro. Sabía que había cometido un error, porque un resultado intermedio no salía tal como debería, pero yo no podía encontrar ningún error. Y no podía seguir. Día tras día comprobaba cada ecuación, caminando de un lado a otro de mi pequeño despacho sin ventanas, pero no sabía qué es lo que estaba haciendo mal, qué es lo

que había pasado por alto. Esta confusión y este fracaso continuaron durante meses. A diferencia de todos los otros problemas que yo había encontrado en la escuela, no podía buscar la respuesta en un libro. La respuesta a este problema no se conocía. Yo estaba obsesionado con mi problema de investigación; le daba vueltas día y noche. Algunos días no salía del despacho. Comía y cenaba allí. Guardaba latas de atún en los cajones. Dejé de visitar a mis amigos. Estaba empezando a dudar de mi capacidad. Estaba empezando a creer que yo no tenía lo que se necesitaba para ser un científico.

Entonces, una mañana —recuerdo que era una mañana de domingo— me desperté hacia las 5 a. m. y ya no pude volverme a dormir. Estaba en mi apartamento, no en mi despacho. Me sentía muy excitado. Algo estaba sucediendo en mi mente. Estaba pensando en mi problema científico y veía en profundidad. La sensación física era que mi cabeza se despegaba de mis hombros. Me sentía ingrávito. Estaba flotando. Y no tenía absolutamente ninguna sensación de mí mismo. Era una experiencia completamente ausente de ego o pensamiento alguno de las consecuencias, de aprobación o de gloria. No tenía ninguna de estas sensaciones. Tenía una sensación de certeza. Tenía una fuerte sensación de ver profundamente en este problema y entenderlo y saber que estaba en lo cierto. Ése es un aspecto increíble del momento creativo: saber que estás en lo cierto, esa cautivadora sensación de exactitud.

De modo que con estas sensaciones que irrumpían en mí salí de la cama de puntillas, casi reverencialmente, temeroso de perturbar cualquier extraño proceso mágico que estuviera ocurriendo en mi cabeza, y fui a la cocina. Tenía allí una mesa y saqué las hojas con mis cálculos. Un minúsculo rayo de luz diurna empezaba a entrar por la ventana. Aunque yo era ajeno a todo lo que me rodeaba, el hecho es que estaba completamente solo. No creo que ninguna otra persona en el mundo hubiera podido ayudarme en ese momento. Y no quería ninguna ayuda. Tenía todas estas sensaciones y revelaciones en mi cabeza, y estar solo con todo eso era una parte esencial de ello. Yo sabía cosas que nadie más sabía. Y este conocimiento me hizo sentirme poderoso, como si pudiera hacer cualquier cosa. Estaba en esta fantástica situación de ver. Puesto que no tenía sensación de mí mismo, no había ningún «yo» viendo, ningún veedor. Era sólo pura visión.

Me senté en la mesa y empecé a trabajar, haciendo aquí y allí simplificaciones que yo comprendía que eran buenas aproximaciones porque podía ver el problema en su totalidad. De algún modo, quizá durante semanas, mi mente había estado tomando caminos secretos, ensayando diferentes posibilidades y conexiones, y ahora se desbordaba. Al cabo de un tiempo en la mesa de la cocina, yo había resuelto mi problema de investigación. Salí de la habitación, sintiéndome atónito y poderoso. De repente oí un ruido, miré al reloj de la pared y vi que eran las dos de la tarde.

Mencioné la sensación interior de certeza en el momento creativo. La he experimentado como físico y como novelista, y creo que la sensación de certeza está relacionada con la fuerza de la belleza en la psique humana. Los físicos están impulsados por la estética tanto como los novelistas. Cuando Einstein estaba buscando una teoría unificada, que combinase la gravedad con el electromagnetismo, escribió a su amigo Paul Ehrenfest: «Los últimos resultados son tan bellos que tengo una completa confianza en haber encontrado las ecuaciones de campo naturales para tal variedad».^[20] Y Feynman, que no era dado al sentimentalismo, decía que una de las cosas importantes a la hora de conjeturar nuevas leyes de la física es «saber cuándo tienes razón. Es posible saber cuándo tienes razón antes de comprobar todas las consecuencias. Puedes reconocer la verdad por su belleza y simplicidad».

Los físicos y novelistas que he conocido tienen al menos una cosa más en común: hacen lo que hacen porque lo aman, y porque no pueden imaginarse haciendo otra cosa. Esta compulsión es a la vez una bendición y una carga. Una bendición porque la vida creativa está llena de belleza y no se le da a todos, una carga porque la llamada es implacable y puede ahogar todo lo demás.

Esta mezcla de bendición y carga debe ser el «dulce infierno» al que se refería Walt Whitman cuando comprendió en su juventud que estaba destinado a ser un poeta. «Nunca más escaparía».^[21] Esta mezcla de bendición y carga debe ser la razón de que Chandrasekhar siguiera trabajando en física ya octogenario, de que Hans Bethe siga haciendo cálculos sobre supernovas a los noventa años, de que un visitante del apartamento de Einstein en Berna encontrara al joven físico meciendo a su hijo con una mano mientras hacía cálculos matemáticos con la otra.

Cuando un poeta principiante escribió a Rilke preguntándole si debía continuar escribiendo, Rilke le respondió que él debería escribir sólo si no podía no escribir: «Busca la razón que te obliga a escribir; descubre si hunde sus raíces en los rincones más profundos de tu corazón, reconoce en tu interior si tendrías que morir si se te negara escribir. Y por encima de todo, pregúntate en la hora más tranquila de la noche: ¿debo escribir?».^[22]

Recuerdo una excursión a la cabaña de Kip en el Monte Palomar hace casi treinta años. Era un día cálido de verano. Teníamos un montón de cosas que hacer cuando llegamos —ascender a una colina, subir cajas de comida y cerveza para el fin de semana, ayudar a los estudiantes y postdocs de Kip con sus tiendas de campaña y sacos de dormir y repelentes de insectos. Recuerdo que la gente se balanceaba colgando de una cuerda o en un columpio atado a un árbol grande. Se hizo un fuego para cocinar. Alguien tenía una parrilla, carbón, cerillas, pollo y bistecs. Busqué con la mirada a Kip y finalmente le encontré absorto, sentado tranquilamente en una silla plegable sobre una gran roca. Estaba inclinado sobre un cuaderno de papel blanco, garabateando ecuaciones, ajeno al mundo, feliz, haciendo lo que más amaba, haciendo lo que debía, bendecido y cargado al mismo tiempo. Fue otra buena lección para un joven estudiante.

Glosario

Este glosario da información sobre algunos de los términos técnicos que aparecen en este libro, junto con cierta guía para localizarlos en los ensayos. Puesto que el alcance técnico de los ensayos es bastante restringido, el número de términos aquí tratados es bastante pequeño, pero las explicaciones van más allá de las definiciones y pueden considerarse por sí mismas. En este sentido, este glosario es complementario de otro con un mayor número de entradas cortas que aparece casi al final del libro *Agujeros negros y tiempo curvo*, Crítica, Barcelona, 1995.

Las palabras en cursiva son referencias a entradas definidas en otro lugar del Glosario.

Agujeros de gusano. En el espacio euclídeo, simple y plano —el espacio en el que intuitivamente pensamos que vivimos— hay sólo un camino más corto entre dos lugares. Cualquier alteración introducida en dicho camino lo hace más largo. Puesto que la teoría de Einstein nos dice que el espacio no es plano, existen posibilidades más interesantes para la forma en que se conectan las localizaciones espaciales. Es posible que existan dos (o más) caminos distintos entre dos lugares. Ambos caminos podrían ser «el más corto» en el sentido de que cualquier pequeña alteración alarga el camino. Los dos caminos no tienen por qué ser de la misma longitud, y de hecho uno de los caminos puede ser mucho más corto que el otro. En una situación semejante, los físicos del espaciotiempo llaman al camino más corto un «agujero de gusano». Los lugares en donde este camino se hace distinto se denominan las bocas del agujero de gusano.

Un agujero de gusano es una estructura no trivial en el espacio tridimensional curvo, y no puede ser visualizado fácilmente. Lo que se puede hacer es utilizar un ejemplo bidimensional del mismo tipo de conexión. Esto es lo que se hace en la Introducción; véase en especial la figura 9. En su ensayo sobre el viaje al pasado, Igor Novikov describe un agujero de gusano utilizando una imagen de pozos bidimensionales cuyos pozos gravitatorios se empalman. En estas imágenes tridimensionales un agujero de gusano bidimensional aparece típicamente como si fuera el contorno de un estrecho túnel, un agujero que un gusano podría hacer en el suelo.

La existencia de un atajo agujero de gusano puede permitir el viaje entre dos lugares en un tiempo muy corto, menor que el tiempo que tarda la luz en viajar entre estos dos lugares por la ruta estándar. En cierto sentido, éste es en apariencia un viaje más rápido que la luz. (Realmente no es más rápido que la luz: un fotón irá más rápido a través del agujero de gusano que cualquier partícula). Aunque no es en absoluto obvio, este tipo de viaje más rápido que la luz le hace posible regresar a un tiempo anterior y seguir una *curva cerrada de género tiempo*. En la Introducción, esto se logra mediante el uso de dos agujeros de gusano que se mueven uno con respecto al otro. En el ensayo de Igor Novikov, se hace mediante una combinación de la gravedad y un único agujero de gusano.

Durante la última década se ha investigado activamente acerca de si las leyes de la física permiten que existan agujeros de gusano. La respuesta actualmente aceptada de «probablemente no» es uno de los temas del ensayo de Stephen Hawking.

Pueden encontrarse más detalles sobre los agujeros de gusano y su conexión con el viaje en el tiempo en el Capítulo 14 de *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* de Kip Thorne, W. W. Norton, Nueva York, 1994.

Campo cuántico. Véase *teoría cuántica*.

Censura cósmica. El desarrollo de una *singularidad* en el espaciotiempo causa un problema terrible para la teoría de la gravitación. Los principios científicos pueden gobernar cómo cambian las cosas con el tiempo sólo si se da un conjunto completo de principios, «leyes» suficientes para especificar el comportamiento del espaciotiempo y todo lo que hay en él. Pero por su propia naturaleza de contener cantidades infinitas, tales como *densidad de energía* o curvatura, una singularidad no puede ser descrita por tales principios. Si se forma una singularidad en el espaciotiempo, entonces la ley física perderá el poder de predecir lo que viene a continuación. (Este fallo de la predecibilidad puede conducir a un *horizonte de Cauchy*). Los agujeros negros ofrecen una forma de hacer tolerable esta ruptura. Nada dentro del horizonte de sucesos de un agujero negro puede influir en algo que esté fuera del horizonte. Por consiguiente, una

singularidad dentro del horizonte no causaría problemas en la predecibilidad fuera del horizonte. En (casi) todos los ejemplos conocidos, las singularidades se forman dentro de horizontes, y los horizontes «protegen» a las regiones exteriores frente a la impredecibilidad. Las singularidades que no están protegidas de esta manera se denominan «desnudas». La censura cósmica es la idea (o esperanza) de que ninguna «singularidad desnuda» puede formarse en situaciones realistas, de que las leyes de la física censurarán una singularidad ocultándola detrás de un horizonte.

Constante cosmológica. Einstein imaginó una modificación de la relación que la *relatividad general* establece entre la curvatura del espaciotiempo y la cantidad de materia y energía presentes. Una cantidad denominada «constante cosmológica» gobierna el tamaño de esta modificación. Si esta constante se hace cero, el resultado es la teoría original de la relatividad de Einstein. La forma de la modificación es la misma que sería si el universo estuviera uniformemente lleno con una densidad muy baja de material con propiedades inusuales. Debido a esto, a veces se considera la constante cosmológica en relación con las propiedades físicas del denominado espacio vacío. Es como si el espacio vacío tuviera una energía intrínseca. Actualmente es difícil hacer observaciones cosmológicas compatibles con la teoría estándar de Einstein, y la constante cosmológica está recibiendo mucha atención por parte de los científicos. Las observaciones también están impulsando a los físicos a considerar nuevos tipos de «energía oscura» de las que podría estar lleno el universo.

En su ensayo, Stephen Hawking se refiere a las extrañas propiedades del espaciotiempo de Gödel, una solución de la teoría de Einstein con una constante cosmológica.

Corte. Véase *función de dos puntos*

Cuerda cósmica. Una cuerda cósmica es un teórico filamento de materia y energía que tiene una sección transversal nula. Puesto que la materia y la energía curvan el espaciotiempo, una cuerda cósmica influye en el espaciotiempo que la rodea. Una cuerda cósmica puede ser considerada simplemente un hilo de *material exótico* en extremo, tan estrechamente confinado que no ocupa volumen.

Sin embargo, la razón de que las cuerdas cósmicas sean interesantes reside en otro punto de vista. La forma en que el espaciotiempo está distorsionado alrededor de una cuerda cósmica corresponde a que la cuerda sea un «defecto» menor en el espaciotiempo. Un análogo de este tipo de defectos puede construirse con papel y tijeras. Corte una cuña de un disco de papel como si fuera a tomar una porción de una tarta. A continuación, pegue suavemente los bordes de lo que queda del disco para formar un cono. El defecto aquí es la punta del cono; es un defecto cero-dimensional en un papel bidimensional. Debido a dicho efecto, el cono difiere en algunos aspectos de una hoja plana de papel. De forma en cierto modo similar, una cuerda cósmica es un defecto uno-dimensional en el espaciotiempo tetradimensional. En su ensayo, Stephen Hawking muestra que las cuerdas cósmicas, más que los agujeros de gusano, pueden ser utilizadas para crear *curvas cerradas de género tiempo*.

Las cuerdas cósmicas no tienen conexión directa con la «teoría de cuerdas», una aproximación teórica para entender los detalles de las fuerzas y las partículas fundamentales. Las cuerdas cósmicas pueden ser tan largas como grande es el universo. Las cuerdas de la teoría de cuerdas son más pequeñas que la partícula elemental más pequeña.

Curvas cerradas de género tiempo. Todos los sucesos en una línea de universo tienen una conexión de género tiempo (véase *género tiempo y género espacio*) de modo que la línea de universo de un objeto puede denominarse una curva de género tiempo a través del espacio. Mediante ciertos métodos, tales como pasar a través de un agujero de gusano, el objeto puede regresar al suceso una segunda vez. Esto significa que la línea de universo del objeto es cerrada; es decir, forma un lazo.

La paradoja de una curva cerrada de género tiempo es que cada suceso en ella está tanto en el pasado como en el futuro de cualquier otro suceso en la curva. La solución de esta paradoja es que un agujero de gusano permite conexiones no triviales de sucesos en el espaciotiempo. Estas conexiones no nos causan dificultades si la curva es de género espacio, como el ecuador de la Tierra. En una trayectoria semejante uno puede caminar continuamente en una dirección, digamos el este, y pese a todo volver al punto de partida. Esto es posible porque las conexiones entre puntos en la superficie de la Tierra son las de una geometría no trivial, la de una superficie esférica. Eso puede suceder también para una curva de género

tiempo si la geometría está conectada de la forma correcta.

Curvo y plano. En un plano bidimensional, como una pizarra, se podría en principio construir un conjunto de rectas paralelas con distancias invariables entre ellas. Luego se podría construir un segundo conjunto con las mismas propiedades de forma que todas las líneas de este segundo conjunto fueran perpendiculares a las líneas del primer conjunto. Puesto que es posible hacer esto, se dice que la geometría del plano es «plana». Esta construcción no siempre puede realizarse, ni siquiera en principio. En la superficie de la Tierra, por ejemplo, no puede hacerse. Una geometría para la que no puede hacerse (es decir, una que no es plana) se denomina «curva». En una geometría tridimensional tenemos que preguntar si es posible construir tres conjuntos de líneas, cada uno de ellos perpendicular a los otros dos. En cada conjunto las líneas deben permanecer paralelas cuando se prolongan, por lejos que sea. Este concepto de plano y curvo puede extenderse de esta forma a cualquier número de dimensiones, y se aplica al espaciotiempo tanto como al espacio.

Densidad de energía, tensor energía-momento. Según la *relatividad general*, la teoría de la gravitación de Einstein, la curvatura del espacio tiempo, y en consecuencia la fuerza de gravitación, está generada por la materia y los campos (tales como los campos eléctricos) presentes. La brusquedad con que está curvado el espaciotiempo está determinada por la firmeza con que la materia y los campos están empaquetados en el espaciotiempo. De fundamental importancia es la densidad de energía en el espaciotiempo, la cantidad de energía por unidad de volumen.

En el caso de la materia y los campos ordinarios, la densidad de energía es cero o positiva, y el saber establecido dice que las densidades de energía negativas son imposibles en la práctica. Esto es una desgracia para el viaje en el tiempo, puesto que los *agujeros de gusano* requieren una densidad de energía negativa, pero existe alguna esperanza para los agujeros de gusano. Según la *teoría cuántica*, las fluctuaciones cuánticas de los campos, en ciertas circunstancias, admiten la posibilidad de densidades de energía negativas. Muchos de los debates recientes sobre el viaje en el tiempo se han centrado en si existe la posibilidad teórica de explotar estas fluctuaciones cuánticas para construir un agujero de gusano. Aunque la densidad de energía es el aspecto más importante de la materia y los campos del universo, también son importantes otros aspectos del contenido del espaciotiempo (como las presiones y los flujos de energía) y deben ser especificados en las matemáticas de la teoría de Einstein. El objeto matemático que incluye toda la información se denomina «tensor energía-momento» o, alternativamente, «tensor tensión-energía».

Desplazamiento hacia el azul. Los términos «desplazamiento hacia el rojo» y «desplazamiento hacia el azul» describen la relación entre la frecuencia de la luz emitida por una fuente, tal como una estrella, y la frecuencia de la luz recibida por un observador, tal como un astrónomo. De forma equivalente, los términos se refieren a la diferencia entre la energía con la que son emitidos los fotones y la energía con la que son recibidos.

Si una estrella se está alejando de la Tierra, entonces los astrónomos situados en la Tierra recibirán luz desplazada hacia el rojo, luz que tiene una frecuencia menor, o que es más roja, que la luz producida por los procesos en la estrella. Un fotón recibido tendrá una energía menor que aquella con la que es emitido. Lo contrario sucede si la estrella se está moviendo hacia la Tierra: la luz recibida en la Tierra estará desplazada hacia frecuencias más altas, más azules, y los fotones serán más energéticos cuando son recibidos que cuando son emitidos.

También los campos gravitatorios pueden causar desplazamientos hacia el rojo y desplazamientos hacia el azul. Si permanecemos en la base de un alto faro, los fotones que nos llegan ganarán energía mientras «caen» hacia nosotros. Serán más energéticos y por lo tanto más azules que cuando son producidos en la parte superior del faro.

En su ensayo Stephen Hawking señala que la luz se desplazará cada vez más hacia el rojo en cada ciclo de un bucle en el que regresa a un suceso anterior.

Distorsión (Warpaje). Cuando el espaciotiempo no es plano (véase *curvo y plano*), hay una forma de cuantificar cuán curvo es. En el caso de una superficie bidimensional, la curvatura se cuantifica con dos números, los radios máximo y mínimo de curvatura de la superficie. Cuanto

menores son estos radios, más curva es la superficie. Los detalles son más complicados en dimensiones más altas, pero la imagen general de la cuantificación sigue siendo válida. Al discutir el futuro de la astronomía de ondas gravitatorias, Kip Thorne utiliza el término «distorsión» («*warpage*») para referirse a la magnitud general de la curvatura en el espaciotiempo altamente curvado exactamente fuera de un agujero negro, una región que puede sondarse con *ondas gravitatorias*.

Ecuación de estado. La estructura de una estrella se debe a la acción combinada de la gravedad, que trata de atraer a la materia de la estrella hacia dentro, y las fuerzas internas del material estelar, que presionan hacia fuera. La relación entre esta presión hacia fuera y las condiciones, especialmente la densidad, del material estelar se denomina «ecuación de estado del material». En el caso de una estrella ordinaria, la ecuación de estado implica la física de los gases a alta temperatura y se entiende bien. En el caso de una *estrella de neutrones*, por el contrario, la ecuación de estado depende de la naturaleza detallada de las fuerzas nucleares y no se entiende adecuadamente. En su ensayo, Kip Thorne muestra cómo las observaciones de *ondas gravitatorias* mediante el uso de *interferometría láser* pueden ayudar a los físicos a obtener una mejor comprensión de la ecuación de estado nuclear.

Estrella de neutrones. Casi toda la masa de un átomo está en su núcleo pero el tamaño de un átomo normal está determinado por los electrones del átomo, que ocupan un espacio mucho mayor que el tamaño del núcleo. En algunas estrellas, las fuerzas gravitatorias pueden ser suficientemente intensas para que los electrones (cargados negativamente) de los átomos de la materia estelar se compriman contra los núcleos, uniéndose con los protones (cargados positivamente) para convertirse en neutrones. Casi toda la estrella consiste entonces solamente en neutrones empaquetados de forma extraordinariamente compacta. Esta «materia nuclear» extraordinariamente densa, a diferencia de la materia ordinaria, tiene una *ecuación de estado* gobernada básicamente por las fuerzas nucleares.

La física detallada de la gravedad y las fuerzas nucleares obliga a las estrellas de neutrones a tener una masa sólo algunas veces mayor que la de nuestro Sol, aunque son muchísimo más pequeñas en tamaño. De hecho, una estrella de neutrones no es mucho mayor que el *horizonte de agujero negro* de un agujero de la misma masa. Tanto las estrellas de neutrones como los agujeros negros son tan compactos que pueden formar pares binarios de objetos compactos en órbita mutua que generan *ondas gravitatorias* relativamente intensas. En su ensayo, Kip Thorne discute cómo, utilizando *interferometría láser*, la detección de ondas gravitatorias procedentes de tales sistemas puede dar a los físicos información importante sobre las fuerzas nucleares y la ecuación de estado nuclear.

Fluctuación del vacío. Véase *teoría cuántica*

Fluctuaciones cuánticas. Véase *teoría cuántica*

Forma de onda. Las ondas (sonoras, electromagnéticas, gravitatorias, y demás) procedentes de fuentes naturales rara vez son simples oscilaciones de amplitud y período fijos. Más bien, los complejos detalles de la fuente producen complejos detalles en la «forma de onda», la variación con el tiempo de la señal de la onda. Un ejemplo de esto es la forma de onda compleja del sonido de una orquesta, una forma de onda que contiene información sobre muchos instrumentos musicales. En su ensayo Kip Thorne predice que en un futuro no muy lejano serán detectadas formas de onda de *ondas gravitatorias* mediante *interferometría láser* con una *razón señal/ruido* tan buena que los científicos podrán aprender mucho sobre la *distorsión* del espaciotiempo cerca de un agujero negro, y sobre mucho más.

Función de dos puntos. Igual que la relatividad general tiene problemas con las *singularidades*, también los tiene la *teoría cuántica*, aunque de un modo diferente. En la teoría cuántica de campos, la localización de un suceso en el espaciotiempo y la energía asociada con dicho suceso son un par de magnitudes relacionadas por el «principio de incertidumbre». Puesto que las «fluctuaciones cuánticas» son mayores en las magnitudes que están definidas en escalas muy pequeñas, se hacen infinitamente grandes cuando tratamos de medir las propiedades del

espaciotiempo, o de los campos físicos, sobre distancias infinitesimalmente cortas. Fluctuaciones grandes en la energía llevarían a conflictos, tales como hacer infinitamente pesadas a las partículas pequeñas. Los científicos han encontrado varias formas equivalentes de restar los efectos de dichas fluctuaciones, que llevan a teorías que son consistentes con los experimentos. Restarlas es más difícil en el espaciotiempo curvo de la *relatividad general*, pero el peligro de no hacerlo es mayor, porque las fluctuaciones destruirían la uniformidad del propio espaciotiempo. Uno de los métodos, descrito por Stephen Hawking, examina cómo ocurren estas fluctuaciones en dos puntos próximos y utiliza la llamada de forma prosaica «función de dos puntos» para eliminar los infinitos, igual que en el espaciotiempo plano. Hawking examina lo que sucede cuando el espaciotiempo curvo contiene curvas cerradas de género tiempo, una prueba que este método no tiene que pasar cuando se utiliza para eliminar singularidades en el espaciotiempo plano.

Puesto que las fluctuaciones cuánticas contienen más energía cuando ocurren sobre distancias cortas, es posible encontrar una distancia tan pequeña que la energía de las fluctuaciones es lo bastante grande para formar un minúsculo agujero negro cuyo *horizonte de agujero negro* tiene el mismo tamaño que la distancia pequeña. Los físicos esperan que no será posible que el espaciotiempo sea uniforme sobre distancias tan cortas. Hawking especula que esto proporciona un «corte» natural en las fluctuaciones, que la naturaleza no puede producir fluctuaciones singulares sino más bien limitarlas a este mínimo tamaño y máxima energía.

Género tiempo y género espacio. Supongamos que dos sucesos ocurren en la misma posición espacial pero en diferentes tiempos en cierto sistema de referencia. Se demuestra en la Introducción (véase «Diagramas espaciotemporales» en la Introducción) que no puede haber un sistema de referencia en el que los sucesos ocurren en el mismo instante. Entre dichos sucesos habrá una diferencia de tiempo en cualquier sistema de referencia. Se dice que tales sucesos tienen una separación de género tiempo. Por el contrario, se dice que los sucesos que ocurren en el mismo instante en cierto sistema de referencia tienen una conexión de género espacio.

Dos sucesos cualesquiera que experimenta una partícula física dada deben tener una separación de género tiempo. Así, la *línea de universo* de semejante objeto físico consiste en todos los puntos que guardan una relación de género tiempo.

Hiperespacio. Un mundo bidimensional (un plano, una patata frita, la superficie de la Tierra) puede describirse matemáticamente enteramente en términos de su propia geometría interna, la relación entre distancias puramente medidas en dicho mundo. Pero es una gran ayuda intuitiva representar tales geometrías como superficies en un mundo tridimensional plano. La teoría de la relatividad trabaja con geometrías curvas de dimensión más alta, en especial con el espaciotiempo tetradimensional curvo. A veces es útil imaginar estas geometrías curvas de la teoría de la relatividad como superficies en cierto espacio plano de dimensión más alta (véase *curvo y plano*) llamado hiperespacio. Tanto Igor Novikov como Kip Thorne utilizan esta imaginaria en sus ensayos. Aunque el hiperespacio es útil para representaciones intuitivas, raramente entra en las matemáticas de la relatividad. Típicamente, la investigación en relatividad se hace en términos de la geometría interna del espaciotiempo tetradimensional, y los relativistas no se remiten a un hiperespacio de dimensión más alta.

Horizonte de agujero negro. Un «horizonte», u «horizonte de sucesos», es una superficie cerrada que divide al espaciotiempo en una región exterior y una región interior, esta última llamada un agujero negro. La propiedad que define al horizonte es que ninguna señal o influencia del interior puede llegar al exterior. Para una discusión más completa véase la sección «Horizontes y agujeros negros» en la Introducción.

Horizonte de Cauchy. Fundamental para las ideas de la relatividad es la causalidad, la forma en que los sucesos pueden influirse mutuamente. Un «suceso» es un «punto» en el espaciotiempo, es decir, una posición en el espacio en un tiempo concreto. Un suceso puede

influir en un segundo suceso si, en principio, pudiera enviarse una señal desde el primer suceso al segundo a una velocidad igual o menor que la de la luz.

Supongamos que tomamos todos los puntos del espaciotiempo en un cierto instante de tiempo; es decir, tomamos una *superficie de tiempo constante*. En la relatividad matemática, aquellos puntos espaciotemporales que están influidos por nuestra superficie de tiempo constante se denominan «desarrollo de Cauchy» de dicha superficie de tiempo constante (con el nombre del matemático francés Augustin-Louis de Cauchy, 1789-1857). En cierto sentido, estos puntos son la respuesta a la pregunta: ¿Qué se desarrollará a partir de la información en esta superficie de tiempo constante?

La expectativa usual es que todos los puntos en el futuro de esta superficie estarán en su desarrollo de Cauchy. Pero, como Stephen Hawking señala en su ensayo, existen espaciotiempos para los que no es así; existen espaciotiempos con regiones en el futuro de superficies de tiempo constante que no están determinados por dicha superficie. Para tales espaciotiempos Stephen Hawking ha introducido el término «horizonte de Cauchy», por el que se entiende la frontera de las regiones que pueden determinarse. Como él señala, los horizontes de Cauchy se dan en ciertas soluciones de agujero negro de las ecuaciones de Einstein. También demuestra que en ciertas circunstancias un horizonte de Cauchy es inevitable si el espaciotiempo va a contener una región con *curvas cerradas de género tiempo*.

Un horizonte de Cauchy difiere del horizonte (el nombre completo es «horizonte de sucesos») de un agujero negro. (Véase la sección «Horizontes y agujeros negros» en la Introducción). Los dos tipos de horizontes, no obstante, comparten la propiedad de que separan el espaciotiempo en regiones distintas.

Interferometría láser. Cuando una señal luminosa debida a una única fuente nos llega a lo largo de dos caminos independientes, las contribuciones separadas de la onda se combinarán en un complicado patrón de cancelaciones y refuerzos llamado «interferencia». Las franjas multicolores en una delgada capa de petróleo son debidas a la interferencia entre las ondas luminosas reflejadas de la cara superior y la inferior de la capa de petróleo; la posición de las franjas depende del grosor de la capa. En interferometría, la posición de las franjas se utiliza de este modo para medir el grosor. Esta técnica puede extenderse a la medida de «grosos» grandes, tales como la distancia entre dos espejos separados por varios kilómetros, pero sólo la luz producida por los láseres es lo bastante pura para formar franjas para tales distancias. Puesto que un interferómetro láser permite una exquisita precisión en la medida de la separación de dos objetos, es muy apropiado para sentir la oscilación en la separación que ocurre cuando una onda gravitatoria que pasa actúa sobre las dos masas distantes.

Línea de universo. En un diagrama espaciotemporal (véase «Diagramas espaciotemporales» en la Introducción) a menudo se dibujan líneas (no necesariamente rectas) que representan el flujo continuo de sucesos que ocurren en un objeto físico. Una línea semejante se denomina la «línea de universo» de dicho objeto. El concepto es tan valioso que a menudo se utiliza sin hacer referencia a un diagrama espaciotemporal específico para sugerir la idea general de cómo se está moviendo el objeto.

Material exótico. Cualquier forma de materia y cualquier campo, como el campo electromagnético, tiene una *ecuación de estado* que relaciona su densidad (de masa, o de energía) con la presión que ejerce. En el caso de un material ordinario, la magnitud de la presión interna es, en cierto sentido, mucho menor que su densidad. Para construir un agujero de gusano y una máquina del tiempo basada en un *agujero de gusano* se requiere un material que está tan alejado de la materia ordinaria que Kip Thorne y otros le llaman «exótico». Es el tema de su novena predicción y de la discusión que hay hacia el final de su ensayo.

Métrica. El principio de la Introducción se centra en la idea de cuantificar las distancias que separan puntos en el espacio o en el espaciotiempo. La expresión «métrica» se refiere a la fórmula que da la distancia. Especificar la métrica es especificar la geometría. Así, cuando Stephen Hawking escribe, en su ensayo, acerca de las «fluctuaciones cuánticas de la métrica», se está refiriendo a la posibilidad de una *teoría cuántica* para la geometría del espaciotiempo. De la misma forma que los efectos cuánticos imponen incertidumbre sobre la órbita de un

electrón, Stephen Hawking nos dice que impondrán incertidumbre en la misma geometría del propio espaciotiempo.

No-linealidad. El término «lineal», en conexión con las ecuaciones, teorías e interacciones físicas, no pretende describir líneas rectas. Más bien, significa en un sentido amplio que las cosas pueden sumarse. La electrodinámica clásica es un ejemplo de teoría de una interacción lineal. Si calculamos el campo eléctrico debido a una primera carga eléctrica, y luego el campo eléctrico debido a una segunda carga, podemos sumar los dos campos que acabamos de calcular para encontrar el campo producido por las dos cargas juntas.

En la *relatividad general* de Einstein, la gravedad no actúa así. La fuerza gravitatoria debida a dos cuerpos no es simplemente la suma de las fuerzas debidas a cada uno de ellos. De las interacciones en las que la simple suma no da la respuesta correcta, tales como las que implican a la gravedad, se dice que son no-lineales. Buena parte de la dificultad técnica de trabajar con la teoría de Einstein tiene que ver con el carácter no-lineal de la teoría.

Ondas gravitatorias. Véase la sección «Ondas gravitatorias» en la Introducción.

Paradoja del abuelo. «Paradoja del abuelo» es el nombre corto dado a las contradicciones que surgirían si las personas pudieran viajar hacia atrás en el tiempo y cambiar los sucesos que ya han ocurrido. Como escribe Stephen Hawking en su ensayo: «¿Qué le sucede a usted si vuelve en el tiempo y mata a su abuelo antes de que su padre fuera concebido?». Si se admite que esto suceda, entonces usted no habría nacido, y no podría haber viajado hacia atrás en el tiempo para afectar así a las cosas. Los físicos han trabajado mucho para demostrar que el viaje en el tiempo no tiene por qué llevar a tales contradicciones, siempre que todos los objetos obedezcan a las leyes deterministas de la física. (Hawking excluye específicamente el libre albedrío, que por definición es no determinista). Igor Novikov describe en detalle la forma en que se evitan tales contradicciones en algunos escenarios de viaje en el tiempo.

Ratio señal/ruido. En cualquier experimento, detección o medida, los científicos buscan alguna «señal» que contiene la información tras la que van. Junto con la señal hay siempre una componente adicional indeseada debida, por ejemplo, a la imperfección del equipo de detección. Esta componente indeseada se denomina genéricamente «ruido» aunque apenas está relacionada con el sonido, y la importancia relativa de la señal que es buscada, respecto al ruido que no lo es, se denomina «razón señal/ruido», o a veces simplemente «señal/ruido».

En la tecnología de comunicación cotidiana, tal como las transmisiones de radio, el ruido suele ser una parte pequeña y casi inapreciable de lo que se recibe. Lo contrario sucede con muchos experimentos científicos. Están en la vanguardia de lo que es posible, y por su propia naturaleza trabajan con señales que no son fuertes comparadas con el ruido que les acompaña. Las señales de ondas gravitatorias serán extraordinariamente débiles, de modo que la cuestión de la información que pueda sacarse de ellas depende fundamentalmente del éxito que tengan los físicos en extraer una pequeña señal a partir de mucho ruido.

En su ensayo, Kip Thorne discute la información de las ondas gravitatorias procedentes de la caída en espiral de un agujero negro pequeño hacia un agujero negro mucho más grande. Sus predicciones se basan en expectativas de las capacidades señal/ruido en los años 2010 a 2015 con el observatorio de ondas gravitatorias con base en tierra llamado LISA (Laser Interferometer Space Antenna).

Relatividad general. «Relatividad general» es el nombre utilizado para la teoría de la gravitación de Einstein, que éste introdujo en 1915. Difiere de la teoría del espaciotiempo de 1905 de Einstein, la «relatividad especial», que se aplica sólo en la circunstancia especial en que las influencias gravitatorias están ausentes. La relatividad general describe las influencias gravitatorias en términos de la curvatura del espaciotiempo; en la relatividad especial, el espaciotiempo es plano (véase *curvo y plano*). En la Introducción (en la sección «¿Por qué es “curva” la geometría del espaciotiempo?»), demostramos que la idea de un espaciotiempo curvo tiene una conexión muy natural con la gravitación.

La teoría de Einstein fue la primera teoría, pero no la única, que utiliza el espaciotiempo curvo para describir influencias gravitatorias. Se han propuesto muchas teorías alternativas durante este siglo. La

mayoría de tales teorías difieren sólo en las reglas metodológicas que dan para determinar cómo el contenido del espaciotiempo (materia y energía) obliga a curvarse al espaciotiempo. Matemáticamente, la relatividad general de Einstein tiene la regla más simple entre todas estas teorías. Esta teoría más simple ha superado hasta ahora todas las pruebas experimentales detalladas de la teoría de la gravitación. Es interesante que Einstein modificó un poco su regla al introducir la *constante cosmológica*, que ahora también se cree que desempeña un papel en la dinámica del universo.

Relatividad numérica. Las matemáticas de la *relatividad general* de Einstein toman la forma de un conjunto de ecuaciones muy difíciles para los detalles de la métrica que gobierna la geometría del espaciotiempo. Sólo pueden encontrarse soluciones matemáticamente sucintas de estas ecuaciones para configuraciones muy simples, tales como un espaciotiempo con simetría esférica. Desde los años setenta se ha dedicado mucho esfuerzo a la «relatividad numérica», la resolución de las ecuaciones de Einstein utilizando grandes computadores. Con el tiempo, la relatividad numérica producirá soluciones para situaciones astrofísicas complicadas de forma realista, pero el avance con estas soluciones por computador es extraordinariamente difícil, debido en parte a la *no-linealidad* de las ecuaciones de Einstein. Kip Thorne señala en su ensayo que los físicos que confían en detectar ondas gravitatorias procedentes de la trayectoria espiral de pares de objetos compactos están contando con que la relatividad numérica proporcionará los detalles teóricos de dichas ondas.

Semiclásica. Véase *teoría cuántica*

Singularidad. Las teorías físicas hacen predicciones sobre el tamaño de las magnitudes, y a veces se predice un tamaño infinito. Un ejemplo es la contracción gravitatoria de una esfera de materia con presión despreciable, algo similar a una bola esférica de polvo. Según la teoría clásica de la gravedad de Newton, la atracción gravitatoria hacia dentro actúa sin límite y comprime el cuerpo hasta un radio cero, y por lo tanto hasta una densidad de materia infinita. Esta densidad infinita se considera una «singularidad», una desviación del comportamiento continuo finito que esperamos de las magnitudes físicas. El comportamiento singular de un cuerpo esférico en la teoría de Newton se explica fácilmente como una consecuencia de la hipótesis poco razonable de que el cuerpo es exactamente esférico.

En la *relatividad general*, la teoría de Einstein de la geometría del espaciotiempo, las singularidades corresponden generalmente a una curvatura infinita del espaciotiempo (véase *curvo y plano* y *curvatura*). A diferencia de las singularidades newtonianas, las singularidades en la teoría de Einstein no se pueden desechar fácilmente como artificios de configuraciones poco realistas. Las singularidades de la relatividad general se forman para un rango muy amplio de condiciones, y existen al menos dos casos astrofísicos en los que podemos contar con singularidades. Hay una singularidad dentro de un *horizonte de agujero negro* cuando quiera que se forma un agujero negro, y el big bang, el nacimiento del universo, es en sí mismo una singularidad.

Se supone generalmente que las singularidades teóricas en el espaciotiempo son debidas a la incompleción de la teoría de Einstein, y que las singularidades no se mostrarán en una teoría más completa que combine la teoría de Einstein con la *teoría cuántica*.

Singularidad desnuda. Véase *censura cósmica*

Suma sobre historias. El físico de Caltech y ganador del premio Nobel, Richard Feynman (1918-1988) hizo muchas contribuciones importantes a la *teoría cuántica*, especialmente a la teoría de los campos cuánticos. Una de las más intrigantes fue demostrar que las partículas se comportan en teoría cuántica como si de algún modo exploraran todos los caminos espaciotemporales posibles entre un suceso de partida y uno de llegada. En física clásica sólo se toma un camino, pero en física cuántica hay alguna probabilidad para cualquier camino espaciotemporal (normalmente con la máxima probabilidad para el camino clásico esperado). Los diferentes resultados de un experimento en teoría cuántica son vistos por consiguiente como caminos diferentes tomados en el espaciotiempo. Feynman llamó a esta manera de calcular las fluctuaciones cuánticas «suma sobre historias». Es una forma atractiva de formular la gravitación cuántica, porque no implica ninguna hipótesis acerca de que el espaciotiempo sea

uniforme y continuo a escalas pequeñas.

Superficie de tiempo constante. En el espaciotiempo, la expresión «en un instante de tiempo dado» significa todos los sucesos con el mismo tiempo. Estos sucesos podrían tener cualquier localización espacial, y por ello «en un instante de tiempo dado» es un conjunto de puntos tridimensional, o una superficie tridimensional, llamada una superficie de tiempo constante. (En el espacio ordinario, tres dimensiones se llamarían un volumen. En el espaciotiempo tetradimensional se utiliza el término «superficie» para estructuras tridimensionales o estructuras bidimensionales).

Stephen Hawking discute la posibilidad de una civilización que modifique el espaciotiempo en el futuro de una superficie de tiempo constante. Ésta es una forma precisa de decir que dicha civilización modifica el espaciotiempo después de un cierto instante de tiempo.

Teoría cuántica. La teoría cuántica, junto con la relatividad, figura como uno de los dos grandes avances de la física teórica en el siglo xx. «Teoría cuántica» es un término general utilizado para las teorías en las que las leyes de la física predicen sólo las probabilidades de diversos resultados de un experimento. En una teoría cuántica, si uno conoce todo lo que se puede conocer sobre un sistema físico hoy, no hay garantía de que pueda predecir su condición mañana con completa precisión. Puede seguir prediciendo el resultado promedio de un experimento, que se denomina «valor esperado», pero cualquier único experimento real dará un resultado diferente. Se utiliza el término «fluctuación cuántica» para sugerir la forma en que los valores de las magnitudes físicas varían en las teorías cuánticas.

Las teorías cuánticas contrastan abruptamente con las teorías «clásicas», teorías deterministas, en las que puede predecirse en principio el estado futuro preciso de un sistema físico. Las teorías clásicas, como la mecánica de Newton y la electrodinámica de Maxwell, resultan ser inadecuadas para describir la estructura de los átomos, el comportamiento de los átomos en las moléculas, y el comportamiento de la luz en ciertas circunstancias.

Existen diversas teorías cuánticas. Originalmente los físicos describían los átomos utilizando la teoría cuántica, pero describían los campos electromagnéticos en los átomos mediante leyes completamente deterministas. Más adelante los físicos idearon teorías acertadas de «campos cuánticos», en las que los campos tales como el electromagnetismo tenían fluctuaciones cuánticas. Es interesante que las fluctuaciones en los campos ocurren incluso cuando no hay campo presente de acuerdo con las expectativas clásicas. Éstas se denominan «fluctuaciones del vacío» y son aspectos bien establecidos de la teoría cuántica de campos. Kip Thorne señala cerca del final de su ensayo que las fluctuaciones del vacío pueden desempeñar un papel crucial para impedir la existencia de *agujeros de gusano*.

Actualmente, los físicos utilizan teorías que tratan el propio espaciotiempo como si fuera clásico. Estas teorías híbridas (espaciotiempo clásico, contenido cuántico del espaciotiempo) se denominan teorías «semiclásicas». Un desafío persistente de la física teórica es encontrar una «teoría cuántica completa» que describa las fluctuaciones del espaciotiempo, o de la *métrica*, así como de todo lo que hay en él. Una teoría semejante, que reemplazaría a la *relatividad general*, se denomina a veces «gravedad cuántica».

Una característica común a todas las teorías cuánticas es que las fluctuaciones cuánticas siguen ciertas leyes. La ley más importante es el «principio de incertidumbre», mencionado por Stephen Hawking. Según el principio de incertidumbre, las magnitudes medibles pueden clasificarse en pares con fluctuaciones correlacionadas. Si la naturaleza del sistema físico hace que una magnitud del par esté muy bien determinada, entonces el otro miembro del par debe estar muy mal determinado: debe fluctuar incontroladamente. La posición y la velocidad de una partícula constituyen uno de tales pares. En una teoría de gravedad cuántica un par semejante sería la localización de un suceso en el espaciotiempo y la energía asociada con dicho suceso. Algunos físicos creen que las fluctuaciones cuánticas del espaciotiempo cerca de una *singularidad* «suavizarán» los infinitos predichos clásicamente y restaurarán la predecibilidad (una predecibilidad cuántica, limitada) en el espaciotiempo. (Véase *censura cósmica*).

Tiempo de Planck. Por el momento no hay ninguna teoría que combine la gravedad en el espaciotiempo curvo de Einstein con los principios de la *teoría cuántica*, pero pese a todo es posible hacer enunciados bastante seguros acerca de algunas características de una teoría completa. Uno de estos enunciados, y muy importante, tiene que ver con las «unidades de

Planck» (también llamadas «unidades de Planck/Wheeler») —la energía, tiempo y distancia característicos de las interacciones que combinan en pie de igualdad la gravedad del espaciotiempo curvo con la teoría cuántica. Los físicos argumentan que estas unidades pueden construirse a partir de las constantes fundamentales de la teoría física: la velocidad de la luz incorporada en la relatividad especial, la constante de Planck de la teoría cuántica y la constante universal de la teoría de la gravitación. El tiempo de Planck resulta ser $\sqrt{\hbar G/c^3}$, cuyo valor numérico es del orden de 10^{-34} segundos.

Valor esperado. Véase teoría cuántica



STEPHEN WILLIAM HAWKING (Oxford, Reino Unido - 8 de enero de 1942) es un físico teórico, astrofísico, cosmólogo y divulgador científico británico. Sus trabajos más importantes hasta la fecha han consistido en aportar, junto con Roger Penrose, teoremas respecto a las singularidades espaciotemporales en el marco de la relatividad general, y la predicción teórica de que los agujeros negros emitirían radiación, lo que se conoce hoy en día como radiación de Hawking (o a veces radiación Bekenstein-Hawking).

Es miembro de la Real Sociedad de Londres, de la Academia Pontificia de las Ciencias y de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos. Fue titular de la Cátedra Lucasiana de Matemáticas (Lucasian Chair of Mathematics) de la Universidad de Cambridge desde 1979 hasta su jubilación en 2009. Entre las numerosas distinciones que le han sido concedidas, Hawking ha sido honrado con doce doctorados *honoris causa* y ha sido galardonado con la Orden del Imperio Británico (grado CBE) en 1982, con el Premio Príncipe de Asturias de la Concordia en 1989, con la Medalla Copley en 2006 y con la Medalla de la Libertad en 2009.

Hawking padece una enfermedad motoneuronal relacionada con la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) que ha ido agravando su estado con el paso de los años, hasta dejarlo casi completamente paralizado, y lo ha forzado a comunicarse a través de un aparato generador de voz. Ha estado casado en dos ocasiones y ha tenido tres hijos. Por su parte, ha alcanzado éxitos de ventas con sus trabajos divulgativos sobre Ciencia, en los que discute sobre sus propias teorías y la cosmología en general; estos incluyen *A Brief History of Time*, que estuvo en la lista de *best-sellers* del *The Sunday Times* británico durante 237 semanas.

KIP STEPHEN THORNE (Logan, Utah, 1 de junio de 1940) es un físico teórico estadounidense, conocido por sus numerosas contribuciones en el campo de la física gravitacional y la astrofísica y por haber formado a toda una generación de científicos. Viejo amigo y colega de Stephen Hawking y Carl Sagan, ocupó la cátedra "Profesor Feynman" de Física Teórica en el Instituto Tecnológico de California hasta 2009. Thorne es uno de los mayores expertos mundiales en las aplicaciones a la astrofísica de la Teoría de la Relatividad General de Einstein. En la actualidad prosigue sus investigaciones científicas.

ÍGOR DMÍTRIEVICH NÓVIKOV (10 de noviembre de 1935 en Moscú, Rusia) es un astrofísico teórico y cosmólogo ruso (y anteriormente soviético).

Nóvikov formuló el principio de autoconsistencia de Novikov a mediados de los 80, una importante contribución a la teoría del viaje a través del tiempo.

Nóvikov consiguió su Ph.D. en astrofísica en 1965 y el Doctorado en astrofísica en 1970. De 1974 a 1990 fue jefe del Departamento de Astrofísica Relativista en el Instituto de Investigación Espacial en Moscú. Antes de 1991 fue jefe del Departamento de Astrofísica Teórica en el Instituto de Física Lébedev en Moscú y profesor en la Universidad Estatal de Moscú. Desde 1994 ha sido director del Centro de Astrofísica Teórica (TAC) de la Universidad de Copenhague, Dinamarca. Actualmente también es profesor de astrofísica en el Observatorio de la Universidad de Copenhague, donde ha estado desde 1991. Desde 1998 es Miembro de la Royal Astronomical Society.

Nóvikov está casado con Eleonora Kotok y tiene dos hijos, Elena y Dmitri. Su padre desapareció bajo el mandato de Stalin y su madre pasó años en el gulag. Eventualmente quedó bajo la protección de Yákov Zeldóvich.

TIMOTHY FERRIS (29 de agosto 1944) es un escritor de ciencia y autor de éxito. Entre sus libros destacan *La Ciencia de la Libertad* (2010) y *La mayoría de edad en la Vía Láctea* (1988), por el que fue galardonado con la American Institute of Physics Prize y fue nominado para el Premio Pulitzer también escribió *The Whole Shebang: A State-of-the-Universe(s) Report* (1997)), un libro de divulgación científica en el estudio del universo.

RICHARD PRICE Escritor y guionista americano, ha sido profesor de escritura creativa en diversas universidades, recibiendo en 1999 el Premio de la Academia Americana de las Artes y las Letras.

Dedicado a la novela negra, Price ha sido comparado con Raymond Chandler y ha publicado más de 8 novelas. Como guionista, Price fue nominado al Oscar por *El color del dinero* y en televisión ha participado de proyectos tan importantes como *The Wire*.

Notas

- [1] Thorne, Kip S., *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, W. W. Norton, Nueva York, 1994. (Hay traducción española: *Agujeros negros y tiempo curvo*, Crítica, Barcelona, 1995). <<
- [2] Taylor, Edwin F., y John Archibald Wheeler, *Spacetime Physics*, W. H. Freeman, San Francisco, 1992. <<
- [3] Huggett, Nick, *Space from Zeno to Einstein: Classic Readings with a Contemporary Commentary*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1999. <<
- [4] A la velocidad c se le llama normalmente «velocidad de la luz», pero esto puede ser equívoco, de modo que voy a evitarlo. Llamar a c velocidad de la luz se interpreta demasiado a menudo dando a entender que la propagación de la luz es de algún modo responsable de los efectos relativistas, cuando de hecho la propagación de las señales luminosas no tiene nada que ver con dichos efectos. La luz sí se mueve (en el vacío) a la velocidad c , pero ésta es una consecuencia del papel que c juega en la estructura del espaciotiempo. Aunque no hubiera electromagnetismo, seguiría existiendo c . <<
- [5] El espaciotiempo de Schwarzschild se llama así por Karl Schwarzschild, quien en 1916 demostró que es una solución de las ecuaciones de Einstein. Las coordenadas radial y temporal aquí descritas se suelen denominar «coordenadas de Schwarzschild». <<
- [6] La coordenada temporal tradicionalmente utilizada es conveniente porque, con este significado de tiempo, el campo gravitatorio no está variando en el tiempo. Esto resulta intuitivamente perturbador porque nuestra intuición nos dice que el campo gravitatorio o bien *está* o bien *no está* variando en el tiempo. Esta intuición falaz se basa en la idea —difícil de apartar— de que el tiempo es absoluto; y podría medirse por un reloj universal que marcha igual para todos y para todas las cosas. <<
- [7] Thorne, Kip S., «Closed Timelike Curves», en *General Relativity and Gravitation 1992: Proceedings of the 13th International Conference on General Relativity and Gravitation*, R. J. Gleiser, C. N. Kozameh, y O. M. Moreschi, eds., Institute of Physics Publishing, Bristol, Inglaterra, 1993, pp. 295-315. <<
- [8] Cassidy, M. J., y S. W. Hawking, «Models for Chronology Selection», *Physical Review*, D57 (1998), pp. 2372-2380. <<
- [9] O, más exactamente, nada puede moverse hacia atrás a través del flujo del tiempo *local*. Si es posible el viaje hacia atrás en el tiempo, entonces (como Novikov explica antes en este volumen) sólo puede lograrse haciendo un viaje de ida-y-vuelta (tal como a través de un agujero de gusano), en el que uno está siempre moviéndose hacia adelante con el flujo local del «río del tiempo» pero vuelve al punto de partida antes de ponerse en marcha. Pronosticaré sobre esto al final de mi ensayo. <<
- [10] Para expertos en las matemáticas de los agujeros negros: estoy suponiendo que $a/M = 0,999$. <<
- [11] Una investigación más reciente, iniciada por mi amigo canadiense-sudafricano Werner Israel, ha demostrado que, a medida que el agujero negro envejece, la distorsión en torno a su singularidad se hace más suave, y posiblemente incluso menos letal. Soy escéptico acerca de que se haga menos letal, pero debo admitir que mi escepticismo no tiene una base firme. Sólo las leyes de la gravedad cuántica (discutidas en otro lugar en mi ensayo) lo saben con certeza. <<
- [12] He modificado esta especulación respecto a la versión en mi charla en el Festival Kip, debido a nuevas ideas surgidas en los meses transcurridos desde entonces y antes de que este libro entrara en prensa. <<
- [13] En la versión oral original de este ensayo, yo ofrecía una predicción de que para 2002 estaría completamente claro que existe la energía oscura. He suprimido dicha predicción de esta

versión escrita de mi charla porque, cuando este libro entra en prensa en enero de 2002, nuevas observaciones cosmológicas han confirmado su existencia con alta fiabilidad. ¡Predecir que la energía oscura es real parece ahora mucho menos atrevido de lo que era en junio de 2000! <<

^[14] En realidad, como se describe en mi libro, son las «fluctuaciones del vacío» del campo de radiación las que hacen este primer viaje y se acumulan sobre sí mismas. <<

^[15] Richard P. Feynman, *The Meaning of It All: Thoughts of a Citizen Scientist*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1998, p. 49. (Hay traducción española: *¿Qué significa todo eso?*, Crítica, Barcelona, 1999). <<

^[16] *Wisconsin State Journal*, 30 de abril de 1929; citado en Helge S. Kragh, *Dirac: A Scientific Biography*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990, p. 73. <<

^[17] National Science Foundation, *Science & Engineering Indicators 1996*; citado en *Skeptical Inquirer*, noviembre/diciembre 1996, pp. 6-7. <<

^[18] Rainer Maria Rilke, *Letters to a Young Poet*, W. W. Norton, Nueva York, 1962, p. 35. <<

^[19] Richard Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1963, p. 171. (Hay traducción castellana: *El carácter de la ley física*, Tusquets, Barcelona, 2000). <<

^[20] Albert Einstein, carta a Paul Ehrenfest, 24 de septiembre de 1929; citado en Albrecht Fölsing, *Albert Einstein: A Biography*, trans. Ewald Osers, Viking Books, Nueva York, 1997, p. 606. <<

^[21] Walt Whitman, «Out of the Cradle Endlessly Rocking», de la sección *Sea-Drift* de *Leaves of Grass* (publicado por el autor, 1855; muchas ediciones y reediciones posteriores). <<

^[22] Rilke, pp. 18-19. <<

[*] Hay traducción castellana: *Informe sobre el Universo*, Crítica, Barcelona, 1998. (N. del t.)<<

[*] Es bien sabido que la enfermedad de Hawking le obliga a desplazarse en una silla motorizada. Tanto cátedra como silla se designan por el mismo término inglés, *chair*. (N. del t.)<<