The background of the cover is a dark, starry space. A bright, multi-colored starburst or lens flare is centered vertically, with a prominent yellow and orange core. A thin, curved red line arcs across the left side of the image. Several other smaller, colorful lens flares are scattered in the upper right quadrant.

ROBERTO

EMPARAN

ILUMINANDO

EL

LADO OSCURO

DEL

UNIVERSO

AGUJEROS NEGROS,
ONDAS GRAVITATORIAS,
Y OTRAS MELODÍAS
DE EINSTEIN

Ariel

Índice

Portada

Sinopsis

Portadilla

Dedicatoria

Cita

Temblor en la noche

Preludio: «Algo se quebró dentro de mi»

Parte I. Más inteligentes que su creador

1. El perseguidor
2. Luz absoluta
3. Espaciotiempo
4. Años extraordinarios
5. «La idea más feliz de mi vida»
6. Tempus fugit
7. La gran ilusión
8. El spaciotiempo vivo
9. Tres veces me negarás
10. Las negras amnesias del cielo
11. Obstinadamente persistente

Parte II. El gato de Confucio

12. Ondas
13. Rumor de olas
14. El ruido y la furia
15. 21 ceros
16. LIGO
17. Detección
18. De todo lo visible y lo invisible

Línea de tiempo

Suplementos

- A. Los relojes en movimiento se ralentizan
- B. El movimiento contrae las distancias
- C. La gravedad ralentiza el paso del tiempo
- D. El principio de equivalencia en experimentos caseros
- E. Las ecuaciones de Einstein
- F. La polarización de las ondas

G. Distorsión: el origen de los 21 ceros

H. «GW150914»

Agradecimientos

Notas

Créditos

Gracias por adquirir este eBook

Visita Planetadelibros.com y descubre
una
nueva forma de disfrutar de la lectura

**¡Regístrate y accede a contenidos
exclusivos!**

Primeros capítulos
Fragmentos de próximas publicaciones
Clubs de lectura con los autores
Concursos, sorteos y promociones
Participa en presentaciones de libros

PlanetadeLibros

Comparte tu opinión en la ficha del libro
y en nuestras redes sociales:



Explora

Descubre

Comparte

SINOPSIS

El descubrimiento de las ondas gravitatorias —el peculiar sonido de dos agujeros negros que chocan y se funden uno con otro— cambiará nuestra manera de imaginar el universo: a partir de ahora escucharemos su banda sonora.

¿Qué significa este hallazgo histórico, y cómo hemos llegado hasta él?

Este es el relato de una fascinante odisea que comenzó hace más de cien años con un joven llamado Albert Einstein. Roberto Emparán, uno de nuestros físicos más reconocidos internacionalmente en el campo de la gravedad, los agujeros negros y la teoría de supercuerdas, ha compuesto una historia de ciencia en acción, que nos invita a recorrer en compañía de sus protagonistas, con sus defectos y sus emociones, en la búsqueda de respuestas a preguntas fundamentales.

Una guía de viaje accesible, estimulante y fiable hacia las sorprendentes ideas sobre el tiempo y el espacio que hace un siglo se imaginaron y hoy por fin hemos conseguido demostrar.

Preparémonos para iluminar el lado oscuro del universo y disfrutar así de la extraordinaria música de la oscuridad cósmica.

Roberto Emparan

Iluminando el lado oscuro del universo

Agujeros negros, ondas gravitatorias y otras melodías de
Einstein

Ariel

A Yolanda, a Sofía y a Javier

A mi madre y a la memoria de mi padre

What is now proved was once, only imagin'd
(Lo ahora demostrado fue en otro tiempo, tan solo imaginado)

WILLIAM BLAKE,
The Marriage of Heaven and Hell

Temblor en la noche

14 de septiembre de 2015. Son las 9 horas, 50 minutos y 45 segundos en el horario universal de los astrónomos. En Estados Unidos es de noche. Nadie atiende a los dos detectores de ondas gravitatorias que, en este instante, son los primeros testigos de uno de los más insólitos espectáculos del universo. Ocurre a mil millones de años luz de la Tierra y en una oscuridad absoluta.

Los protagonistas son una pareja de agujeros negros que danzan vertiginosamente en círculo hasta fusionarse en uno solo. El escenario, un espacio vacío pero elástico, se agita con una violencia apenas imaginable. Sin embargo, la colisión es invisible, no emite ninguna luz. La delatan sus temblores, que dan lugar a lo que llamamos ondas gravitatorias: las vibraciones del espacio y el tiempo.

Este estruendo se dispersa por todo el cosmos a la velocidad de la luz hasta que a nuestros instrumentos solo llega un leve rumor a escalas subatómicas. Apenas dura dos décimas de segundo, pero es uno de los momentos más intensos en la historia de la ciencia moderna: por primera vez hemos sentido estremecerse el espaciotiempo.

La detección de estas ondas no solo demuestra algo que Einstein predijo hace ya un siglo; también nos trae las primeras notas de una música cósmica nueva y extraña, el prelude de una composición grandiosa que cambiará nuestra manera de imaginar el universo. Cuando ahora contemplemos el cielo nocturno, en él ya no solo hallaremos el brillo de estrellas y galaxias. Será también el lugar del que provienen, desde una oscuridad lejana, acordes enigmáticos.

Pero ¿qué significa todo esto, y cómo hemos llegado a ello? Para entenderlo, partiremos del momento en que, hace poco más de cien años, se comenzó a imaginar lo que hoy se ha demostrado. Asistiremos entonces al relato de una de las más extraordinarias hazañas en nuestro intento por comprender el universo, una odisea intensamente humana y, por tanto, llena de

emociones, de luces y de sombras. Podremos así apreciar la magnitud del logro y comenzaremos a disfrutar del espléndido universo sonoro en el que ahora nos adentramos.

Habrá ocasiones en el libro en las que podremos elegir el tipo de lectura con que nos sintamos más a gusto. Encontraremos apartados en el texto, en letra algo menor, que requieren, si queremos seguirlos, un poco más de atención, pero no será problema si preferimos pasar rápidamente sobre ellos. Las invitaciones a argumentos más elaborados nos llevarán a suplementos al final del libro. Y para los más curiosos hay en las últimas páginas una sección con anotaciones diversas y referencias.

Ya podemos comenzar. No necesitamos más que concedernos un poco de espacio y de tiempo.

PRELUDIO
«Algo se quebró dentro de mí»

¿Cómo vivir sin lo desconocido delante?

RENÉ CHAR, *Le poème pulvérisé*

¿Qué son el espacio y el tiempo? Si nos piden que lo expliquemos, la mayoría de nosotros nos embrollamos y acabamos dando vueltas sobre nuestras propias palabras. Pese a esto, creemos que nuestra intuición sobre ellos, aunque difícil de precisar, es al menos fiable. Sin embargo, no es así.

Hace ya más de cien años que descubrimos que el tiempo y el espacio se deforman continuamente en presencia de la materia y la energía. La fuerza de la gravedad no existe: es una ilusión producida por la incesante interacción entre la geometría cambiante del espaciotiempo y los objetos que en él se mueven.

Pero ¿qué quiere decir esto? Aunque ahora la imagen nos parezca oscura y enigmática, según avancemos en el libro la veremos hacerse más clara y definida, hasta que nos atrape en toda su fascinación. Veremos también que la idea no llegó de forma repentina, sino que fue alumbrada gradual y laboriosamente. Aun así, existió un momento preciso en el que adquirió la certeza de lo casi tangible en la mente de un hombre.

Buscamos a este hombre en Berlín, a mediados de noviembre de 1915, y lo hallamos en su apartamento, sentado a su mesa.¹ Vemos cómo, afanoso, llena hoja tras hoja con su caligrafía limpia y menuda. Escribe números y, sobre todo, símbolos matemáticos. La habitación huele a café y a tabaco: hace semanas que se mantiene con poco más que eso, y apenas pisa la calle, donde las noticias sobre la atroz guerra dominan el ambiente desde hace más de un año. La contienda parece transcurrir favorablemente para su país natal, pero él no comparte la exaltación reinante. De hecho, cuando era solo un adolescente se convirtió en apátrida para evitar servir en el ejército del káiser.² Y aunque hace poco hubo de jurar como ciudadano alemán —algo necesario para asumir su puesto de profesor distinguido en la capital—, él se ha manifestado abiertamente en contra de esa matanza provocada por absurdos orgullos nacionales.

En cualquier caso, ahora nada de esto le importa: su mente vuela muy lejos de las mezquindades humanas. Persigue algo mucho más elevado, un anhelo que lo ha consumido durante los últimos años: una concepción radicalmente nueva de la Naturaleza.

Él es —quién si no— Albert Einstein, y a sus treinta y seis años su apariencia difiere bastante de la del sabio afable y algo socarrón cuya alborotada melena blanca llegará a ser el gran icono de la ciencia moderna. Su bigote, todavía negro, y sobre todo su peculiar mirada de sabueso nos permiten relacionarlo con el personaje en que se convertirá más adelante, cuando la época de sus sorprendentes descubrimientos quede atrás y lo rodee una popularidad inusitada.

Entre sus colegas, su reputación ha adquirido aires de leyenda desde que, hace ya una década, comenzó a demoler y reconstruir uno tras otro varios pilares de la ciencia. Pero nadie acaba de entender bien qué es lo que hace ahora, ni qué lo motiva tan intensamente. En esta época, la física está en crisis tratando de descifrar el misterioso comportamiento de los átomos y la radiación. Sin embargo, él ha decidido adentrarse en solitario en un laberinto de matemáticas arcanas. Persigue extrañas ideas sobre la gravedad. Es decir, sobre aquello que mejor entendemos desde que Newton formuló lapidariamente las leyes que rigen con precisión el movimiento de los planetas.

Ninguno de sus colegas comparte su entusiasmo, excepto uno. David Hilbert, el matemático más importante de esta época, le viene pisando los talones desde hace unas semanas. Esto aumenta el desasosiego de Einstein, pero no es por eso que su corazón se acelera ahora, mientras avanza resolviendo sus ecuaciones. Se trata de algo mucho más crítico: su revolucionaria visión está en juego. Si se hallase en lo cierto, una grieta en las leyes de Newton desvelaría el acceso a una nueva perspectiva de nuestro universo, tan insospechada como portentosa.

Einstein sabe que la teoría de Newton es incapaz de dar cuenta de un número, un ínfimo avance en el movimiento del planeta Mercurio cuando este pasa por su posición más cercana al Sol, es decir, cuando más fuerte es la atracción gravitatoria entre ambos cuerpos. Los astrónomos han determinado con sus minuciosas observaciones que ese adelanto de la órbita es de 43

segundos de arco cada siglo, un desplazamiento diminuto pero indiscutible.³ Esta anomalía se detectó por primera vez en el siglo XIX, y sesenta años más tarde, en 1915, todavía nadie ha sabido explicarla.⁴ Parece no ser más que un desajuste nimio en la relojería cósmica de Newton, pero para Einstein es una oportunidad única de poner a prueba la realidad que cree atisbar más allá.

El número 43 se hace cada vez más prominente en su mente según se aproxima con ansiedad a la conclusión del cálculo.⁵ Avanza deprisa, puesto que un año antes ya había hecho estas cuentas con una versión anterior — errónea— de su teoría. Con ella no llegaba a obtener ni la mitad del valor observado. Pero en esta ocasión ha dado con la formulación perfecta. No hay posibilidad de modificarla sin desbaratar toda la estructura reduciéndola a un mero espejismo, una quimera. Así pues, es abrumadoramente consciente de lo que la apuesta le supone. Cuando finalmente las ecuaciones arrojan el resultado, su mano y todo su cuerpo se paralizan: 43. Directo en la diana.

Años más tarde, Einstein rememorará vívidamente sus sensaciones en ese instante: «Tuve palpitaciones en mi corazón. [...] Durante unos días estuve fuera de mí, incapaz de trabajar por la excitación». Y más dramáticamente: «Sentí como si algo se quebrara dentro de mí». Seguramente fue su experiencia emocional más intensa —el momento que todos los científicos le envidiamos— en una vida dedicada plenamente a la ciencia. También fue para él la confirmación decisiva que le dio absoluta confianza en la teoría. La Naturaleza, interrogada como un oráculo, le había hablado.

Cuatro años después, finalizada ya la Gran Guerra, Einstein se convirtió en una celebridad internacional. Se había verificado otra predicción de su teoría, otro efecto apenas detectable. En este caso se trataba de una ligera desviación en los rayos de luz que, procedentes de estrellas lejanas, pasan cerca del Sol en su trayecto hacia nosotros y sienten intensamente la gravedad solar. La observación (sobre la que volveremos en el capítulo 6) requería esperar a un eclipse total para fotografiar las estrellas en torno al disco solar. ¿El resultado de las mediciones? Éxito de Einstein, Newton destronado.

En los días posteriores al anuncio de estos resultados, los principales periódicos del mundo occidental fueron apercibiéndose de la importancia histórica de la noticia. «Revolución en la ciencia. Nueva teoría del universo», proclamaba *The Times* en Londres. «Las luces del cielo totalmente torcidas.

La teoría de Einstein triunfa», pregonaba, entre otras extravagancias, el *New York Times*. «Un nuevo gigante en la historia del mundo: Albert Einstein», anunciaba días más tarde el *Illustrirte Zeitung* de Berlín, bajo un primer plano a portada completa del genio en pose meditativa.

Nuestra época albergaba un portentoso: Albert Einstein, el profeta visionario que con la sola ayuda de su poderoso intelecto había ascendido la montaña de los secretos del cosmos para bajar de ella mostrándonos un nuevo orden universal, inscrito en caracteres matemáticos impenetrables para el resto de los mortales. La observación del eclipse había sido el experimento crítico sobre el que había basculado su teoría, aquello que había hecho que su visión de un espacio y un tiempo deformados elásticamente pasase de pura especulación a ser un hecho probado. ¿Qué mejor muestra que el hecho de que hasta los rayos de luz se curven en su camino? Para Einstein, sin embargo, la suerte ya había sido echada aquel día de noviembre de 1915. Poco antes del anuncio de los resultados del eclipse, una estudiante le preguntó sobre su reacción en caso de que las observaciones acabasen contradiciéndole. Einstein contestó, inmutable: «Lo sentiría por el Señor. La teoría es correcta».

Casi exactamente cien años después, Einstein volvió a copar las portadas de los periódicos de todo el mundo. El 11 de febrero de 2016, en rueda de prensa retransmitida a través de internet, el portavoz de la colaboración científica LIGO* exclamó: «¡Lo hemos hecho! ¡Hemos detectado las ondas gravitatorias!».⁶ Una vez más, un efecto inimaginablemente pequeño, predicho por Einstein, había sido verificado. Al día siguiente —no: inmediatamente después—, los medios pregonaban un mismo mensaje: «¡Tenía razón!», junto a la fotografía de quien ahora era reconocible sin necesidad de que se mencionase su nombre.

¿Cómo es posible que un descubrimiento tan enigmático como insospechado para la mayoría de nosotros —el espaciotiempo vibra, tal y como Einstein había anticipado— se impusiera a todas las demás noticias de ese día? La crisis financiera, los escándalos de corrupción y la masacre en Oriente Medio, eco lejano de aquella guerra de cien años atrás, se vieron arrinconados, no por una cura para el cáncer o el alzhéimer, ni por un avance decisivo en genética o nanotecnología, sino por un fenómeno que involucra ideas desconcertantes y distancias y tiempos casi inconcebibles. ¿Agujeros

negros, Big Bang, ondas gravitatorias? Ese día vi en televisión a un tertuliano afirmar con desdén que, de no haber estado la figura de Einstein por medio, a nadie le habría importado lo más mínimo la noticia. No se daba cuenta de que su cinismo de zoquete lo remitía a una pregunta previa más interesante: ¿qué es lo que había hecho Einstein para que la sola mención de su nombre llegase a generar semejante atracción?

Sin duda hay aquí motivos mundanos, como el carisma de Einstein, quien gustaba mucho a la cámara por su singular encarnación del genio, y al público y a la prensa por su llaneza y facilidad para el aforismo. Pero creo que la respuesta también entraña algo mucho más importante y positivo sobre el ser humano de lo que el tertuliano, arrogante en su ignorancia, quería aceptar. A la perplejidad inicial que causan los descubrimientos asociados a Einstein siempre le siguen el asombro, el sobrecogimiento y la admiración. Quizás no comprendamos bien lo que nos cuentan, pero sí podemos apreciar la misteriosa grandeza del contexto. Eso que nos dicen ha de ser un ingrediente importante de la respuesta a la gran cuestión. Todos, siquiera en algún breve momento de nuestras vidas, en una forma mejor o peor articulada, nos hemos preguntado cómo pudo empezar todo, cómo hemos llegado aquí. Pero algunos descubrimientos fundamentales, como el del bosón de Higgs, son tan recónditos que a los físicos nos cuesta mucho no solo explicarlos, sino incluso transmitir convincentemente algo más básico: por qué nos interesan tanto.

No sucede lo mismo con las ideas de Einstein. El origen y destino del universo. Los límites y la naturaleza del tiempo y el espacio. Aquí usamos términos que todos reconocemos, pero al hacerlo de forma poco convencional, casi esotérica —¿espacio y tiempo *curvos*?—, tenemos la impresión de que accedemos a algo profundo, quizás no útil, pero sí claramente importante. Esta sensación de hallarnos frente a algo más grande que nosotros, justo al borde de lo que podemos comprender, es lo que aviva en nosotros esa curiosidad tan natural como genuina.

La detección de las ondas gravitatorias ha vuelto a poner un potente foco sobre estos temas. En una coincidencia afortunada, el descubrimiento ocurrió mientras estábamos celebrando el centenario de la culminación por Einstein de su teoría general de la relatividad, en las fechas del episodio con el que hemos comenzado hace unas páginas. Es ahora, cien años después, cuando las

consecuencias más profundas de esta teoría pasan a dominar la investigación del universo. Sin embargo, las ideas de Einstein y sus insólitas implicaciones continúan siendo poco familiares para los no expertos. Muchos se habrán preguntado no solo qué significa que el espaciotiempo vibre como si fuese elástico, sino también a qué viene tanto revuelo, si al fin y al cabo Einstein ya sabía todo esto. ¿Qué ha pasado en estos cien años para que solo ahora lo hayamos podido verificar?

La historia de la teoría de Einstein, sus consecuencias y su comprobación por observaciones y experimentos, es mucho más rica y atractiva que las píldoras instantáneas que habitualmente encontramos en la prensa generalista. Uno de sus elementos más paradójicos, pero también más instructivos sobre lo que es la ciencia, es el hecho de que podríamos decir que quizás Einstein *no* tenía razón, pero sin embargo su teoría, sus ecuaciones, sí la tenían.

Por ello, en este libro, el protagonismo pasará gradualmente de la persona —Einstein— a la idea: la concepción del espacio y el tiempo, el tejido básico del universo, como algo vivo, dinámico, que va más lejos de lo que el mismo Einstein creyó posible. Porque tras haber engendrado su nueva visión, que llevaba las fronteras de la física mucho más allá de lo que sus contemporáneos habían sospechado, Einstein comenzó a toparse con los límites de su propia imaginación. Por tres veces rehusó seguir hasta las últimas consecuencias lo que sus ecuaciones le decían, y renegó de sus predicciones más sensacionales. En dos de esos casos —la expansión del universo y las ondas gravitatorias— se retractó posteriormente de su error. Pero no así en el tercero y quizás más lamentable de ellos. Einstein nunca llegó a comprender que su teoría predecía la existencia de los objetos más fantásticos jamás imaginados por la mente humana: los agujeros negros. Las ecuaciones resultaron ser más inteligentes que su creador.

Hoy en día entendemos que los agujeros negros destilan la esencia de la teoría de Einstein y contienen la clave para ir más allá de ella. Llegar a entender y aceptar lo que estas ecuaciones nos estaban diciendo ha sido una tarea colectiva, difícil y larga. Dar los primeros pasos llevó más de cincuenta años, en un camino que todavía no ha llegado a su fin. Así, en la primera parte del libro veremos evolucionar y crecer las ideas centrales de la teoría de Einstein con la turbulencia y confusión propias de la infancia y adolescencia,

prolongadas durante décadas. La segunda parte narra los sucesos que han llevado la teoría a las puertas de la madurez. La reciente y espectacular verificación directa de la existencia de las ondas gravitatorias es solo un comienzo: los próximos cien años de exploración del universo serán el siglo de la gravedad. El principal motivo es la enorme importancia de aquello que menos conocemos en el cosmos: todo lo que se oculta de la luz.

El origen del universo y el final de las estrellas más masivas se nos esconden bajo densos mantos de materia y plasma completamente opacos al paso de la luz y la radiación. Y hay mucho más que no vemos. El fin del milenio nos dejó una enigmática e inquietante visión del universo: el 96 % de su contenido de materia y energía, y casi la totalidad de su entropía (es decir, la medida del grado de desorden de un sistema), residen en forma invisible, no solo por la luz que nuestros ojos pueden captar, sino también imperceptible para las antenas de radio y para los detectores de rayos X y gamma. Si eliminásemos del universo actual lo que podemos observar con esas radiaciones, la evolución futura del cosmos apenas se vería alterada. No así a la inversa: si retirásemos la parte invisible, las galaxias se desmembrarían y el destino del universo se trastocaría radicalmente.

Pero si el cosmos está abrumadoramente dominado por su lado oscuro e invisible, ¿cómo lo hemos descubierto y cómo podremos investigarlo?

La clave reside en que, por mucho que uno se camufle en las tinieblas, no hay manera de escapar de la gravedad. Esto no es nuevo: ya en ocasiones anteriores los efectos de la gravedad nos han permitido descubrir lo que no habíamos podido ver, algo parecido a encontrar al hombre invisible por sus huellas en la nieve. La existencia de Neptuno y Plutón, y más recientemente la evidencia sobre los integrantes del universo oscuro —materia y energía oscuras, y agujeros negros—, fueron primeramente establecidas por sus consecuencias gravitatorias. Algo estaba tirando con la fuerza de su gravedad de otros cuerpos visibles. Pero esa información ha sido ante todo estática, limitada a señalar los tirones de alguien a quien no vemos. A partir de ahora, las ondas gravitatorias nos darán información dinámica sobre los movimientos de esas entidades ocultas e invisibles.

Lo más novedoso es que esa información no nos vendrá en forma de imágenes. Las ondas gravitatorias nos contarán historias y nos traerán voces y murmullos lejanos, tal y como estamos acostumbrados a que hagan los sonidos. Oiremos al hombre invisible moviéndose, y eso nos ayudará a averiguar quién es, qué hace y de qué está hecho. Y también descubriremos facetas desconocidas de un universo visible pero hasta ahora silencioso: los rumores, ecos y estruendos del paisaje se nos harán patentes, y los actores del cine mudo comenzarán a hablar.

Estos serán sonidos de alcance mucho mayor que los ordinarios, ya que las ondas gravitatorias no necesitan del aire para propagarse: tan solo requieren espacio y tiempo. Y al adquirir un nuevo sentido del oído no solo ampliaremos enormemente nuestros métodos de investigación: también se transformará nuestra manera de imaginar el universo.

El telescopio de Galileo nos permitió divisar luz más allá de lo que nuestros ojos alcanzan, y con ello abrió la vía hacia el descubrimiento de la inmensidad del cosmos. Este dejó de ser una esfera provincianamente centrada en la Tierra para ampliarse de forma vertiginosa a un lugar poblado por multitud de galaxias, cada una de ellas compuesta de cientos de miles de millones de estrellas, todas ellas coreografiadas en una serena danza.

Esta beatífica visión celestial se rompió en la segunda mitad del siglo pasado con el desarrollo de la nueva astronomía de ondas de radio y rayos X. Mediante estas nuevas formas de luz y radiación supimos de la deflagración primigenia del Big Bang, de cuásares que radian con potencia descomunal desde los límites del universo, de estrellas de neutrones inimaginablemente densas, y también tuvimos las primeras intimaciones de esos monstruos aniquiladores de estrellas, los agujeros negros. Sucede aquí lo mismo que cuando vemos los telediarios: aunque la mayor parte del mundo discurre apaciblemente, la imagen que se nos transmite, la que llama nuestra atención y conforma nuestra noción del presente, es la del hecho perturbador. Hoy en día vivimos en un universo de violencia extrema.

La astronomía de ondas gravitatorias dará una nueva dimensión a esta imagen. No es meramente otra extensión de nuestros ojos con la que ver más —más lejos o más clases de luz—, es una nueva forma de percibir que, en los próximos años, nos irá desvelando un universo pleno de sonoridades, el

auditorio de una gran sinfonía. Las frecuencias graves de los sonidos primordiales del Origen proporcionarán el *basso ostinato* sobre el que irá subiendo la escala cromática de los agujeros negros de distintos tamaños, puntuada por la percusión de cataclismos estelares, y quizás también por una sección de cuerdas cósmicas. Lo más excitante será cuando comencemos a distinguir acordes y armonías nuevas, susurros y ecos cuya existencia todavía no sospechamos.

La película del universo, siempre espectacular, nos va a resultar aún más fascinante al oír las voces de sus protagonistas, los sonidos de fondo y su sensacional banda sonora con orquestación del maestro Einstein.

PARTE I

Más inteligentes que su creador

Uno no puede evitar la sensación de que estas fórmulas matemáticas tienen una existencia independiente y una inteligencia propia, que son más sabias que nosotros, más sabias incluso que sus descubridores, que obtenemos de ellas más de lo que inicialmente se puso en ellas.¹

HEINRICH HERTZ

El perseguidor

Oscuridad y luz dividen el curso del tiempo.

THOMAS BROWNE, *Urn Burial*

Mencionamos el nombre de Einstein e inevitablemente surge alguna de las innumerables leyendas populares acerca de él. Unas simplifican sus contribuciones a la ciencia, otras recalcan su singularidad a la vez que, paradójicamente, lo hacen más próximo al común de los mortales, para que nadie dude de que, si no uno mismo, al menos los hijos sí pueden llegar a ser como Einstein. A menudo oímos que de pequeño tuvo problemas de aprendizaje y que fue un mal estudiante que suspendía en matemáticas. Que él y sus ideas fueron inicialmente rechazados por el sistema científico de su tiempo. Que nadie le entendía, y que incluso ahora apenas nadie comprende sus teorías. Que fue responsable de la bomba atómica como consecuencia de su más famosa fórmula, $E = mc^2$. Y que sus descubrimientos se resumen en que «todo es relativo».

Estas creencias, aunque falsas en general, tienen un grano de verdad en su origen que las ha mantenido vivas en el imaginario popular. Podemos comenzar con los mitos sobre su infancia. Se remontan a los primeros años tras el nacimiento, en 1879,¹ del pequeño Albert, de padres judíos no practicantes, Hermann y Pauline, en la vieja ciudad catedralicia de Ulm, a orillas del Danubio en el sur de Alemania. Hacía siglos que se decía «*Ulmenses sunt mathematici*»,² los de Ulm son matemáticos. Sin embargo, esta auspiciosa influencia local no pudo durar mucho: un año más tarde, la familia se trasladó a Múnich siguiendo los negocios, de prosperidad variable, de Hermann. Allí, cuando Albert contaba cerca de tres años, sus padres — posiblemente por iniciativa de Pauline, de carácter más enérgico que su

marido y con grandes ambiciones para su primogénito— hicieron que lo viera un médico, preocupados porque el pequeño todavía no hablaba. Muy probablemente aquí esté el germen de la leyenda sobre su tardío desarrollo.

No obstante, Albert comenzó a hablar poco después, pronunciando correctamente frases completas tras haberlas ensayado en voz baja. Esto sugiere, más que retraso, una señal temprana del carácter meditativo del niño. Y probablemente también un rasgo suyo menos conocido, pero quizás no infrecuente entre científicos. Él mismo describió su forma de pensar como predominantemente no verbal, consistente en su origen en imágenes y sensaciones que solo después de haber adquirido coherencia podía traducir a palabras. A lo largo de su vida, Einstein nunca tuvo gran facilidad para los idiomas. En la escuela era un alumno brillante (aunque no un prodigio), en particular en matemáticas y ciencias naturales, pero sus peores notas — simplemente aceptables— las obtenía en las asignaturas de latín, griego y francés, lengua esta en la que con el tiempo llegó a ser capaz de conversar y disertar, pero sin gran soltura. Tampoco llegó a sentirse del todo cómodo con el inglés, pese a más de veinte años de residencia en Estados Unidos.

Pero no conviene exagerar: Einstein se defendía también en italiano, ya que vivió en el norte de Italia durante el final de su adolescencia. De adulto escribía con gran claridad, expresividad y dominio del lenguaje. Sus aparentes dificultades verbales solo merecen mención por el contraste con su abrumador talento en otras áreas. Los malos estudiantes no pueden escudarse ni consolarse en el precedente de Einstein.

Persiguiendo la luz

Ya de adolescente, Albert mostraba lo que sería su carácter el resto de su vida: fuertemente independiente y suspicaz frente a cualquier tipo de autoridad, lo que le causó dificultades con la inflexible educación alemana de la época, otro elemento cierto de su leyenda. También estaba dotado de una gran capacidad de abstracción y concentración, así como de una singular tenacidad anclada en autoconfianza. No le faltaban motivos: llegó por su cuenta a dominar el cálculo diferencial e integral antes de los quince años, al

tiempo que se planteaba cuestiones científicas de carácter fundamental sorprendentemente agudas, tales como, ¿qué observaríamos si persiguiésemos un rayo de luz, corriendo junto a él hasta alcanzar su velocidad?³

Einstein entendía ya lo suficiente de las teorías físicas de la época, en particular, que la luz se propaga como una oscilación, una ola del campo electromagnético, para concluir, con perplejidad, que lo que así se vería —un rayo de luz en reposo, una onda que no avanza respecto al observador, tal y como ve la ola el surfista que monta en ella— no parecía corresponder a nada conocido. La solución, ahora lo sabemos, es tan simple como declarar que esa situación no pueda ocurrir: nos es imposible alcanzar la velocidad de la luz.

Llegar a esta conclusión y a sus consecuencias más profundas le requeriría al joven Einstein una década de maduración, mientras se adentraba en el estudio de la física más avanzada en busca de una solución al enigma. Pero aquí tenemos ya el esquema común de sus más grandes creaciones. Una intuición inicial sencilla pero penetrante, que revela una dificultad, incluso una contradicción en la base de la física. Una persecución incansable de esa idea durante años. Una solución original, elegante y revolucionaria, que altera irreversiblemente los fundamentos de nuestra visión de la Naturaleza.

Desde mi punto de vista

Para nosotros, lo importante de esa historia es que a sus dieciséis años, si no antes, Einstein ya se planteaba en qué manera el movimiento de un observador afecta a sus observaciones. No era desde luego el primero en hacerlo: esta fue una cuestión importante al comienzo de la ciencia moderna. Si, como propuso Copérnico, la Tierra se mueve, ¿cómo es que al lanzar una piedra verticalmente hacia arriba vuelve a caer al mismo punto desde el que la hemos lanzado? ¿No debería caer muy lejos, ya que la Tierra se ha desplazado durante el tiempo en que la piedra está en el aire? De hecho, ¿por qué no queda también atrás el aire, o nosotros mismos, cuando la Tierra se mueve por el espacio?

Galileo lo explicó hablando de navegantes que viajan en la bodega de un barco, pero a nosotros nos resulta más familiar pensar en pasajeros a bordo de trenes o aviones. Aunque estemos volando a 900 kilómetros por hora, la azafata acierta a echar el café en nuestra taza. Si se nos cae una moneda al suelo no tenemos que ir a recogerla al fondo del pasillo. Incluso podríamos jugar una partida de canicas tal y como si estuviésemos en el pasillo de una casa en la superficie de la Tierra. Concluimos que es imposible distinguir el movimiento uniforme, es decir, sin turbulencias ni cambios de dirección, del reposo. Galileo, convincente, arguye: de la misma manera, podemos concebir la Tierra como un gran navío en el que viajamos —nosotros y todos los objetos sobre el planeta— sin notar su movimiento por el espacio.

En otras palabras: el movimiento uniforme es *relativo*. Damos aquí la bienvenida al famoso término que nos indica que dos situaciones aparentemente diferentes pueden de hecho ser totalmente equivalentes, y convertimos esta observación en un principio, una suerte de superley que todas las demás leyes de la ciencia deben satisfacer: las leyes de la Naturaleza han de predecir los mismos fenómenos para quien esté quieto y para quien se mueva a velocidad constante.

Esto implica que, en realidad, no podemos decidir quién está en reposo y quién se mueve. Pensemos en esas ocasiones en que, sentados en el tren, vemos por la ventanilla otro vagón en la vía de al lado. Al observar cómo ese otro tren se mueve, nos entra la duda de si no será quizás nuestro vagón el que avanza, mientras el otro permanece quieto en la estación. Esta desconcertante incapacidad de saber quién se mueve y quién no, aún más, negar que exista ninguna manera única e inambigua de decidirlo, es lo que llamaremos relatividad del movimiento.

Bravo por Galileo, por haber sabido extraer de observaciones cotidianas un elemento esencial de la Naturaleza. Esto lo sitúa en un pedestal aparte en la ciencia, junto a Newton, Einstein y Darwin. Pero entonces, ¿qué hizo Einstein para que invariablemente asociemos la palabra *relatividad* con su nombre?

Persecución imposible

En su experimento mental adolescente, Einstein se dio cuenta de que si aplicamos el principio de relatividad suponiendo que no hay límites a la velocidad a la que podamos movernos, entonces encontramos dificultades. Si pudiésemos viajar a la velocidad de la luz, seríamos capaces de ver un rayo de luz en reposo.

¿Y por qué no vamos a poder alcanzar velocidades tan altas como queramos? Imaginemos que viajamos en un tren que va a 100 kilómetros por hora. Nos levantamos del asiento y corremos hacia la parte delantera del tren a 10 kilómetros por hora —esta es la velocidad medida dentro del tren, dividiendo la distancia que andamos en el pasillo por el tiempo que nos lleva recorrerla. Resulta claro (¿no es así?) que alguien que esté en el andén de la estación y nos vea pasar en ese momento dirá que nuestra velocidad respecto a él es de $100 + 10 = 110$ kilómetros por hora. Y si, mientras corremos, lanzamos hacia delante una pelota con una velocidad que medimos como 15 kilómetros por hora, entonces la persona en el andén observará que la pelota se mueve a 125 kilómetros por hora— simplemente seguimos sumando las distintas velocidades. Parece no haber límite: un insecto sobre la pelota que salte desde ella hacia delante también añadirá su velocidad, o la restará si salta hacia atrás. Repitiendo la suma de sucesivas velocidades, ¿por qué no imaginar, junto con el joven Albert, que lleguemos a alcanzar o superar la velocidad de la luz? Si así lo hacemos, podremos perseguir a velocidad creciente un rayo de luz emitido desde el andén. Nos parecerá que la velocidad a la que este rayo avanza respecto a nosotros es cada vez menor, hasta que le demos alcance y lo veamos, de manera efectiva, quieto.

El problema, se dio cuenta Einstein, es que esto no parecía posible. Repetidos intentos a lo largo del siglo XIX concluían, obstinadamente, que la luz no altera su velocidad, sin importar cuál sea el movimiento del aparato de medida ni la precisión del experimento. Y no solo existía un problema con las observaciones experimentales. Las leyes que regían el comportamiento de la luz habían sido establecidas por el escocés James Clerk Maxwell en la década de 1860, con su teoría del electromagnetismo. Sus ecuaciones no parecían admitir la posibilidad de sumar o restar la velocidad del aparato de medida a

la de la luz. Luego la teoría no podía describir un rayo de luz en reposo. Dicho de otro modo, las ecuaciones de Maxwell no parecían respetar el principio de relatividad de Galileo.

Ante este dilema —¿Galileo o Maxwell?—, inicialmente Einstein tomó el camino más obvio: la regla de la suma de velocidades de Galileo es de una inmediatez tan natural que apenas cabe ponerla en duda. Debía entonces servir de base para corregir la teoría del electromagnetismo. Pero todos sus esfuerzos en esta dirección fracasaban. No lograba hallar una modificación consistente —y convincente— de la teoría de Maxwell que la hiciera compatible con el principio de Galileo y que al mismo tiempo diese cuenta de la incapacidad de medir una variación en la velocidad de la luz.

Einstein mantuvo en su mente estas paradojas sobre la luz y el movimiento durante una década, en la que el adolescente precoz se convirtió en un joven bohemio que aspiraba a dedicarse a la física teórica. Las fue madurando lenta y obsesivamente, afinando su instinto para guiarse en la oscuridad. Cuando llegó su resolución, lo hizo con la claridad deslumbrante que confiere convicción a las ideas correctas.

Luz absoluta

Esta angostura de espacio es angostura de tiempo.¹

RAMÓN DEL VALLE-INCLÁN

Era un radiante día de la primavera de 1905. Einstein estaba de excelente ánimo: ya anticipaba la estimulante charla que esperaba tener con su amigo Michele Besso.

Conocía desde hacía casi diez años a este ingeniero ítalo-suizo, de origen sefardí, a quien recientemente había ayudado a conseguir un trabajo en su misma oficina en Berna —de hecho, un puesto mejor que el suyo propio—, y solían caminar juntos entre el trabajo y casa. Siempre habían congeniado: les gustaba discutir de filosofía, judaísmo y música, pero ante todo compartían su pasión por las cuestiones fundamentales de la ciencia. Puede que Besso careciese de la visión global de su amigo, pero aun así Einstein apreciaba enormemente su agudeza crítica: «la mejor caja de resonancia para mis ideas en toda Europa». Así es que, cuando ambos se encontraron ese día, Einstein entró directamente a la discusión diciendo: «Recientemente he estado trabajando en un problema difícil, y hoy quiero pelear contra ese problema contigo».

El enigma no era otro que la paradoja sobre la incompatibilidad entre Maxwell y Galileo, entre la luz y el movimiento. Lo examinaron con insistencia, alterando constantemente la perspectiva de ataque. En un momento de la discusión, Einstein dio con el ángulo clave por el que penetrar en su esencia. Ahora necesitaba retirarse para analizarlo cuidadosamente. Se despidieron, con sus mentes todavía bullendo por el intenso intercambio de ideas.

Cuando al día siguiente vio de nuevo a Besso, Einstein, muy excitado y sin saludar, le dijo: «¡Gracias: he resuelto completamente el problema!». Cinco semanas más tarde envió para publicación un artículo cuyo modesto, casi deliberadamente oscuro título de «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», no refleja la brillante claridad y profundidad de su contenido. En él, Einstein presentaba su enmienda revolucionaria a la constitución de los fundamentos de la física. La primera desde los tiempos de Newton.

Einstein había comprendido que sí es posible preservar tanto el principio de relatividad como la constancia de la velocidad de la luz, pero solo a cambio de abandonar la regla de la suma de velocidades y lo que de modo más profundo esto comporta: revisar la manera en que se miden las velocidades, esto es, la forma en que se determinan las posiciones y los instantes en que ocurren los sucesos. Revisar, en definitiva, lo que entendemos por el tiempo y el espacio.

Al mismo tiempo

Con precisión certera, en su discusión con Besso, Einstein identificó el núcleo de la confusión, el elemento latente tras la concepción antigua del espacio y el tiempo: la noción de simultaneidad; esto es, qué sentido tiene decir que dos sucesos ocurren al mismo tiempo. Hasta entonces, esto se tenía por algo tan primitivo, tan obvio, que a nadie se le había ocurrido siquiera mencionarlo. Einstein fue el primero en sacarlo a la luz y ponerlo en cuestión. No es que debamos dudar acerca de si dos sucesos que ocurren en un mismo lugar son simultáneos o no —si me topo con alguien en una esquina, todos estaremos de acuerdo en que hemos coincidido en ese punto y ese instante—, pero la simultaneidad de lo que ocurre en sitios distintos es mucho menos obvia.

De hecho, la idea puede fácilmente ser engañosa. Si saco una foto de una persona en una noche de luna y con un fondo estrellado, sabemos que en realidad la foto no capta a esa persona, la luna y las estrellas, tales y como son en un mismo instante de tiempo. Las imágenes de la luna y de las estrellas corresponden a su aspecto segundos y años antes de la toma: el tiempo que

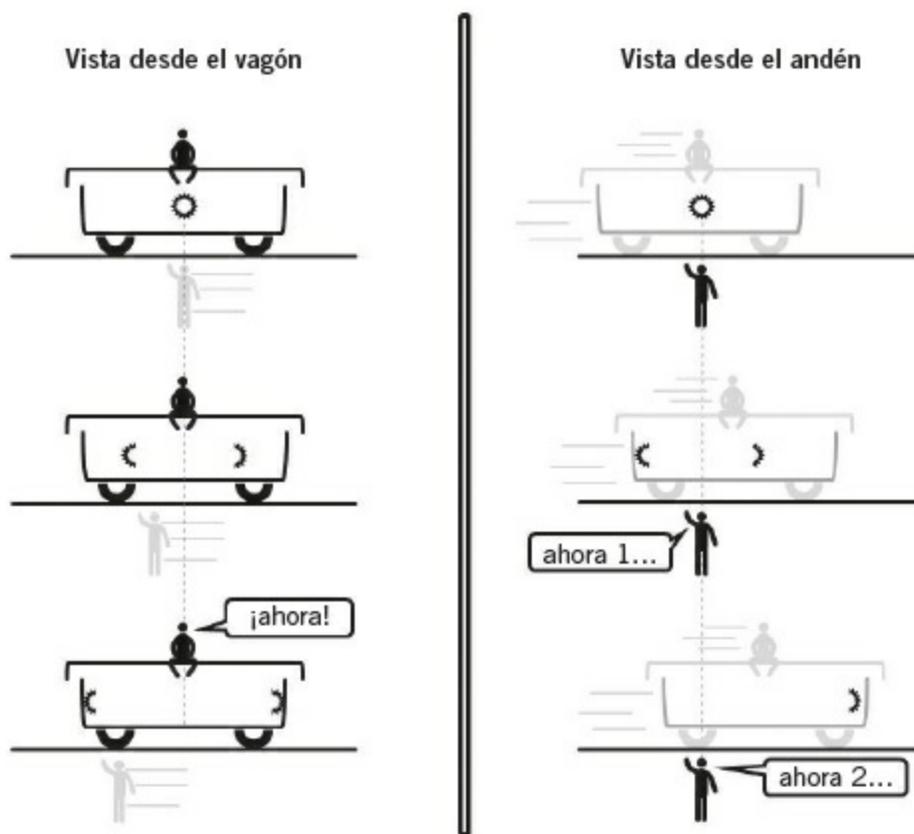
tarda su luz en llegar. Lo que sí es simultáneo es la llegada de los rayos de luz de las estrellas, de la luna y de la persona al objetivo de la cámara. La foto no nos da una descripción del universo en un instante determinado. Entonces, ¿cómo saber si dos acontecimientos en lugares diferentes son simultáneos?

Luz absoluta, tiempo relativo

Einstein supo reconocer que la constancia de la velocidad de la luz, determinada experimentalmente, implica que esa pregunta no tiene una respuesta bien definida. La simultaneidad no tiene un sentido absoluto. Depende del estado de movimiento: dos personas que se muevan una respecto a otra no estarán de acuerdo en si dos acontecimientos en sitios distintos han ocurrido al mismo tiempo.

Einstein lo analizó con su técnica favorita del experimento mental. Imaginemos que en la mitad del vagón de un tren tenemos una lámpara tipo *flash* que emite un fogonazo, y esta luz va hacia los extremos del vagón. Para los que viajamos en el vagón, el destello llega a la parte delantera al mismo tiempo que a la trasera: las dos llegadas son simultáneas. Pero el análisis de Einstein nos lleva a un resultado inesperado: cuando este mismo experimento lo describen unos amigos en tierra, al borde de las vías, ellos dicen que los destellos llegan a esos mismos puntos en instantes diferentes. No estamos de acuerdo en si los momentos de llegada son simultáneos o no.

Por sorprendente que parezca esta conclusión, el razonamiento que conduce a ella es elemental, pero fantásticamente sutil. Esta maniobra de asalto a nuestro sentido común la encontraremos explicada a continuación.



Quienes viajamos en el tren vemos que los destellos de luz llegan simultáneamente a ambos extremos del vagón. Sin embargo, para quienes ven pasar el tren desde el andén, el rayo de luz que viaja hacia la cola llega antes que el que va hacia la cabeza del vagón.

La norma fundamental que Einstein nos pide que recordemos en todo momento es que la luz viaja siempre a la misma velocidad, hagamos lo que hagamos.² Esto es distinto a lo que dijimos cuando arrojábamos una pelota. Si se trata de la luz, a pesar de que la lámpara se mueva, no debemos sumar ni restar la velocidad del tren a la de sus destellos. La velocidad de la luz es siempre la misma, por más que esta viaje en tren o en avión.

Para los que vamos en el tren la situación es sencilla. Vemos que los destellos salen en direcciones opuestas y recorren la misma distancia hasta los extremos del vagón. Como ambos destellos viajan a idéntica velocidad (sí, la de la luz), diremos que llegan simultáneamente a la cabeza y la cola del vagón. Existe un «¡ahora!» bien definido, que es el mismo para ambas llegadas.

Veamos qué dicen nuestros amigos en tierra. Ellos ven que, mientras los destellos de luz viajan, el tren se desplaza hacia adelante. La cola del vagón va al encuentro de la luz, y recibe el destello *antes* de que lo haga la cabeza del vagón. Notemos lo importante que es que nuestros amigos no sumen la velocidad del tren a la de la luz.

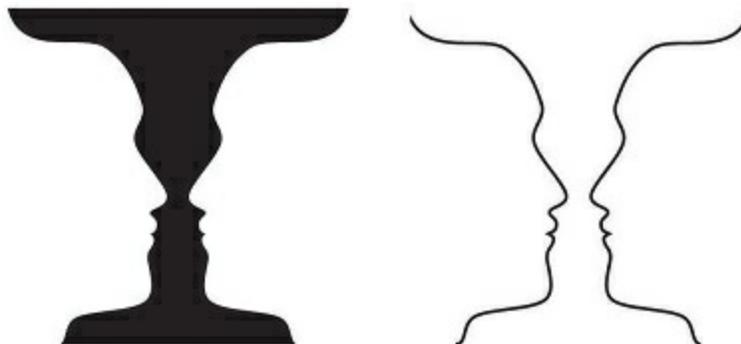
Los destellos viajan todos a idéntica velocidad, pero, vistos desde tierra, han de recorrer distancias diferentes. Por tanto, para nuestros amigos hay un «ahora» para la primera llegada, y otro «ahora» distinto, un poco más tarde, para la segunda. La diferencia es muy, muy pequeña, ya que la luz es mucho más veloz que el tren y por tanto este apenas se desplaza durante el experimento. Pero si el tren viajase a la mitad de la velocidad de la luz, el efecto sería mucho mayor.

La conclusión es tan clara como chocante: si aceptamos algo aparentemente tan inocuo (y verificado en experimentos) como que la velocidad de la luz no cambia al movernos, debemos admitir que lo que sí que cambia es el significado de «ahora».

Relatividad, sin ilusiones

Nosotros decimos que ambos destellos llegan a la vez a los extremos del vagón. Nuestros amigos declaran igual de firmemente que no es así. Seguramente una de las dos versiones no es más que una ilusión, mientras que la otra es la verdadera, ¿no? Pero entonces ¿quién tiene *realmente* razón?

Einstein entendió que, pese a lo razonable que esta pregunta nos pueda parecer, no tiene posible respuesta y por tanto carece de sentido dentro de su nuevo marco de ideas. Nuestra versión de los hechos desde el vagón es tan válida como la de nuestros amigos en tierra. No hay contradicción, sino descripciones distintas de los mismos sucesos. Es similar a esas siluetas en las que podemos ver alternativamente una copa, o los perfiles de dos caras. Ninguna de estas interpretaciones es más correcta que la otra, y aun así ambas coinciden en algo: la línea común que las relaciona. De manera análoga, la velocidad de la luz es idéntica para todos, pero la simultaneidad de los sucesos es distinta para cada observador.



Una misma figura tiene más de una interpretación, y todas ellas son igualmente válidas. La línea que las relaciona es común e idéntica en ambos casos.

Velocidades que no suman

Finalmente, Einstein logró resolver su paradoja de la persecución de la luz. Si vemos que esta marcha siempre a la misma velocidad, independientemente de cómo nos movamos o de cuánto aceleremos, entonces nunca podremos alcanzar un rayo y verlo quieto. A diferencia de otras velocidades, como las de una pelota o un tren, que son relativas al movimiento de quien las mide, la velocidad de la luz es absoluta y por tanto es inútil tratar de acercarse progresivamente a ella.

Ahora dejemos por un momento los trenes e imaginemos otro método para acelerar a gran velocidad. Tomamos un aro circular de alambre con una cuenta de collar insertada en él. El alambre es extremadamente liso y la fricción con la cuenta es tan pequeña que al girar por el aro apenas pierde velocidad. Aceleramos la cuenta dándole un empujón cada vez que pasa por delante de nosotros, siempre con la misma fuerza. Inicialmente, cada empujón aumenta la velocidad de la cuenta en la misma cantidad,

1 km/s ... 2 km/s ... 3 km/s ...

Sin embargo, cuando nos vamos acercando a la velocidad de la luz encontramos que cada empujón parece ser menos efectivo,

... 293.000,01 km/s ... 293.000,02 km/s ... 293.000,03 km/s ...

y menos,

... 298.500,001 km/s ... 298.500,002 km/s ... 298.500,003 km/s ...

Tratamos de compensar este efecto aumentando la fuerza de los empujones, pero únicamente logramos incrementar una pizca más la velocidad. Harían falta una fuerza y una energía infinitas para llegar a la de la luz. Es decir, nunca lo conseguiremos.

Este fenómeno se verifica a diario en los aceleradores de partículas como los del CERN, en Ginebra. En el LHC (el Gran Colisionador de Hadrones) se aceleran protones que viajan dentro de un tubo en forma de anillo de varios kilómetros de diámetro. En este tubo vivo para partículas elementales, los empujones los dan campos electromagnéticos cuando los protones pasan por ciertos puntos del anillo. Con ello llegan a alcanzar velocidades tan solo 3 metros por segundo menores que la de la luz, pero nunca iguales o superiores a ella.

Relojes lentos

La lección más importante de la teoría de la relatividad es la imposibilidad de establecer un «ahora» universal. A partir de aquí, las consecuencias caen una tras otra con el peso de la lógica. Si dos personas que se mueven una respecto a otra no coinciden en lo que es «ahora», tampoco estarán de acuerdo en el tiempo que pasa entre dos sucesos, es decir, en el ritmo al que marchan sus relojes. Aunque nosotros y nuestros amigos del andén llevemos relojes idénticos, veremos que el suyo marcha más lentamente que el nuestro: los relojes en movimiento se ralentizan (el argumento no es complicado y lo podemos encontrar en el suplemento A). Por ejemplo, supongamos que nuestro tren no es de alta sino de altísima velocidad: la mitad de la de la luz. En este caso, por cada minuto que marque nuestro reloj nos parecerá que el de nuestros amigos ha avanzado solo 52 segundos.

Lo que más choca con nuestro sentido común es que el principio de relatividad nos dice que, por su parte, ellos han de observar lo mismo que nosotros. Es decir, desde su punto de vista somos nosotros los que nos movemos y por tanto es nuestro reloj el que atrasa, exactamente en la misma proporción.

¿Cómo puede ser esto? Si bajamos del tren y comparamos el tiempo que ha pasado en los dos relojes, solo uno de ellos puede estar atrasado, ¿no?

Analicémoslo con cuidado. La relatividad nos dice que no advertimos el movimiento en sí mismo, pero lo que sí podemos detectar son sus cambios, tanto en su velocidad como en su dirección. ¿Verdad que notamos las frenadas y aceleraciones, los giros y las curvas en el coche y el tren, y las turbulencias en el avión? ¡Incluso nos llegan a

marear! Esto es importante, ya que para bajar del tren y volver con nuestros amigos debemos frenar. Luego aquí no hay relatividad del movimiento: nuestras observaciones no serán equivalentes a las de nuestros amigos, que se han quedado en la cafetería de la estación y no se han tambaleado como nosotros con el frenazo del tren.

Como veremos, un reloj que cambia su movimiento (tanto si acelera como si frena) se retrasa respecto a otro que no lo hace. Así, aunque sincronizamos los relojes antes de montar en el tren, dado que aceleramos al comenzar el viaje y frenamos al finalizarlo, cuando volvamos a la estación con nuestros amigos nuestro reloj estará retrasado. Es decir, habrá hecho menos tic-tacs que el suyo. Y al igual que el reloj, también nosotros habremos envejecido menos que nuestros amigos, aunque solo sea muy ligeramente.

La clave del enigma es que ellos no han experimentado nuestros cambios de movimiento, y por tanto su percepción del paso del tiempo también es diferente de la nuestra.

Reglas cortas

Ahora que hemos dado la puntilla a la idea de un tiempo absoluto, le llega su turno al espacio. No hay más remedio si queremos que la velocidad de la luz sea la misma para todos. Determinar una velocidad requiere hacer medidas de espacio y de tiempo, y si discrepamos sobre las mediciones del tiempo, tampoco podremos estar de acuerdo en las de las distancias. Esto fuerza a que la ralentización de los relojes vaya acompañada de una contracción de las longitudes a lo largo de la dirección del movimiento.

Tenemos los detalles del argumento en el suplemento B, pero nos basta un ejemplo para ilustrar lo que sucede. Si extendemos nuestro brazo de, digamos, 70 centímetros, hacia delante en el tren, nuestros amigos en tierra lo verán más corto. Si viajamos a 150.000 kilómetros por segundo, a ellos les parecerá que nuestro brazo se extiende tan solo 60 centímetros. De hecho, les pareceremos más delgados en esa misma proporción. Pero no nos lancemos a presumir de esbeltez frente a ellos. La relatividad, implacablemente democrática, nos dice que también nosotros veremos sus brazos y barrigas encogidos en la dirección del movimiento, con idéntica reducción aparente de la talla.

Gratitud

Quizá nos quede la impresión de que en estas historias de Einstein sobre el tiempo y el espacio todo lleva a diferencias entre amigos. No es así: al final de su histórico artículo, Einstein no olvidó incluir una nota de sincero agradecimiento a su querido Besso. Merece que lo recordemos como un actor secundario pero imprescindible en la historia de la relatividad.

Espaciotiempo

En adelante el espacio por sí mismo, y el tiempo por sí mismo, están destinados a desvanecerse en meras sombras, y solo una cierta unión de ambos mantendrá una realidad independiente.¹

HERMANN MINKOWSKI

Espacio y tiempo juegan al ajedrez.

ANTONIO VEGA, *Una décima de segundo*

Hemos visto que para que la velocidad de la luz no cambie, sea cual sea el movimiento de quien la mida, espacio y tiempo han de variar conjuntamente. El esquema tradicional de un tiempo y un espacio tridimensional (con su altura, anchura y profundidad) inalterables ya no es adecuado. En adelante nos referiremos a una amalgama de ambos: el *espaciotiempo*, de cuatro dimensiones, donde lo que se mantiene invariable es la velocidad de la luz. Un punto en el espaciotiempo es un lugar preciso en un instante concreto. Podemos referirnos a ese punto como *un suceso*, y así el espaciotiempo es el conjunto de todos los sucesos, pasados y futuros, en cualquier sitio. Lo que Einstein nos ha enseñado es que en el espaciotiempo no todos estaremos de acuerdo en cuál es la dirección del tiempo y cuáles son las del espacio. Depende de a qué velocidad nos movamos.

Esto no parece fácil de digerir, pero podemos hacernos una buena idea mediante un símil. Contemplamos el plano de una ciudad sobre una mesa. ¿Qué direcciones son izquierda y derecha, o arriba y abajo? La pregunta es claramente ambigua: si nos desplazamos en torno a la mesa, cambian nuestras referencias y orientaciones. Son relativas al observador, no absolutas. En el

espaciotiempo de cuatro dimensiones, a qué llamemos espacio y a qué tiempo dependerá no de nuestra orientación sino, extrañamente, de la velocidad a la que nos movamos.

Por ejemplo, dos puntos que en el plano de la ciudad yo veo situados horizontalmente (izquierda-derecha), para quien esté en otra parte de la mesa estarán separados tanto en dirección horizontal como vertical (adelante-atrás). De manera análoga, dos sucesos que para nosotros ocurren al mismo tiempo pero están separados en el espacio (como las llegadas simultáneas de los rayos de luz a los extremos del vagón), para nuestros amigos en el andén están separados no solo en el espacio sino también en el tiempo (es decir, no son simultáneos). Si nos movemos, nuestras direcciones de espacio y de tiempo ya no son exactamente las mismas.²

Viajeros en el tiempo

Pero todavía no estamos cómodos con esta idea del espaciotiempo. ¿Acaso tiempo y espacio no son claramente diferentes? ¿Cómo podemos hablar de intercambiarlos, aunque sea parcialmente? El tiempo es algo que cronometramos en segundos, mientras que las distancias las medimos en metros. Peras con peras, manzanas con manzanas.

Sin embargo, es muy habitual que midamos las distancias como si fuesen tiempos. Lo hacemos sin pensarlo cuando decimos que vivimos a diez minutos del centro de la ciudad. Pero ¿son minutos a pie o minutos en coche? La velocidad de la luz —siempre idéntica a sí misma— nos permite eliminar esta ambigüedad. Gracias a ella disponemos de un estándar universal con el que decir inequívocamente que la estrella Sirio está a nueve años luz,³ que la distancia entre el Sol y la Tierra es de ocho minutos luz, o que el centro de la ciudad está a una cienmilésima de segundo luz.

Es entonces natural que usemos la luz para medir las distancias y los tiempos en las mismas unidades. El motivo es el mismo por el que en el plano de la ciudad no damos las longitudes de unas calles en metros y las de otras en yardas, según estén orientadas horizontal o verticalmente, sino que fijamos las

mismas unidades para todas. Asimismo, si en el espaciotiempo medimos el tiempo en segundos, entonces es adecuado medir las distancias en segundos luz.

También es posible, aunque menos habitual, unificar las medidas en términos no de tiempos sino de distancias. Es decir, si usamos metros o kilómetros para las longitudes, también podemos medir el tiempo en metros luz o kilómetros luz. No es tan raro como pueda parecer: estas medidas no son más que la distancia que un rayo de luz recorrería en un tiempo dado. Por ejemplo, cada vez que transcurren 3,3 millonésimas de segundo podemos igualmente decir que ha pasado un tiempo de un kilómetro luz. ¿Cuánto tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra? Un tiempo de 150 millones de kilómetros luz. ¿Cuánto tiempo pasa entre las doce del mediodía y la una de la tarde? Algo más de mil millones de kilómetros luz.

De esta manera, los relojes no marcan el tiempo en segundos sino en kilómetros: recorreremos distancias en el tiempo. Comenzamos a cronometrar: 0 kilómetros – tic-tac: 300.000 kilómetros – tic-tac: 600.000 kilómetros... Así convertimos nuestros relojes en cuentakilómetros de tiempo. Resulta poco práctico, ya que nuestras velocidades cotidianas son mucho menores que la de la luz, pero nos puede servir para ilustrar más claramente la manera en que nos desplazamos por el espaciotiempo. Por ejemplo, aunque podemos fácilmente quedarnos quietos donde estamos, nos es imposible dejar de avanzar en el tiempo: los relojes en nuestras muñecas hacen tic-tac incesantemente, y todos envejecemos, queramos o no. Mi edad ahora —la longitud de mi trayectoria en el tiempo desde que nací— es de unos 470 billones de kilómetros. Lo que he podido desplazarme por todo el planeta desde entonces no es nada en comparación.

Somos, ante todo, viajeros en el tiempo.

Más que luz

Cuando nos enfrentamos por vez primera a la teoría de la relatividad da la impresión de que no paramos de hablar acerca de cómo se comporta la luz. En ella cargamos todo el peso de los argumentos sobre medidas de tiempos y

distancias. Pero ¿es esto necesario? ¿A qué viene tanto interés por la luz?

En realidad, el hecho de usar luz en los razonamientos no es en sí tan importante. Lo que de verdad cuenta es que existe una cierta velocidad que es invariable en el espaciotiempo, absoluta, la máxima con la que enviar señales que sirvan para sincronizar relojes. Y por lo que sabemos —por teorías verificadas en experimentos altamente precisos—, la luz se propaga a esa velocidad.

Veremos que, además de la luz, también las ondas de radio y las gravitatorias viajan a esa misma velocidad. ¿Casualidad? No: simplemente todas ellas viajan tan rápido como es posible en el espaciotiempo. Luego esa velocidad universal es mucho más que una peculiaridad de la luz: es una propiedad intrínseca del espaciotiempo. La luz simplemente nos ha ayudado a identificarla.

Por ello, ya plenamente conscientes de nuestra ciudadanía del espaciotiempo, en adelante podemos sin reparos medir las distancias en segundos, o el tiempo en metros, omitiendo el añadido «luz».

¡Sorpréndeme otra vez!

¿No es *demasiado* extraño todo esto? La búsqueda que emprendió Einstein para hacer compatibles las ideas de Galileo y Maxwell probablemente nos parecía inofensiva, pero ahora vemos que nos obliga a pagar un precio inesperado: nuestras intuiciones sobre el tiempo y las distancias ya no son de fiar.

El problema es que el universo se parece poco a nuestra experiencia ordinaria. Esto no debería contrariarnos demasiado: nuestras mentes son el resultado de la evolución en entornos donde todo se mueve a velocidades nunca mayores que unas decenas o centenas de metros por segundo y si es más rápido, nos parece que se desplaza instantáneamente. La evolución no podía prever que el cerebro de un descendiente de los simios de la sabana, no tan lejano de ellos en el espacio ni en el tiempo, intentase concebir cómo estos dos conceptos se alteran para fusionarse en uno.

Probablemente sea esta capacidad que tiene el universo de sorprendernos continuamente lo que más nos fascina de la ciencia. Como niños que ven a un mago sacar un truco tras otro, nos encanta ver cómo la naturaleza desafía una y otra vez nuestro instinto y nuestras expectativas.

Años extraordinarios

Cuanto mayor es el éxito, más cerca está del fracaso.

ROBERT BRESSON, *Notas sobre el cinematógrafo*

A diferencia de nosotros, los contemporáneos de Einstein en 1905 —físicos incluidos— no ponían automáticamente un rostro a ese nombre, ni mucho menos lo identificaban con la idea de genio. Fuera de su pequeño círculo de amigos, Albert Einstein era tan anónimo como cualquiera de ellos. Sin embargo, esto no impidió que el impacto de su teoría de la relatividad fuera tan rápido como sensacional.

Persuadidos por la simplicidad y la elegancia de la solución de Einstein, un grupo relevante y rápidamente creciente de los físicos que se ocupaban de cuestiones fundamentales aceptó la nueva teoría junto con sus radicales consecuencias. La lista es impresionante: en primer lugar, Max Planck, el más destacado físico teórico alemán en esos días. Serio, sobrio y escrupuloso, pero también resuelto y decidido, fue él quien hizo que el insólito artículo de ese joven desconocido se publicase rápidamente en la principal revista de física de la época. Además, escribió el primer trabajo que extendía esos resultados, y desde entonces fue el más firme valedor de Einstein y su teoría. En los meses posteriores también reaccionaron favorablemente otras figuras de peso, como Wilhelm Röntgen, ya entonces legendario como descubridor de los rayos X; Johannes Stark y Philipp Lenard, líderes de la física experimental alemana (y todavía no devenidos en nazis antisemitas); jóvenes promesas como Max Born y Max von Laue, que se harían entusiastas seguidores de Einstein y llegarían a ganar, al igual que todos los arriba mencionados, el premio Nobel; y muchos otros, entre los que merece mención Hermann

Minkowski, destacado matemático y antiguo profesor de Einstein, de quien «nunca habría pensado que fuese capaz de ese trabajo». Sería él quien expresase diáfananamente la fusión de espacio y tiempo en espaciotiempo.

No necesitamos más para desmentir la leyenda acerca del rechazo del «sistema» a las ideas de Einstein. Pero sí que es cierto que la entrada de Einstein en la comunidad científica fue poco convencional y bien pudo haberse truncado prematuramente.

Crisis

Retrocedamos a la época de sus estudios universitarios en la Escuela Politécnica de Zúrich, en la que ingresó a los diecisiete años, uno antes de la edad oficial. Quizás ya comenzaba a ser consciente de su singular talento. Siempre independiente, prefería estudiar por su cuenta y pasar tiempo en el laboratorio en lugar de asistir a las clases de sus profesores. Uno de ellos, Heinrich Weber, el jefe del Departamento de Física, había despertado inicialmente la admiración de Einstein. Sin embargo, con los meses se fue revelando como un profesor de vieja escuela. No solo requería la sumisión de sus alumnos: el temario que enseñaba era obsoleto y evitaba las nuevas ideas sobre el electromagnetismo que tanto fascinaban a Einstein. Mientras tanto, este discípulo irreverente, que se dirigía a él como «Señor Weber» en lugar de «Señor Profesor», se adentraba con ansia y por su cuenta en la física de vanguardia. El choque era inevitable. La relación entre ambos degeneró rápidamente en un antagonismo abierto.

En su ingenuidad de juventud, Einstein no había previsto las consecuencias del enfrentamiento. Tras graduarse en 1900 (como el cuarto de los cinco estudiantes en su curso) intentó conseguir un puesto de profesor ayudante para comenzar una carrera académica, pero pronto se estrelló contra la oposición de Weber. Al igual que muchos jóvenes científicos antes y después de él, comenzó a alternar sus primeros intentos de hacer investigación original con la tarea de profesor particular para sacar algún dinero, y también con los escauceos amorosos con su compañera de estudios, la serbia Mileva Marić, con la que se prometió en esos días.¹ Pero la situación se prolongó

durante dos difíciles años sin que las perspectivas mejorasen. Einstein comenzaba a desesperar de su futuro profesional cuando lo salvó la intervención de otro compañero de clase, Marcel Grossmann, quien le consiguió un trabajo, no en la universidad, sino como experto técnico (de tercera clase) en la Oficina Suiza de Patentes en Berna. No sería, como veremos, la última vez que Grossmann jugase un papel providencial en la vida de su amigo, pero esta fue la que Einstein consideraba más vital. Sin ella, diría décadas más tarde, «habría sufrido una muerte intelectual».

Annus mirabilis

El trabajo de inspector de patentes no le desagradaba. Su sueldo duplicaba el de un profesor ayudante en la universidad —poco ha cambiado esto desde entonces— y su tarea era variada, con una vertiente técnica que a menudo le atraía. Además, varios de sus compañeros en la oficina (entre ellos el inestimable Michele Besso) compartían su interés por la ciencia moderna. Incluso a veces encontraba algún tiempo para sus investigaciones: el segundo cajón de su pupitre de trabajo era «el departamento de física teórica».

Las noches y los fines de semana los dedicaba a desarrollar sus ideas, que después contrastaba y maduraba en largas conversaciones con sus amigos. Solo estos sabían de la profundidad de sus exploraciones, pero nadie —quizás ni él mismo— podía presentir la magnitud del maremoto que se avecinaba. En 1905, con tan solo veintiséis años, Einstein irrumpió en la escena de la ciencia con una espectacularidad solo comparable a la de aquel *annus mirabilis* de 1666, en el que Isaac Newton (a sus veinticuatro años) inventó el cálculo infinitesimal, desarrolló su teoría y experimentos sobre la naturaleza de la luz y los colores, y puso las bases de la teoría de la gravitación universal.

En su propio año extraordinario —en realidad seis meses—, Einstein publicó, además de su trascendental trabajo sobre la relatividad, otros tres artículos revolucionarios: sobre la teoría cuántica de la radiación, sobre el origen atómico del efecto browniano, y sobre la equivalencia entre masa y energía —la archifamosa ecuación $E = mc^2$ —. Cada uno de ellos podría haberle proporcionado un premio Nobel, si bien cuando finalmente recibió el

galardón en 1921 solo se hizo mención del primero: aquel en que utilizaba la naciente física cuántica para explicar el efecto fotoeléctrico (descubierto accidentalmente por Heinrich Hertz durante sus experimentos para verificar la teoría electromagnética de la luz de Maxwell).

En esos meses prodigiosos también halló tiempo para completar su tesis doctoral, que versaba sobre un nuevo método para determinar el tamaño de las moléculas. Su título de doctor le consiguió el primer reconocimiento a su valía: el ascenso a experto técnico de *segunda* clase.

El progreso del peregrino

Como hemos visto, esta avalancha de nuevas ideas no provocó un virulento rechazo generalizado; ni siquiera cayó en la oscuridad ignorada de los intentos de aficionado. Por el contrario, su difusión precipitó en pocos meses el paso de Einstein del anonimato a la relación de igual a igual con los grandes de la física de la época. Aun así, la nueva teoría fue asimilada de manera gradual y sin unanimidad; alterar las nociones más básicas que uno tiene sobre la estructura de la naturaleza es una experiencia difícil, intelectual y emocionalmente. Incluso sus predecesores más inmediatos en el desarrollo de la relatividad, Hendrik Lorentz y Henri Poincaré, fueron reacios a dar el salto final de abandonar la simultaneidad absoluta. Jamás aceptaron plenamente el análisis y las conclusiones de Einstein.

Pero en general, la reacción visceral antagónica solo fue más extendida entre quienes menos contaban, quizás no socialmente (recordemos el antisemitismo prevalente en esos días) pero sí científicamente: físicos de segunda o tercera fila, o sin credenciales como teóricos, científicos para los que su tiempo ya había pasado, y aficionados sin número, todos ellos arguyendo desesperadamente que la ciencia no podía basarse en «artificios ingeniosos pero meramente matemáticos», sino que debía conformarse al «sentido común» (todavía hoy abundan los negacionistas de la teoría: busque en internet, por ejemplo, «relatividad falsa»). Sea como sea, en muy poco tiempo los físicos más activos y relevantes comenzaron a considerar que estas ideas eran lo suficientemente interesantes como para incorporarlas en sus

propias investigaciones, tanto teóricas como experimentales. No hay mejor tributo ni más claro reconocimiento para un científico que el trabajo y el esfuerzo que otros dedican a sus ideas.

A la vista de este éxito, quizás nos sorprenda que Einstein no fuese rápidamente contratado por alguna de las mejores universidades de la época, sino que continuase en la oficina de patentes durante varios años. Las razones son fáciles de entender incluso hoy en día. Por una parte, la rigidez del sistema universitario europeo creaba escasos puestos en condiciones para alguien sin más méritos que su brillante investigación, y que debía competir contra candidatos de poca monta pero protegidos por profesores locales. Por otra parte, ahora casado y con un hijo pequeño, Einstein no podía renunciar a su sueldo de inspector de patentes (recientemente ascendido) por el de un profesor universitario primerizo. Aun así, él ansiaba dedicarse a la ciencia y en 1908 comenzó a simultanear su trabajo en la oficina de patentes con el de *Privatdozent* (profesor sin sueldo) en la Universidad de Berna.

Pero lo que a nosotros nos parece evidente también lo veían otros: era un escándalo que alguien del talento de Einstein siguiese bregando en la oficina de patentes. En 1909, después de superar obstáculos diversos —entre ellos, obtener referencias que asegurasen que, a pesar de ser judío, no mostraba «ninguna de las desagradables características de su raza»— la Universidad de Zúrich le ofreció un puesto de profesor ayudante. Einstein finalmente dejó Berna y la oficina de patentes. A sus treinta años, tras su comienzo como un patito feo apartado de la comunidad académica, por fin se incorporaba como miembro de pleno derecho a las filas de la física. A partir de ahora emprendía el acostumbrado peregrinaje del científico hacia unas mejores condiciones de trabajo.

$$E = mc^2$$

Pero no nos anticipemos demasiado. Regresemos a la oficina de patentes, donde el contraste es casi cómico entre la calma burocrática del ambiente y el frenesí creativo que insospechadamente bulle en la cabeza de Einstein. Uno de

sus resultados más trascendentales es una secuela de su trabajo inicial sobre la relatividad.

De nuevo emplea un sencillo experimento mental en el que un objeto emite luz en pulsos energéticos; podemos pensar en un átomo radiactivo emitiendo rayos gamma. Una vez más, Einstein analiza el fenómeno desde dos puntos de vista: uno en reposo y otro en movimiento respecto al objeto, respetando sus nuevas reglas sobre el comportamiento de la luz y la radiación. De su análisis extrae, en sus propias palabras, «una conclusión muy interesante»: al emitir energía, la masa del objeto disminuye.

¿Qué quiere decir esto? En la escuela nos enseñaron que la masa de un cuerpo es su cantidad de materia. Pero de una manera más importante, la masa es lo que hace que nos cueste cambiar el movimiento de un objeto: acelerarlo si estaba en reposo, o frenarlo o desviarlo si se estaba moviendo en línea recta. Esto es lo que denominamos la inercia del cuerpo, y es la propiedad más esencial de todo aquello que tenga una masa. Por tanto, la conclusión de Einstein es que, después de emitir los rayos gamma, la masa del objeto será más pequeña y resultará más fácil moverlo: hará falta una menor fuerza para vencer su inercia.

Con su aplomo característico, Einstein añade que no importa en qué forma se emita la energía: puede ser radiación, pero también calor u ondas de sonido. Si llevan la misma energía, todas resultarán en la misma disminución de masa. Es decir, si tenemos un vaso de agua caliente, deberá resultarnos ligeramente más fácil empujarlo si antes dejamos que se enfríe.

¿Y cómo se relacionan la energía emitida y la masa perdida? No me hace falta decirlo: si hay una ecuación que todos conocemos es la que conecta E y m mediante la inevitable constante universal c , la velocidad de la luz. Dado que esta es una velocidad altísima, se requiere una enorme emisión de energía para que el cambio de masa sea apreciable. De hecho, es prácticamente indetectable en situaciones ordinarias: la masa del vaso de agua fría es tan solo 0,000 000 000 5 gramos menor que cuando el agua está caliente. Por eso no notamos la diferencia.

Pero lo que hace famosa esta ecuación es la interpretación inversa: una pequeña disminución de masa puede resultar en una descomunal liberación de energía.

Einstein sabía que en el fenómeno de la radiactividad, descubierto pocos años antes, se creaban grandes flujos de energía. Por ello sugirió en su artículo que ese podría ser un buen medio en el que verificar su nueva ecuación: la masa de un cuerpo radiactivo debería disminuir ligeramente con el tiempo. Su contribución científica a la energía nuclear y a la bomba atómica no va más allá de aquí. Su aportación más relevante fue política: en 1939 y 1940 escribió al presidente Roosevelt advirtiéndole del peligro de que los nazis se adelantaran en la construcción de la bomba. El Proyecto Manhattan, que llevaría a la devastación de Hiroshima y Nagasaki, no comenzó hasta más de un año después.

Ahora sabemos que reacciones como la fusión de dos núcleos atómicos —que forman un núcleo nuevo, de masa ligeramente inferior a la suma de las dos masas iniciales— proporcionan su energía no solo a las bombas termonucleares sino también a los corazones de las estrellas. Nuestro Sol habrá ardidido durante diez mil millones de años hasta que finalmente se apague. Toda esa energía habrá provenido de la conversión en luz y radiación de poco más de una milésima parte de su masa.

Cuestiones de gravedad

En 1905, Einstein estaba muy lejos de anticipar estas consecuencias. Aún más inconcebible sería la espectacular demostración que su ecuación tendría más de un siglo después, en la detección de una fusión muchísimo más violenta que la de dos núcleos atómicos: la de dos agujeros negros treinta veces más masivos que el Sol. Pero el camino que finalmente llevaría a la predicción y observación de este fenómeno lo comenzó a abrir Einstein cuando todavía estaba en la oficina de patentes de Berna.

Varias cuestiones se agitaban en su cabeza. La masa, además de dar una medida de la inercia de un cuerpo, también la percibimos como peso, esto es, como la fuerza de la gravedad sobre ese cuerpo. Todo lo que tiene masa también pesa. Pero entonces, si la energía es equivalente a una masa, ¿no debería también pesar? Sin embargo, en la ley de la gravedad de Newton, la

energía, tal como el calor, no entra en ningún sitio, no pesa. Es decir, Newton nos diría que el vaso de agua caliente debería marcar en la balanza exactamente el mismo peso que si lo dejamos que se enfríe.

Para Einstein, esto suponía una violación antinatural de la unidad de la física. La masa y la energía debían ser equivalentes en todas sus manifestaciones, luego el calor del agua habría de aumentar su peso, aunque solo fuera en una cantidad minúscula. De hecho, esto debería aplicarse a cualquier forma de energía; por ejemplo, una canica que gira (y por tanto, tiene energía de movimiento) debería pesar ligeramente más que una quieta. Pero Newton no estaría de acuerdo.

Había otro problema todavía más preocupante. Según la ley de Newton, la gravedad actúa instantáneamente: si el Sol cambiase repentinamente su posición, notaríamos inmediatamente que tira de nosotros en otra dirección. Es decir, mediante la gravedad, sabríamos al instante —literalmente— que el Sol se ha desplazado, antes incluso de que nos llegue su luz y lo veamos moverse. A decir verdad, esta instantaneidad tan absoluta ya incomodaba a Newton y sus contemporáneos. Pero la llegada de la teoría de la relatividad la convertía en algo más que una molestia: contradecía claramente la nueva ley de Einstein. Nada, ninguna señal, puede superar la velocidad máxima de la luz. Tampoco la gravedad debería hacerlo. Por tanto, la ley de Newton no podía ser exactamente válida.

La conclusión de ambas paradojas era la misma: había que extender la teoría de la relatividad y modificar la ley de la gravedad de Newton para hacerlas compatibles. Pero no se atisbaba en absoluto cómo. Faltaba una guía sólida y clara, como anteriormente fue la evidencia de la constancia de la velocidad de la luz, para fusionar ambas teorías. Sin esa guía, la incursión en estos parajes podía fácilmente acabar en una ciénaga lejos de cualquier terreno firme. Pese a ello, Einstein no podía tolerar una inconsistencia flagrante en las leyes de la Naturaleza. No había otra elección que adentrarse de nuevo en tierra desconocida.

«La idea más feliz de mi vida»

Viajando por extraños mares del pensamiento, solitario...

WILLIAM WORDSWORTH, *The Prelude*

Entre 1907 y 1915, Einstein realizó un sobrecogedor salto mental. Comenzó haciendo una observación cotidiana —cuando estamos en caída libre, no notamos nuestro peso— y a partir de ahí llegó, por la fuerza del pensamiento puro, a la insólita conclusión de que el tiempo y el espacio se distorsionan y deforman como si fuesen elásticos. Aún más: plasmó su idea en ecuaciones de belleza pura y concisa, en las que espacio y tiempo se entrelazan con la gravedad y la materia.

Iremos aclarando poco a poco qué quiere decir que el tiempo y el espacio se curven, pero basta con que intentemos figurarnos lo que dice el párrafo anterior —leámoslo de nuevo, por favor— para apreciar que esto es mucho más que un mero descubrimiento científico: es uno de los mayores actos de imaginación creativa de la historia.

Odisea

Durante esos años, Einstein fue prácticamente un explorador solitario. En algunos períodos contó con colaboradores, especialmente su amigo Marcel Grossmann, a quien ya encontramos hace unas páginas. Pero su ayuda fue solo técnica: el desarrollo conceptual siempre estuvo en manos de Einstein. Otros investigadores —Max Abraham en Italia, Gustav Mie en Alemania, Gunnar Nordström en Finlandia— también entendieron la necesidad de una nueva teoría de la gravedad, pero ninguno de ellos se aproximó a la profundidad del

proyecto de Einstein. Aunque muy competentes, no estaban a la altura de los grandes físicos de la época con quienes podría haber discutido de igual a igual. Pese a sus intentos, durante esos años Einstein apenas logró despertar en estos colegas un interés por su trabajo más allá de la mera cortesía. Probablemente pensaban que sus ideas, aunque sugerentes, no eran mucho más que fantasías visionarias, un capricho extravagante. Max Planck, a quien Einstein veneraba, llegó a aconsejarle que no prosiguiese: «En primer lugar, no lo lograrás, y aunque lo hicieses, nadie te creería». Temía que su joven y arriesgado amigo «se perdiese en regiones oscuras y chocase con contradicciones inesperadas». No podemos reprochárselo demasiado. Las ideas y métodos de Einstein eran difíciles de entender, y durante los años de su desarrollo no parecía que fueran a cuajar en algo convincente y claramente valioso. Tan solo en la fase final, pocos meses antes de concluir su hazaña, encontró Einstein un interlocutor de altura activamente interesado en su proyecto... demasiado activamente, como veremos.

La historia de este descubrimiento tiene muchos de los rasgos de las epopeyas clásicas en las que un héroe singular realiza un viaje transformador. Einstein parecía ser consciente de ello cuando años más tarde lo expresó en términos épicos:

Los años de búsqueda en la oscuridad de una verdad que uno siente pero no puede expresar, el intenso deseo y la alternancia entre la confianza y el recelo hasta que se abre el camino a la claridad y el entendimiento, solo los conoce aquel que los ha experimentado.

Búsqueda y deseo, esperanza y desánimo, años en las tinieblas que culminan en una resolución luminosa: nos vamos a adentrar en una de las mayores odiseas intelectuales emprendidas por un hombre.

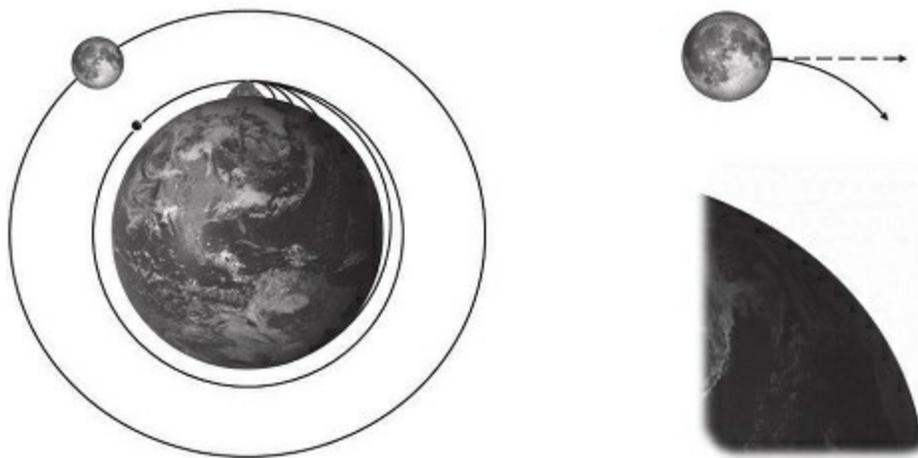
La caída en el tiempo

El viaje comenzó, una vez más, en la modesta tranquilidad de la oficina de patentes, con Einstein cavilando acerca del significado de lo que llamamos *caída libre*, esto es, el movimiento de un cuerpo bajo la sola acción de la

gravedad, despreciando el efecto de cualquier otra fuerza tal como la resistencia del aire.

El incidente es sorprendentemente similar a la anécdota más popular de la ciencia: la historia de Newton y la manzana. Tanto para Einstein como para Newton, la contemplación de un hecho mundano referente a la caída libre de un objeto —para la mayoría de nosotros, una observación curiosa, cuando no algo directamente ignorado— conduce a una nueva manera de concebir la fuerza más enigmática pero más patente en la naturaleza: la gravedad.

Newton, un joven universitario, se encuentra en el huerto de su casa familiar, Woolsthorpe Manor, cuando ve caer una manzana de un árbol. Advierte que la luna está saliendo en el cielo y se pregunta: ¿es posible que la misma fuerza que ha empujado la fruta hacia el suelo sea también la que mantiene la luna girando en torno a la Tierra? Pero, obviamente, la luna no está cayendo hacia la Tierra, ¿no es así?



El experimento mental de Newton que ilustra cómo las manzanas, las balas de cañón y la luna siguen todas ellas trayectorias en caída libre en la gravedad terrestre. Esta fuerza hace que la luna no siga en línea recta, sino que se desvíe constantemente hacia la Tierra y así se mantenga en órbita alrededor de esta.

Ahora Newton nos explica uno de los experimentos mentales más bonitos de la física. Una bala de cañón disparada horizontalmente desde lo alto de una montaña caerá, libremente, una distancia más allá del punto de partida. Tirada con mayor fuerza caerá cada vez más lejos, hasta que llegemos a lanzarla a

tal velocidad que la bala efectúe una vuelta completa a la Tierra y regrese al punto de partida con la misma velocidad con la que salió (recordemos que estamos ignorando la fricción del aire). A partir de ahí, la bala —si nos agachamos para dejarla pasar— seguirá dando vueltas a la Tierra. ¡La hemos puesto en órbita, sin que cese de caer constantemente hacia la Tierra! Concluye Newton: la luna no es diferente. No nos confundamos porque la palabra *caída* sugiera acercarse cada vez más a la Tierra: la luna se mantiene a una distancia fija (aproximadamente) de esta, pero al hacerlo está cayendo continuamente. Es fácil verlo: si la Tierra no estuviese ahí, la luna proseguiría en línea recta. En cambio, la gravedad desvía su trayectoria hacia la Tierra, al igual que lo hace con la bala.

Es decir, la luna y la manzana se diferencian tan solo en que siguen distintas trayectorias de caída libre en la gravedad de la Tierra.

Esta intuición es tan solo un comienzo —Newton la elaborará con una precisión nunca antes vista—, pero ya nos aporta un nuevo marco imaginativo, una inmensa ampliación mental para concebir la fuerza de la gravedad como una interacción de carácter universal.

Gravedad sin peso

Algo más de dos siglos después, en un día de trabajo ordinario de 1907, visitamos a ese otro joven con inusual tendencia a abstraerse profundamente. Ensimismado, mira por la ventana de la oficina. Sus compañeros de trabajo, acostumbrados a verlo así, ni remotamente sospechan que se está adentrando en una nueva manera de entender la realidad.

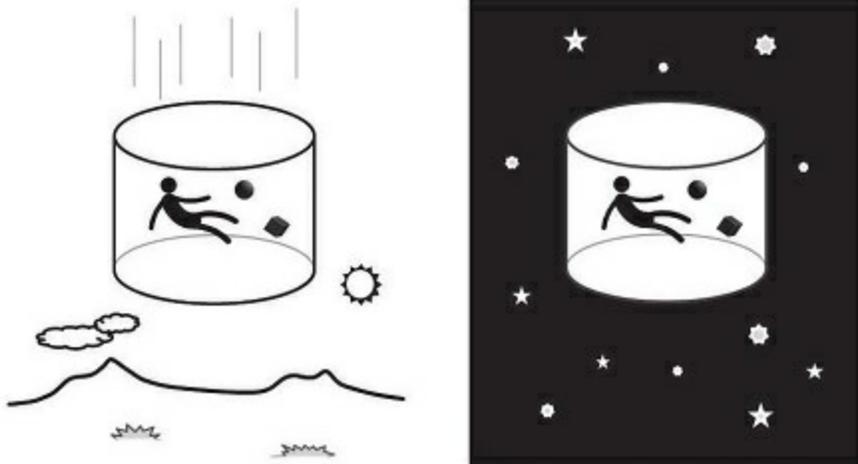
Está imaginando la caída de una persona, quizás un deshollinador, desde el tejado de una casa. Se pregunta cómo se percibirá la experiencia (antes del doloroso final) desde dos puntos de vista distintos: el del deshollinador que cae y el de los que observamos la caída desde el edificio. Es el ya familiar juego einsteiniano de comparar dos perspectivas.

Nosotros diremos que el peso del deshollinador, es decir, la fuerza de la gravedad, le hace caer cada vez más rápidamente hacia la Tierra. Pero el deshollinador nos contará que durante el descenso se siente flotar, ligero,

literalmente *ingrávido*. No nota su peso, es como si no existiese la fuerza de la gravedad sobre su cuerpo mientras ve pasar hacia arriba el edificio a su lado.

A continuación, en lugar de hacerlo caer a plomo, lanzamos al deshollinador desde lo alto del edificio como si fuese un hombre-bala, para ponerlo en órbita en torno a la Tierra. Recordemos ahora lo que nos ha enseñado Newton sobre estos proyectiles en órbita. El sufrido deshollinador, reconvertido en cosmonauta, sigue estando en caída libre y por tanto en situación de ingravidez, esa misma ingravidez que nos es familiar por las imágenes de astronautas flotando en el interior de la Estación Espacial Internacional. Allí arriba, la aparente desaparición del peso de los astronautas no se debe a su distancia a la Tierra —la gravedad a la altitud de la estación es un 90 % de la fuerza en la superficie terrestre—, sino al hecho de que la estación en órbita, y sus astronautas dentro, están en continua caída hacia la Tierra.

Es decir, la caída libre nos resulta *idéntica* a la ausencia de peso.



La experiencia de la caída libre es idéntica a la ausencia de gravedad.

La mayoría de nosotros quizás llegaríamos a razonar hasta esta conclusión, gratamente divertidos, pero no iríamos más allá.¹ Einstein no. Él prosigue. Supongamos que nos hallamos flotando en el interior de un laboratorio cerrado y sin ventanas. Ningún experimento que hagamos podrá distinguir si el motivo por el que flotamos es que el laboratorio está en caída libre hacia la Tierra (bien a plomo o en órbita) o en cambio lo hacemos

porque el laboratorio flota en el espacio, lejos de cualquier planeta o estrella. La caída libre bajo la acción de la gravedad es indistinguible del movimiento libre, en total ausencia de fuerzas.

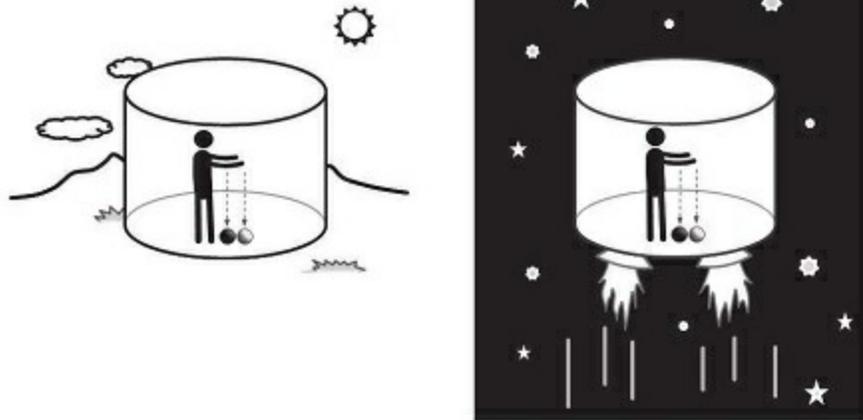
Por tanto, la fuerza de gravedad que sentimos cuando estamos en reposo se puede eliminar si nos dejamos caer libremente. Es decir, la gravedad depende del estado de movimiento del observador.

La gravedad *es relativa*.

Eureka. Pero no nos detengamos todavía.

Peso sin gravedad

Esta nueva relatividad va más allá de la caída libre. No solo es posible eliminar la sensación de peso dejando que la gravedad nos acelere libremente. También podemos, a la inversa, acelerar para simular un peso allí donde no hay gravedad.



Los efectos de la gravedad se pueden simular mediante aceleración.

Nos encontramos dentro del mismo laboratorio aislado de antes, pero ahora no flotamos sino que tenemos sensación de peso. No sabremos distinguir si estamos en la superficie de la Tierra o si, en cambio, el laboratorio está en el espacio lejano, acelerando hacia arriba por unos cohetes que tiene en su base. En ambas situaciones notaremos la presión de nuestros pies contra el

suelo. Si sujetamos una bola de acero la sentiremos pesada en las manos, y al soltarla veremos cómo cae al suelo. En el caso de que nos hallemos en el laboratorio acelerado, ¿cómo describe esta caída alguien que está en el espacio en el exterior? Desde su punto de vista, la bola no cae. Cuando la soltamos, la bola flota (¡caída libre!), mientras el suelo del laboratorio acelera hacia ella hasta golpearla.

Seguimos en el laboratorio espacial acelerado. Ahora sostenemos la bola de acero y otra más ligera de madera, y las dejamos caer a la vez. Resulta claro que ambas golpearán el suelo al mismo tiempo, ya que podemos decir que es el suelo, acelerando hacia arriba, el que las golpea a ellas. Si en cambio el laboratorio estuviese en la Tierra, estaríamos reviviendo el legendario experimento de Galileo, en el que soltaba esas mismas bolas desde la torre de Pisa. Con independencia de su diferente peso, las bolas llegaban simultáneamente al suelo (refutando así la física aristotélica).

Experimentos caseros

Salimos de nuestro piso, el más alto del edificio, con la báscula del baño, entramos en el ascensor y nos ponemos sobre ella. Cuando el ascensor comienza a descender, momentáneamente nos sentimos más ligeros, hecho que confirma la báscula. Al llegar a la planta baja, el ascensor frena y durante unos instantes tenemos la sensación de pesar más: la báscula también lo corrobora. La aceleración simula perfectamente una variación de peso.

Nos proponemos ahora experimentos más sutiles. Entramos en el ascensor sujetando con una cuerda un globo de helio. ¿Qué sucederá cuando comencemos a bajar: se aflojará o tensará más la cuerda? Supongamos que llevamos una vela encendida. ¿Cómo se comportará la llama cuando el ascensor acelere hacia arriba o hacia abajo? Podemos comprobar nuestras respuestas en el suplemento D.

Si vamos a realizar estos ensayos en casa, habremos de tener en cuenta (precauciones elementales aparte) que la aparente alteración de la gravedad solo ocurre durante los breves instantes en que el ascensor acelera o frena. Una vez que alcance una velocidad uniforme, la gravedad volverá a ser la misma que en reposo. Para prolongar el efecto (sin alarmar a los vecinos) podemos intentar los experimentos mientras aceleramos en un coche. La gravedad aparente adicional es la que nos empuja al respaldo del asiento. ¿Hacia dónde se moverán el globo y la llama cuando arranque el vehículo?

Relatividad general

La conclusión es clara: la gravedad y la aceleración son intercambiables. Con su audacia característica, Einstein no duda en elevar esta observación a una nueva superley que todas las demás leyes de la física deben cumplir. La denomina el *principio de equivalencia*:² en la naturaleza ha de ser imposible distinguir entre la caída libre y la ausencia de gravedad, entre la aceleración y el peso.

Años después, Einstein se referirá a su intuición sobre la caída libre en la oficina de patentes como «la idea más feliz de mi vida». De alguna manera (pero ¿de qué manera?) sabe advertir que esta sencilla observación contiene la clave para resolver la tensión entre relatividad y gravedad. De hecho, nos lleva a ampliar el anterior principio de relatividad, que se refería al caso especial de movimiento en línea recta y a velocidad constante, para ahora incluir también movimientos acelerados más generales.³ En otras palabras, una *teoría general de la relatividad* ha de ser una teoría de la gravedad, y viceversa. La anterior era una *relatividad especial*, no en el sentido de ser mejor sino más restringida, un caso particular en el que no se tiene en cuenta la gravedad. El salto conceptual es enorme: Einstein nos dice que la gravedad necesariamente ha de existir, como una consecuencia de su nueva relatividad más general.

En el principio de equivalencia, Einstein ha hallado su guía más firme para el camino que le aguarda, una conexión tan importante para él como fue el principio de relatividad original.

Tempus fugit

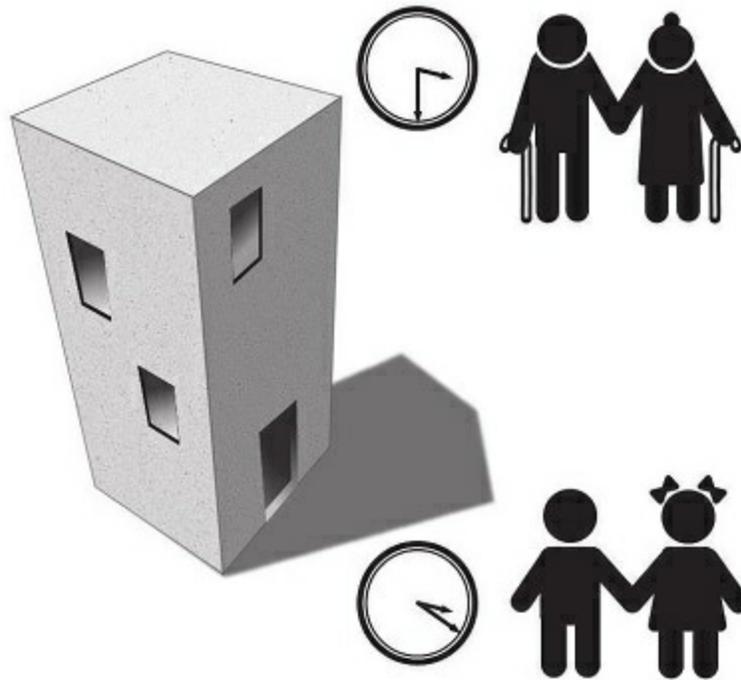
Qué pocos días son necesarios para que pase un siglo.

BRAM STOKER, *Drácula*

Ha encontrado una vía en la ciénaga oscura, un punto fiable donde posar el pie para proseguir adelante. A partir de ahora, Einstein comienza a dar pasos tentativos, pero no indecisos, explorando a fondo las consecuencias de su nuevo principio fundamental. Pese a partir de una base tan reducida, los resultados son pasmosos: es capaz de predecir fenómenos desconocidos hasta ese momento, que podrían poner a prueba sus nuevas ideas.

La primera consecuencia que deduce es de extraordinaria importancia, tanto teórica como práctica: el tiempo transcurre más lentamente allí donde la gravedad es más intensa.

Tomemos dos relojes idénticos y situemos uno en el ático y otro en la planta baja de un edificio, donde, al estar más cerca de la Tierra, la gravedad es más fuerte.¹ Cuando los comparemos, veremos que el reloj de la planta baja se retrasa respecto al del ático (de nuevo, el razonamiento es sorprendentemente asequible; lo encontramos en el suplemento C). Los relojes naturales de nuestro organismo, es decir, nuestros ritmos metabólicos y con ellos nuestra percepción del tiempo, se ralentizarán al igual que nuestro reloj de pulsera. Por tanto, si vivimos en la planta baja envejeceremos más lentamente que nuestro vecino del ático. La diferencia, sin embargo, es minúscula: cada día que pasemos en el sótano seremos solo *cient billonésimas de segundo* más jóvenes que él. Probablemente, esto no nos compense la falta de vistas.



El tiempo transcurre más lentamente en el sótano de una casa, donde la gravedad es más fuerte que en el ático.

Ha llegado a su destino

Tan pequeño es el efecto que Einstein nunca tuvo la satisfacción de verlo claramente demostrado. Se logró por primera vez en 1959,² cuatro años después de su muerte. Hoy en día, la diferencia en el paso del tiempo se ha llegado a medir entre alturas separadas apenas unos centímetros. Pero probablemente lo que más hubiese sorprendido a Einstein habría sido ver cómo este fenómeno se ha incorporado a nuestras vidas.

En marzo de 1923, tras la visita de Einstein a Barcelona, el astrónomo Josep Comas i Solà publicó en *La Vanguardia*:³ «La teoría de la relatividad, decía yo, y lo repito, no tiene el menor valor práctico dentro de la vida humana, en el caso de ser cierta; ni el comercio, ni la industria, ni nuestra salud, ni el estado social, ni siquiera las ciencias aplicadas, pueden experimentar la menor alteración por las arduas sutilezas de la consabida teoría [...]. La teoría de la relatividad es una teoría puramente matemática y divorciada por completo del concepto físico de la realidad».

El método con el que el navegador GPS (Sistema de Posicionamiento Global) de nuestros automóviles y teléfonos averigua nuestra posición no es muy diferente al de las triangulaciones que hacen los topógrafos: si conocemos nuestra distancia a tres puntos de referencia, podemos determinar con exactitud dónde nos hallamos. El sistema GPS consta de 27 satélites que orbitan en torno a la Tierra, y nuestro navegador debe establecer a qué distancia se encuentra de al menos tres de ellos para después calcular dónde nos situamos (de hecho, se usan cuatro o más medidas para conseguir gran precisión).⁴

La relatividad entra cuando examinamos la manera en que el navegador averigua su distancia a los satélites. El método parece un experimento mental de los que ideaba Einstein. Cada satélite lleva un reloj atómico y emite señales de radio que indican su hora.⁵ Cuando nuestro navegador recibe esa señal, puede compararla con la hora de su propio reloj interno. La diferencia entre ambas horas nos da el tiempo que ha tardado la señal en llegar. Como las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz, el navegador puede ahora saber cuál es su distancia al satélite multiplicando ese tiempo por la velocidad de la luz. O, más directamente, esa diferencia de tiempo nos dice a cuántos segundos luz estamos del satélite.

Para tener una localización suficientemente precisa —no peor que unos 15 metros si no queremos acabar con el coche en el fondo de un barranco—, los relojes deben estar sincronizados con una exactitud altísima: los errores deben ser menores que 0,000 000 05 segundos. ¿Por qué? Es fácil: 15 metros de distancia son 0,000 000 05 segundos luz.

Es ahora cuando oímos a Einstein exclamar: «¡con semejante precisión, podemos detectar los efectos de la relatividad!». Está en lo cierto. Por una parte, el satélite orbita a gran altura, donde la menor gravedad hace que su reloj marche más rápidamente que el de nuestro navegador. Por otra parte, dado que el satélite se mueve a enorme velocidad respecto a nosotros en la superficie terrestre, percibiremos que su reloj marcha a un ritmo más lento que el nuestro. Aunque los dos fenómenos actúen en sentido opuesto, no se eliminan totalmente entre sí. Si los ignorásemos, los errores en la localización

del vehículo irían creciendo hasta que al cabo de un par de minutos el navegador ubicaría nuestra carretera en aquel trigal más allá del arcén. Si no fuese por la relatividad estaríamos literalmente perdidos.

Así que la próxima vez que su navegador exclame «¡Ha llegado a su destino!», acuérdesse de Albert Einstein y dele las gracias por haber dedicado su vida a investigar cuestiones tan poco prácticas.⁶

Como hemos visto, el GPS requiere que la exactitud de los relojes sea de 50 milmillonésimas de segundo, o más brevemente, 50 nanosegundos.

Los satélites del GPS orbitan a 20.000 kilómetros de altura sobre la Tierra y a una velocidad de 14.000 kilómetros por hora. A esa altitud, el adelanto de sus relojes a causa de la menor gravedad es de 30 nanosegundos cada minuto. El retraso debido a la gran velocidad de su órbita es de 5 nanosegundos por minuto (los cálculos no son difíciles: están en los suplementos A y C). Si no tenemos en cuenta ambos efectos, cada minuto se acumulará un error de $30 - 5 = 25$ nanosegundos. Por tanto, en tan solo dos minutos el GPS habrá perdido la precisión de 50 nanosegundos que necesitamos.

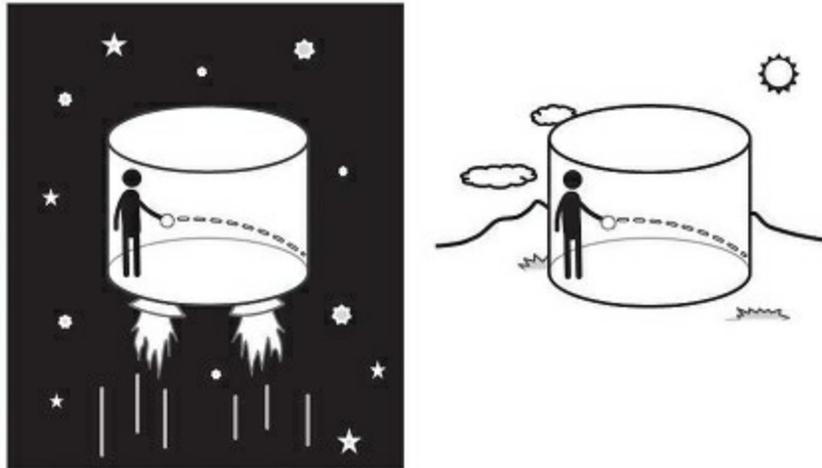
En la práctica, estas correcciones se incorporan automáticamente en los cálculos que hace el navegador para obtener su posición y mediante ajustes electrónicos del ritmo de los relojes en los satélites.

Luz grave

La segunda predicción que nos da el principio de equivalencia quizá sea más fácil de aceptar: la gravedad atrae la luz y curva las trayectorias de sus rayos.

Para ver cómo es así, regresemos al interior del laboratorio empujado por los cohetes en su base. Apuntamos una linterna —o mejor un puntero láser— hacia la pared. Si el laboratorio no acelera, veríamos que el rayo de luz cruza el laboratorio trazando una línea recta. Pero cuando el laboratorio acelera, su velocidad hacia arriba aumenta mientras el rayo se desplaza. Esto hace que el punto en el que el rayo alcanza la pared esté un poco por debajo del de salida. Es decir, nos parece que el rayo se desvía ligeramente hacia abajo.

Aplicando el principio de equivalencia, también habremos de observar esa desviación cuando el laboratorio esté posado sobre la Tierra. Por tanto, la gravedad de la Tierra atrae y curva las trayectorias de la luz.

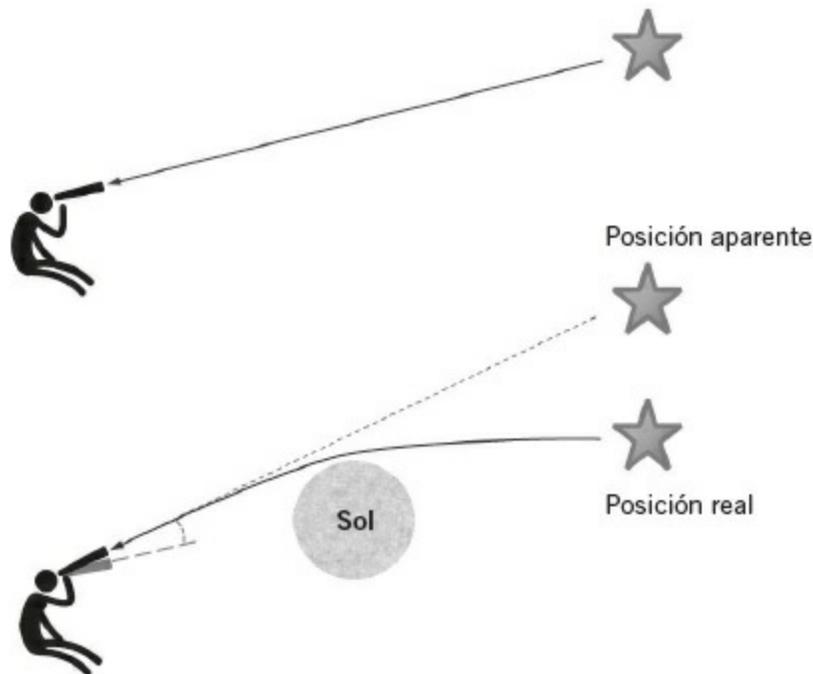


En la nave acelerada, los rayos de luz parecen curvarse. El principio de equivalencia nos dice que la gravedad también ha de producir el mismo efecto. En el dibujo, la curvatura está muy exagerada: la luz viaja tan rápidamente que apenas llega a desviarse por la gravedad terrestre.

La luz no es entonces tan diferente de los objetos ordinarios que también caen por su propio peso; algo parecido observaríamos si en lugar de luz lanzásemos un chorro de agua. La principal diferencia es que al viajar la luz tan rápidamente, las desviaciones que sufre son muy pequeñas. En un laboratorio en la Tierra, un rayo de luz se desviaría hacia abajo tan solo una distancia del tamaño de un núcleo atómico. Es un efecto ínfimo, pero cuando la gravedad no es la de la Tierra sino la del Sol, la desviación es mucho mayor y se puede medir, incluso en la época de Einstein. Tenemos así un nuevo fenómeno que verificar: las trayectorias de los rayos de luz deben curvarse al pasar cerca del Sol.

La observación, tal y como la concibió Einstein, no es complicada: comenzamos por fotografiar una zona adecuada del cielo de noche y anotamos la posición precisa de una serie de estrellas. Unos días o semanas más tarde, el disco solar, en su movimiento en la esfera celeste, se sitúa cerca de donde vemos esas estrellas. La gravedad del Sol hace que los rayos de luz procedentes de las estrellas hacia nosotros sigan ahora trayectorias levemente curvas. Como consecuencia, la posición aparente de las estrellas en el cielo se desplaza muy ligeramente, cerca de dos segundos de arco (una milésima del

diámetro del Sol en el cielo), respecto a la que habíamos observado antes. Obviamente, el Sol nos ciega y normalmente no podremos ver esas estrellas, pero en un eclipse total el disco solar queda oculto y podremos fotografiar las estrellas a su alrededor. Comparando sus posiciones con las de la foto anterior, sabremos si Einstein estaba o no en lo cierto.



La curvatura de la luz por la gravedad solar produce un desplazamiento aparente en la posición de las estrellas. La primera observación (arriba) muestra la estrella directamente en su posición real. En la segunda observación, que requiere que el Sol esté eclipsado por la Luna (no mostrada en la imagen), la estrella parece haberse desplazado un pequeño ángulo respecto a la posición real.

La primera oportunidad favorable llegó con el eclipse del 21 de agosto de 1914; el lugar más adecuado para observarlo estaba en Crimea. Allí llegó, un mes antes de la fecha, el joven astrónomo alemán Erwin Freundlich al frente de una expedición dispuesta a comprobar el efecto. Pero durante los preparativos, estalló la guerra. Los desventurados científicos alemanes, súbitamente en territorio enemigo, fueron apresados y su equipo fue confiscado. Afortunadamente, pronto los intercambiaron por prisioneros rusos y pudieron regresar a Berlín.

Los siguientes intentos también fracasaron, hasta llegar, con la guerra ya finalizada, al eclipse previsto para el 29 de mayo de 1919. En esta ocasión era una misión británica, dirigida por el astrónomo Arthur Eddington,⁷ la que se proponía comprobar —o refutar— la predicción de Einstein. La tarea le había sido encomendada a Eddington años atrás a modo de prestación social sustitutoria por su negativa obstinada a ir a la guerra (como cuáquero, su pacifismo era radical). Con esta ya concluida, la verificación de una teoría originada en la nación enemiga podía verse como una contribución a la reconciliación. Eddington, optimista, viajó al mejor lugar para la observación, la isla de Príncipe en el golfo de Guinea. Por si acaso el mal tiempo malograba la contemplación del eclipse (como de hecho a punto estuvo de suceder), se envió otra expedición a Sobral, en el norte de Brasil. Como vimos en el prólogo, la desviación se midió tal y como la había anticipado Einstein.

Este éxito lanzó al autor de la teoría general de la relatividad a una fama mundial sin precedentes para un científico. Pocas imágenes —quizá las de Buda, Jesucristo, Hitler y Mickey Mouse— son hoy en día tan inmediata y universalmente reconocibles como la suya.

Interstellar

Estos dos nuevos fenómenos gravitatorios predichos por Einstein —la ralentización del tiempo y la desviación de la luz— son a duras penas detectables en los cuerpos astronómicos más masivos y compactos que se conocían hace cien años: planetas y estrellas. Pero, como veremos más adelante, ambos efectos se magnifican hasta el extremo en un agujero negro.

Las posibilidades que esto ofrece a la ciencia-ficción han sido explotadas brillantemente en la película *Interstellar* de Christopher Nolan, quien fue asesorado por el físico americano Kip Thorne (a quien volveremos a encontrar en la segunda parte del libro).⁸ El meollo de la acción ocurre en la vecindad de Gargantúa, un enorme agujero negro aquí convertido en estrella de cine. La película trata con tanto rigor como acierto los dos efectos que hemos descrito. Gargantúa se nos muestra en la pantalla rodeado del halo

resplandeciente que irradian las partículas que orbitan en su entorno.⁹ Estas imágenes se obtuvieron calculando de manera precisa las trayectorias curvas de los rayos de luz que pasan cerca del agujero negro sin llegar a ser atrapados por él, es decir, resolviendo las ecuaciones de la teoría de Einstein. Esto es ciencia de primera clase, que incluso se tradujo en la publicación de un artículo en una revista especializada de física.¹⁰

Aún más importante para la trama de la historia es el dramático empleo que se hace de la ralentización gravitatoria del tiempo. Uno de los astronautas advierte a sus compañeros: «¡Por cada hora que pasemos cerca del agujero negro, transcurrirán siete años en la Tierra!». Saber que el efecto es real —una amplificación enorme de lo que nuestro GPS ya detecta— quizá le haga disfrutar aún más de la película.

Tendencia a la lentitud

Posiblemente, Einstein no lo ve todavía con plena claridad, pero el germen de la teoría a la que se encamina está contenido en este retraso local de los relojes, lo que en el argot de la física se denomina la dilatación gravitatoria del tiempo.

Hagamos con ella una acrobacia imaginativa: la elevamos a que sea la propiedad que define la gravedad. Es decir, si un campo gravitatorio es una manera de expresar la gravedad en cada punto del espacio, ahora ya no lo veremos como un campo de fuerza que impele los cuerpos a caer. En su lugar, diremos que es un efecto por el que el tiempo transcurre a distinto ritmo en cada sitio. Esto es, la gravedad no es una fuerza, sino una propiedad del espacio y del tiempo.

Los cuerpos ya no caen porque haya una especie de cuerda invisible tirando de ellos. La nueva ley de la gravedad afirma que lo hacen por su tendencia natural a moverse hacia donde el tiempo transcurra más lentamente.

La gravedad te llevará allí donde cada segundo sea un milenio.

La gran ilusión

Dios ha de amar la artillería y la arquitectura si su única geometría es la de Euclides.

TOM STOPPARD, *Arcadia*

Desde 1907 hasta 1911, la mente de Einstein estuvo inmersa en los enigmas de la incipiente teoría cuántica tanto o más que en la gravedad relativista.¹ Durante este tiempo, tras dejar la oficina en Berna para ir a la Universidad de Zúrich, su reputación creció imparablemente. Otras universidades comenzaron a tentarlo con nuevos y mejores puestos. En 1911 se trasladó a Praga, ciudad que le agradaba poco, pero el cargo de catedrático del Imperio austrohúngaro suponía un considerable ascenso profesional con el que además duplicaba su salario anterior.

En su estancia en Praga volvió a concentrarse en la teoría de la gravedad. Allí desarrolló de forma más precisa sus observaciones iniciales sobre el principio de equivalencia y sus consecuencias. Fue entonces cuando predijo la desviación de los rayos de luz a su paso cerca del Sol. Quizás fuera providencial que la expedición para medir el efecto en 1914 acabase en fracaso. La teoría con la que Einstein trabajaba en Praga era muy rudimentaria y no predecía más que la mitad de la desviación de la luz que indica su teoría definitiva de 1915. Antes de esta última fecha, sus ideas sobre la gravedad habrían sido refutadas por los experimentos.

La etapa de Einstein en Praga fue breve. Un año y medio más tarde, en el verano de 1912, regresó a Zúrich, esta vez como catedrático de la misma Escuela Politécnica en la que había sido un estudiante poco apreciado por sus profesores. Weber, su antigua némesis, había fallecido esa primavera.

Fue en las fechas de este segundo retorno a Zúrich cuando sus especulaciones iniciales sobre la gravedad cristalizaron y lo orientaron en una nueva y decisiva dirección. Einstein comprendió finalmente lo que el principio de equivalencia, con sus implicaciones sobre el efecto de la gravedad en la luz y en el tiempo, estaba queriendo decirle: en la nueva teoría gravitatoria, la geometría del espaciotiempo no sería una estructura fija, sino que podría variar y curvarse.

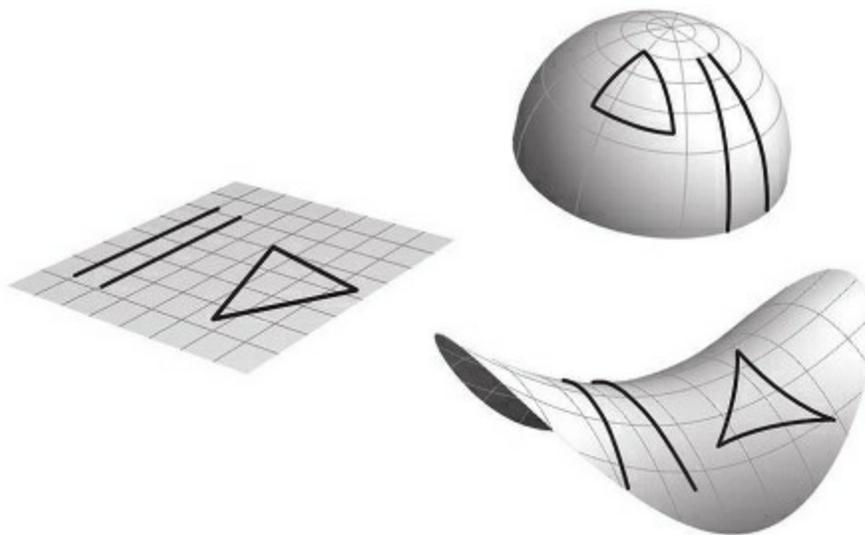
No conocemos en detalle las circunstancias de esta nueva epifanía, pero intentaremos trazar una posible línea de razonamiento a partir de lo que ya hemos visto.

Espacio curvo

La gravedad hace que el paso del tiempo varíe de un punto a otro. Pero también hemos visto que la distinción entre lo que es tiempo y lo que es espacio no es tajante. Al cambiar el estado de movimiento, algo de lo que era un intervalo de tiempo pasa a serlo de espacio y viceversa. Por tanto, si la gravedad hace variar la *duración* de los intervalos temporales, también deberemos esperar que pueda alterar la *longitud* de los intervalos espaciales. Es decir, si movemos una vara de medir en un campo gravitatorio, tenderá a estirarse o encogerse según la intensidad de la gravedad. Al igual que la diferencia en el tictac de dos relojes a distinta altitud es un fenómeno real y medible, la tendencia de la vara a deformarse al pasar de un punto a otro también será un efecto físico. La gravedad ha de modificar la geometría del espacio.

Examinemos ahora el comportamiento de la luz. ¿De qué manera determina un topógrafo si una línea es recta? Enviando o recibiendo un rayo de luz en esa dirección. Recordemos nuestros experimentos mentales sobre la relatividad: la luz no hacía sino poner en evidencia las propiedades del espaciotiempo. Tiene entonces sentido que, para cartografiar la geometría del espacio que nos rodea, lancemos rayos de luz en diferentes direcciones y con ello determinemos las posiciones y distancias entre puntos.

Si así lo hacemos, normalmente (esto es, cuando podemos ignorar la gravedad) encontraremos propiedades geométricas como las que han estudiado los escolares y los topógrafos en los últimos dos mil años: la geometría de Euclides. Si trazamos un triángulo lanzando rayos de luz entre los tres vértices, veremos que los tres ángulos internos suman 180 grados. Dos rayos de luz inicialmente paralelos seguirán trayectorias rectilíneas que ni se aproximan ni se alejan entre sí. Es decir, sea cual sea la dirección en que los lancemos, los rayos de luz trazarán líneas que no se curvan. Decimos entonces que la geometría del espacio completo, tridimensional, no presenta curvatura en ninguna dirección.



Espacios: plano, con curvatura positiva, y con curvatura negativa.

Pero no será así donde la gravedad ejerza su empuje. Aplicando el principio de equivalencia hemos aprendido que esta fuerza hace que las trayectorias de la luz se tuerzan. Por tanto, si empleamos rayos de luz para trazar la geometría de una región en la que actúe la gravedad, concluiremos que el espacio no es plano; no sigue las reglas de Euclides. Los ángulos internos de un triángulo lumínico no sumarán 180 grados, sino más o quizás menos. Dos rayos de luz que comienzan paralelos, más adelante se alejarán uno de otro, o quizás se acercarán. Estos efectos son análogos a lo que sucede

cuando dibujamos líneas —el triángulo o las paralelas— no en el plano de una hoja de papel, sino en la superficie esférica de un balón, o en una patata frita: estas son geometrías curvas. En ellas, los rayos de luz continúan trazando la línea más corta entre dos puntos, pero el espacio que recorren está combado. Dado que los efectos de los que hablamos pueden ocurrir en cualquier dirección del espacio tridimensional, diremos que, cuando hay gravedad, la geometría del espacio se curva.

Cuanto más intensa sea la gravedad, mayores serán las distorsiones de los triángulos y las líneas paralelas. Por tanto, podemos (al menos en nuestros experimentos mentales) medir la fuerza de la gravedad haciendo observaciones topográficas en el espacio. La gravedad se revela en el grado de distorsión de los triángulos o las paralelas. Realizamos de nuevo la pirueta del anterior capítulo: podemos dejar de hablar de la gravedad como una fuerza, para en adelante referirnos solamente a la curvatura del espacio.

La gravedad es curvatura.

Espaciotiempo curvo

Pero entonces, ¿en qué quedamos? ¿Queremos describir la gravedad como un efecto sobre el paso del tiempo en cada punto, o como una deformación de la geometría del espacio? Einstein ya sabe lo suficiente como para advertir que los dos fenómenos se pueden tratar conjuntamente: ambos son distorsiones —curvaturas— del espaciotiempo en toda su gloria, en sus cuatro dimensiones. La gravedad no solo deforma la geometría de las tres dimensiones del espacio: también curva la cuarta dimensión, la del tiempo.

¿Tiempo curvo?

De todas las extravagancias que hemos encontrado hasta ahora, seguramente esta es la que más nos recuerda a las ocurrencias dalinianas. ¿Qué demonios puede ser la curvatura del tiempo?

Es menos complicado de lo que parece. Hemos visto cómo al prolongar dos líneas inicialmente paralelas, la distancia entre ellas aumenta o disminuye —se separan o acercan— si la superficie no es plana, sino que está alabeada. La curvatura del tiempo es similar. Si no hay gravedad, dos relojes en puntos diferentes marcharán al mismo

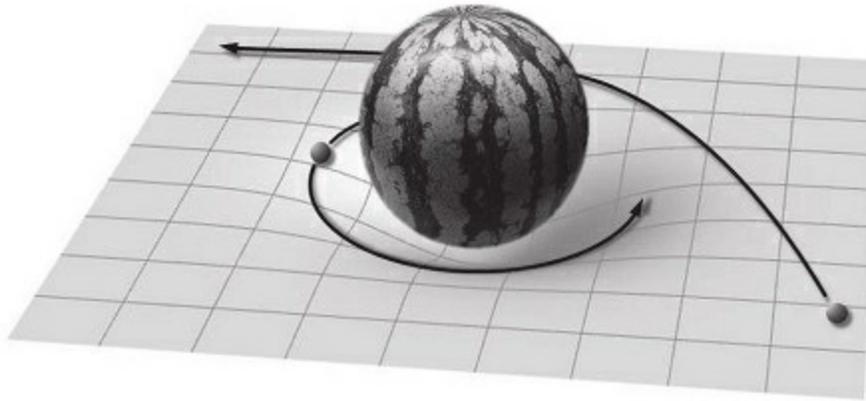
ritmo: avanzan paralelos en el tiempo. Pero cuando sienten diferente gravedad, las horas que marcan esos dos relojes se irán distanciando progresivamente, es decir, irán separándose en el tiempo, en mayor grado cuanto mayor sea la diferencia en la gravedad que siente cada reloj. La gravedad curva las trayectorias en el espacio y en el tiempo.

Recordemos que en el espaciotiempo podemos medir las distancias en años (luz), o alternativamente, medir el tiempo en metros (luz). Esto último nos es útil ahora, ya que permite expresar todos los efectos en un lenguaje puramente geométrico. Los dos relojes en el edificio, distantes diez metros de altura uno de otro, se separan en el tiempo tres centímetros cada día (puede parecer mucho, pero en un día nos movemos en el tiempo 26 mil millones de kilómetros). Así podemos considerar de forma unificada cómo dos líneas, tanto si son espaciales como temporales, se van separando en el espacio o en el tiempo por efecto de la gravedad. Podemos, por tanto, describir la gravedad como una curvatura del espaciotiempo en cualquiera de sus cuatro dimensiones.

Ya estamos listos para la conclusión que anticipamos páginas atrás: la fuerza de la gravedad no es más que una gran ilusión. La manzana de Newton, las balas de cañón, la luna y los planetas, los rayos de luz de la linterna, el deshollinador que pusimos en órbita, y nosotros flotando en el laboratorio que cae, no hacemos sino movernos libremente trazando trayectorias en la geometría curva del espaciotiempo.

Geometrías elásticas

¿Convencidos? Ahora que hemos eliminado la fuerza de la gravedad —ese efecto invisible que tira de unos planetas hacia otros— y la hemos sustituido por una curvatura del espaciotiempo, ¿realmente entendemos la manera en que actúa esta?



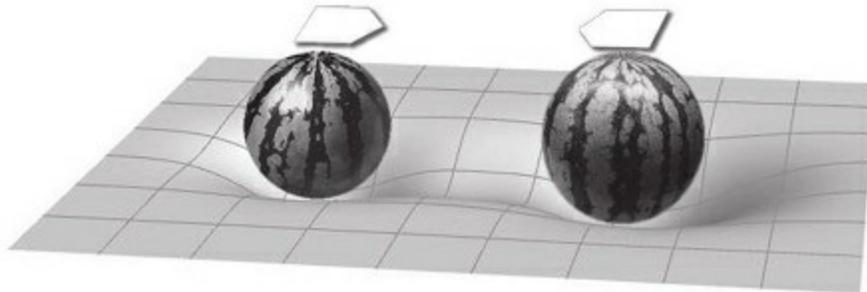
Una gran masa deforma el espacio produciendo el efecto de una atracción gravitatoria sobre los objetos que la rodean.

Echaremos mano de una analogía para visualizar cómo la curvatura hace que parezca haber una fuerza de atracción. Comenzamos por restringirnos a un universo con tan solo dos dimensiones espaciales, como una gran hoja de papel, o mejor como la membrana tensa de una cama elástica. Si soltamos canicas sobre la membrana, se moverán siguiendo trayectorias rectas. Ahora colocamos una sandía en ella. La membrana se hundirá, y cuando soltemos las canicas ya no irán en línea recta, sino que trazarán curvas en torno a la sandía como si esta las atrajera. Algunas canicas caerán hacia la sandía, otras describirán órbitas a su alrededor —si la fricción con la membrana es pequeña, orbitarán muchas veces— y finalmente las canicas que lancemos a mayor velocidad escaparán lejos tras haber sido más o menos desviadas de su trayectoria recta. Esto se corresponde bien con el comportamiento de las balas de cañón, los satélites, e incluso los rayos de luz —todos ellos canicas de velocidad creciente— bajo la gravedad de la Tierra encarnada por la sandía.

Oímos protestar: ¡pero la sandía es una bola con tres dimensiones! ¿No hemos dicho que en este modelo el universo tiene solo dos dimensiones? Tienen razón: en lugar de la sandía esférica deberíamos haber empleado un disco plano y suficientemente pesado que causase la misma deformación elástica. Pero quizás nos resulte más fácil y apetecible procurarnos una sandía.

Las objeciones no acaban aquí, sino que se hacen más sutiles. En el símil que hemos presentado, la membrana se curva dentro del espacio mayor, de tres dimensiones, en el que vivimos. Además, la causa última de su deformación es la fuerza de la gravedad de nuestro mundo real. ¿Hay entonces en nuestro propio universo algo análogo a ese espacio fuera de la membrana y a esa fuerza externa que la comba? La respuesta es breve: no. Según Einstein, *la gravedad es la curvatura* y no otra cosa; en particular no es ninguna otra fuerza externa. Debemos pensar que la Tierra por sí misma curva la geometría del espaciotiempo, y que eso es lo que experimentamos como gravedad.

Tampoco es necesario que exista un espacio mayor para que podamos decir que nuestro universo está curvado. Una raza de hormigas inteligentes que viviesen en la cama elástica podría medir las propiedades de los triángulos y de las líneas en la membrana y así averiguar si su geometría es plana o curva, sin necesidad de invocar la existencia de una tercera dimensión del espacio. La membrana elástica es todo el universo de esas hormigas.



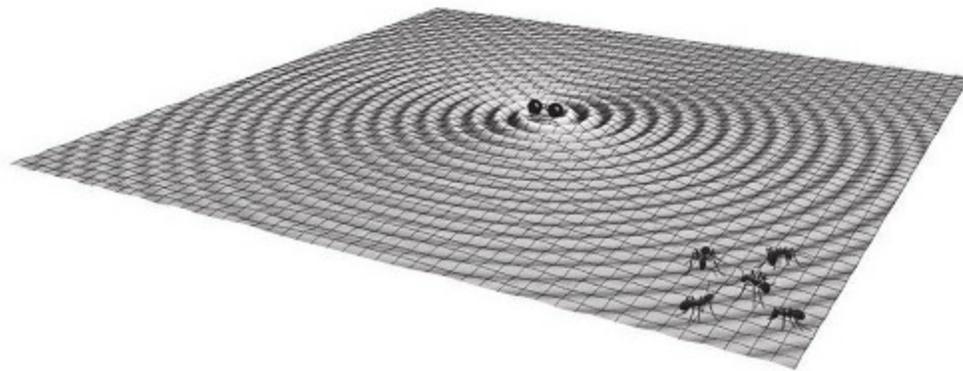
La curvatura cambiante hace que parezca que las masas se atraen entre sí.

Curvatura para todos

Otro aspecto del modelo es evidente: cuanto mayor sea la masa de la sandía, más deformará la geometría del espacio y por tanto mayor será la fuerza aparente con que atraiga las canicas a su alrededor. Ahora pongamos dos sandías próximas entre sí. Veremos que tienden a rodar para acercarse una a otra (si duerme con alguien a su lado entenderá bien este efecto). ¡Parece que

se atraen! Pero aquí no hay ninguna fuerza entre ellas, sino un efecto de la deformación de la membrana. Cada cuerpo pesado curva el espacio a su alrededor. Al mismo tiempo, la forma en que ese cuerpo se mueve depende de la curvatura que crean otros objetos.

Newton declaró la existencia de una fuerza de atracción entre todos los cuerpos como un hecho fundamental, algo para lo que no podía dar una explicación más primaria. Einstein nos dice que sí hay una forma más elemental de entender la gravedad: es universal porque en realidad es una propiedad del espaciotiempo en el que todo ocurre. ¿Cuál de estas dos versiones nos parece más misteriosa?



La colisión de dos objetos pesados puede ser detectada a gran distancia por las vibraciones que se crean en la geometría elástica.

Buenas vibraciones

Para finalizar, vamos a anticipar el fenómeno que protagonizará la segunda parte del libro. A diferencia de los anteriores, este es completamente nuevo ya que no existe en la teoría de Newton. Imaginemos que damos un pellizco fuerte y brusco a la membrana. Esta comenzará a vibrar, y sus oscilaciones viajarán rápidamente hasta los extremos de la cama elástica, atenuándose con la distancia. Puesto que la gravedad es la forma en que percibimos las distorsiones de la geometría, entonces diremos que estas oscilaciones son ondas gravitatorias.

Para las hormigas inteligentes que viven en la cama elástica, ese pellizco podría parecer una intervención sobrenatural, así que crearemos las ondas de otra manera. Tomemos dos bolas muy pesadas y compactas, por ejemplo, de plomo, y lancémoslas una contra otra a gran velocidad. En su choque —tan enérgico que incluso se fusionan formando una sola bola— harán que la membrana vibre intensamente. Nuestras hormigas, que viven en un rincón de la cama elástica, han finalizado recientemente la construcción de un instrumento extremadamente sensible que les permite detectar oscilaciones minúsculas del tejido de su universo. Ahora acaban de analizar la señal recibida. Las podemos ver exultantes de alegría.

El espaciotiempo vivo

Donde hay materia, hay geometría.¹

JOHANNES KEPLER

Llegados aquí debemos abandonar la ventaja de quien conoce el final de la historia. Nosotros ahora sabemos lo que Einstein todavía ignoraba: que en el momento en que apostó por interpretar la gravedad geoméricamente ya enfilaba el sendero que inevitablemente le llevaría al éxito. Pero hemos de tratar de ponernos, si no en su lugar (demasiado difícil), al menos junto a él para apreciar mejor su grandeza. Pese a su inmensa seguridad en sí mismo, hubo de superar momentos de desaliento en los que la empresa en que se había embarcado le pareció desmesurada, más allá de sus capacidades.

Su ruta hasta dar con la forma perfecta de la teoría sería, de hecho, cualquier cosa menos directa. No debe sorprendernos: había de enfrentarse a las complejidades matemáticas de la geometría de los espacios curvos, y con ello arrepentirse de su antiguo hábito estudiantil de saltarse las clases de sus (excelentes) profesores de matemáticas en la universidad.

Hasta ese momento, Einstein había sido un explorador con un instinto excepcional para guiarse en la selva de la física, donde le bastaba con un buen par de botas —unas matemáticas bastante convencionales— para descubrir nuevas tierras. Pero su incursión en el territorio de la gravedad lo había conducido, quisiese o no, hasta una imponente pared de roca que se erguía vertical ante él y le demandaba un equipamiento y unas habilidades técnicas de las que carecía. Otros habrían abandonado la expedición; recordemos que Einstein marchaba prácticamente en solitario y contra el consejo de los

colegas que más respetaba. Pero sus inagotables reservas de autoconfianza y los atisbos, siquiera en la distancia y entre nieblas, del espléndido destino final lo empujaron a seguir adelante con tenacidad.

Cuando la idea de geometrizar la gravedad se le hizo clara, en las fechas de su llegada a Zúrich en 1912, Einstein intentó avanzar por sí solo. Pero tras unas pocas semanas de frustración decidió pasar a ver a su viejo amigo en esa ciudad, el matemático Marcel Grossmann, y le dijo: «¡Grossmann, tienes que ayudarme o me volveré loco!». Einstein le explicó que necesitaba un método con el que describir la infinidad de maneras en que se pueden curvar los espacios (o espaciotiempos) de cuatro dimensiones. La visita fue providencial. Grossmann le informó de que, en las décadas anteriores, el genial matemático Bernhard Riemann y otros geómetras habían desarrollado lo que buscaba. El buen Grossmann accedió a hacer de guía de escalada matemática para su amigo y ambos comenzaron una colaboración que duraría algo más de un año.² En los cuadernos de Einstein de esta época encontramos a menudo, en su limpia caligrafía, la anotación «Grossmann» junto a largas y complejas fórmulas.

Juegos interactivos

¿Qué es lo que trataba de encontrar Einstein al zambullirse en estas matemáticas difíciles y extrañas para él? En el capítulo anterior vimos que el movimiento bajo la acción de la gravedad no es más que un desplazamiento en geometrías curvas. Pero no hemos explicado cómo se crea esa curvatura: no sabemos calcular cómo un cuerpo masivo deforma la geometría.

Lo que necesitaba Einstein era nada menos que una ley de la geometría del espaciotiempo que pudiese sustituir a la venerable ley de la gravedad de Newton, esa que nos dice cuál es la fuerza con que una masa atrae a otra que se encuentra a una distancia dada (quizás lo recordemos: «inversamente proporcional al cuadrado de la distancia»). Ahora Einstein debía hallar una ley análoga, pero que determinase cómo una masa curva el espaciotiempo a su alrededor. Y a pesar de que las imágenes invocadas sean completamente

diferentes —fuerzas actuando a distancia en un caso, y curvaturas geométricas en el otro—, la nueva ley de Einstein no tenía más remedio que ser capaz de reproducir los incuestionables triunfos de la teoría de Newton.

La ley de la gravedad de Newton funcionaba (y funciona) extraordinariamente bien cuando consideramos cuerpos —tanto manzanas como peras o planetas— que se mueven a velocidades mucho menores que la de la luz, con masas no exageradamente grandes o densas (no tanto como las de estrellas de neutrones y agujeros negros), y cuando la precisión que necesitamos no es altísima (como lo es en el GPS). En estos casos, la nueva ley de Einstein ha de coincidir en sus predicciones con la de Newton, por más que su aspecto sea totalmente distinto. En contra de lo que pueda parecer a primera vista, este requisito no es un inconveniente sino una guía de gran utilidad. Einstein la empleó constantemente para desechar vías impracticables en su escalada de ascenso hacia la ley geométrica correcta.

Pero Einstein fue más allá de reproducir los éxitos de Newton: también consiguió identificar tres fenómenos nuevos que, aunque minúsculos, no estaban muy lejos de la precisión concebible en su época. Dos de ellos los vimos hace unas páginas: el retraso de los relojes y la curvatura de la luz. El tercero es la pequeñísima variación en la órbita de Mercurio (el planeta más cercano al Sol y que siente más intensamente su gravedad) con la que vimos a Einstein batallar al comienzo de este libro. A diferencia de los anteriores efectos, en este caso los astrónomos ya habían advertido de una posible discrepancia con la ley de Newton. Tan pronto como reparó en ello, Einstein se asió a esta oportunidad de sobrepasar a su genial predecesor en la exploración de la gravedad.

Una piedra en el camino

Con la ayuda de Grossmann, Einstein se sumergió en la geometría de los espacios curvos de Riemann, escudriñándola en busca de expresiones matemáticas de la curvatura que pudiesen encarnar la nueva ley de la gravedad. Su excitación lo empujaba, según sus palabras, «a trabajar como un caballo, aunque el carro no siempre se mueva muy lejos de su sitio», para

resolver un problema de tal complejidad que, «en comparación, la teoría original de la relatividad no es más que un juego de niños». Meses más tarde, en mayo de 1913, Einstein emergía pletórico del empeño, mostrando al mundo su trofeo: su nueva ley de la gravedad, en la forma geométrica de una teoría general de la relatividad.

Pero este final de viaje era ilusorio. Un tropiezo en el camino lo había desorientado desviándolo hacia un destino equivocado. Hubo un momento en el que estuvo muy cerca de las ecuaciones correctas, pero cometió un error matemático fatal. Este le hizo creer que esas ecuaciones no permitirían que la energía de un sistema gravitatorio se conservase, violando así uno de los principios más sagrados (y fiables) de la ciencia... eso, o no reproducía adecuadamente la ley de Newton. Ante la amenaza de inconsistencia, Einstein descartó aquellas ecuaciones y trató de hallar otras compatibles con la ley de la energía. Las obtuvo, pero tenían propiedades chocantes: parecían preferir unos estados de movimiento sobre otros, violentando así su idea de una relatividad totalmente general. Las ecuaciones causaban la impresión de estar forzadas y difícilmente se podrían describir como bellas. Aun así, no dudó en proclamar su éxito.

Einstein se asemejaba ahora a un agente de viajes de turismo cutre: tras vendernos la idea de un destino maravilloso, el paisaje que ahora nos enseñaba dejaba mucho que desear, si bien él quería creer que se ajustaba a lo prometido y no había mucho más que hacer. Lo peor es que el problema no era solamente estético: lo que nos ofrecía no funcionaba ni a medias. Poco después de publicar el artículo con Grossmann, Einstein y su amigo Besso calcularon lo que las ecuaciones predecían para la variación de la órbita de Mercurio.³ En lugar del anticipado valor de 43 segundos de arco por siglo, el resultado que obtuvieron fue de tan solo 18. Nunca publicaron este cálculo.

Recelo y desengaño

El entusiasmo inicial de Einstein se fue desinflando tras descubrir esta y otras imperfecciones de su teoría. Durante un tiempo trató de evadirlas con argumentos enrevesados que le permitieron mantener una apariencia de

satisfecha confianza, pese a que seguía sin vencer el escepticismo de sus colegas.

Su optimismo, de por sí innato, recibió un impulso en el verano de 1915 al recibir una invitación para visitar la universidad alemana de Göttingen. Allí, el gran matemático David Hilbert se había interesado recientemente por los problemas de la gravitación. Einstein impartió una serie de seis lecciones sobre su teoría, y para su gran satisfacción, Hilbert se mostró sinceramente impresionado. Pero una vez de vuelta a casa en Berlín, a donde se había mudado el año anterior con un puesto especialmente creado para él —una oferta que no podía rechazar—, Einstein comenzó a reevaluar sin tapujos su teoría y las dificultades que acumulaba. Descubrió que, según sus ecuaciones, los movimientos de rotación en círculo, con su aceleración centrífuga, no producían la esperada apariencia de gravedad. Esta era una inconsistencia flagrante, demasiado seria como para ignorarla. Al finalizar el verano ya veía sin remedio que sus ecuaciones eran inviables.

A este desencanto se añadían otros sinsabores recientes: tan solo un año antes, su matrimonio con Mileva se había roto definitivamente tras una larga y agria separación (en la que Einstein mostró su peor cara) por la que ahora se veía alejado de sus dos hijos. Y en esas fechas Europa se hallaba inmersa en la locura colectiva y criminal de la Gran Guerra, de la que Einstein esperaba que Alemania saliera derrotada. Su posición le ganó la animosidad de muchos de los que lo rodeaban, incluida buena parte de la comunidad académica germana.

En cualquier caso, para alguien como Einstein, que siempre antepuso su vida científica a «lo meramente personal»,⁴ la decepción de ver cómo se desintegraba el fruto de años de labor hubo de ser desoladora.

Ansiedad

Durante unas semanas se sintió incapaz de salir del atolladero, pero al llegar octubre comenzó a recomponerse.⁵ Finalmente consiguió identificar el error de años atrás e inmediatamente, ya por la vía correcta, procedió a reconstruir la teoría. Ese mes se recluyó en su apartamento, pero, aunque aislado del

mundo, sabía que ahora no avanzaba solo: Hilbert, con su prodigiosa habilidad matemática, ascendía por la misma ruta a gran velocidad y amenazaba con superarlo a escasos metros de la cima para quizás arrebatarse la gloria. Al llegar noviembre comenzó el mes más febril en la vida de Einstein, con su constante alternancia entre el desasosiego por que su amigo y rival pudiese batirlo, y la excitación de ver cómo su sueño iba cristalizando en algo incomparablemente más bello de lo que había imaginado.

En cada una de las reuniones semanales de la Academia Prusiana de Ciencias de ese mes presentó una breve comunicación sobre su progreso. Las de los días 4 y 11 consistieron en nuevas versiones de las ecuaciones. No eran definitivas —todavía quedaban detalles matemáticos que rematar—, pero ya podía ver que su concepción de la gravedad como pura geometría era capaz de reproducir todo lo que Newton había logrado. Y ahora que había dado alcance al genio inglés, ¿podría rebasarlo?

Claridad final

Un día, no sabemos cuál, entre el 11 y el 18 de ese mes, Einstein hizo el decisivo cálculo de la órbita de Mercurio. Y este no obedecía a Newton sino a él. Ya no cabía duda: el Sol curva el espaciotiempo a su alrededor y Mercurio —el mensajero de los dioses— revelaba en su trayecto esa deformación. Él la había calculado con tal precisión que casi la podía tocar. Su visión no era un ensueño del que finalmente habría de despertar. La cumbre ya estaba ahí, real, frente a él.

Finalmente, el jueves 25, tan jubiloso como exhausto, salió de casa y caminó por el bulevar de la avenida Unter den Linden. Al llegar al número 8 entró en la Academia de Ciencias. Allí habló frente a sus colegas, quienes, perplejos por lo que habían venido viendo ese mes, quizás no eran plenamente conscientes de lo que ahora presenciaban. En tres breves páginas, Einstein mostraba al mundo las ecuaciones más perfectas de la ciencia, la codificación precisa e impecable de una nueva concepción de la realidad.

¿Y Hilbert? Asombrosamente, también llegó a esas mismas ecuaciones en esas fechas. La historia de si lo hizo pocos días antes o después es confusa,⁶ pero en todo caso apenas relevante. Hilbert no solo era un matemático excepcional, sino alguien tan simpático, llano y honesto como Einstein o más. Tras unos pocos días de recelo, ambos se negaron a que el resentimiento se enquistase, y en adelante Hilbert siempre concedió a su amigo el mérito de la teoría, en tanto que autor de toda su estructura conceptual.

Las ecuaciones perfectas

Creo que nos sentiríamos decepcionados si no nos presentasen las ecuaciones de Einstein como lo merecen. Sé que escribir ecuaciones es la mejor manera de ahuyentar al 99 % de los lectores —y ya he usado la única autorizada, $E = mc^2$ —, pero en este caso hace tiempo que venimos anunciando sus virtudes. Además, estas ecuaciones protagonizan buena parte de lo que vendrá más adelante. Así que aquí las tenemos:

$$G = T$$

Sí, realmente son tan sencillas como esto. A menudo las encontraremos con un aspecto aparentemente distinto —otras letras, más símbolos—, pero las diferencias no son más que elecciones arbitrarias de notación matemática: distintos envoltorios para un mismo contenido.

Pensemos en estas ecuaciones como un encuentro entre dos seres muy distintos destinados a relacionarse íntimamente entre ellos, en el que cada uno ha de responder continuamente a los movimientos y cambios del otro. La ecuación nos los muestra cara a cara. A la izquierda, G representa tanto *Gravedad* como *Geometría*: es la abreviatura de la expresión matemática que Einstein buscaba para la curvatura del espaciotiempo en cada instante y en cada lugar. A la derecha, T indica todo aquello que pueda ejercer o sentir una fuerza de gravedad: literalmente *Todo*. Debemos incluir no solo la masa de un cuerpo, sino también la energía en cada punto del espaciotiempo y en

cualquiera de sus manifestaciones: calor, presión, tensión, movimiento, etc.; también tiene un peso. Ahora bien, dado que a menudo es la masa material la que domina el peso total, nos referiremos a T como la materia.

Tenemos los dos contendientes, G y T , ya preparados, y llega el momento de ponerlos en contacto introduciendo entre ellos el signo «igual». Pero ¿cuál es el sentido de esta igualdad?

No significa que la geometría sea lo mismo que la materia, sino algo más dinámico e interactivo, un flujo continuo quizás mejor representado como « \rightleftharpoons ».

Transcribiremos las ecuaciones como

$$\text{Curvatura del espaciotiempo} \rightleftharpoons \text{Movimiento y distribución de la materia}$$

Volvamos a la cama elástica, y coloquemos sobre ella en una posición inicial varias canicas, unas cuantas naranjas y alguna que otra sandía. Ahora las dejamos moverse libres. No se quedarán quietas: en el siguiente instante, algunas habrán corrido hacia el pozo que forman otras. Cada bola se desplaza según cómo esté curvada la membrana en su entorno: la materia sigue a la curvatura. Pero al moverse las bolas también cambia continuamente la curvatura de la cama elástica, haciéndose más profunda allí donde se esté concentrando más masa: la curvatura sigue a la materia. Las ecuaciones de Einstein dictan la coreografía exacta de este baile en pareja entre materia y geometría.*

La perfecta traducción final en palabras la dio el físico John Wheeler: «El espaciotiempo dice a la materia cómo moverse; la materia dice al espaciotiempo cómo curvarse».⁷

Creo que no hay manera más sugerente y elegante de imaginar el universo. En sus órbitas, los planetas siguen curvas en la geometría del espaciotiempo, el cual responde ajustando su forma continuamente según aquellos van pasando. Esta danza elástica tiene lugar incesantemente y a todas las escalas en todo el universo. No solo los planetas: estrellas y galaxias, y también lunas y manzanas —siquiera imperceptiblemente— flexionan de forma precisa el tejido del espaciotiempo, mientras este, activo, les dicta por dónde han de proseguir su avance.

En su abstracta concisión, las ecuaciones de Einstein contienen un espaciotiempo vivo.

Vida propia

Y ahora sí, el escepticismo de sus colegas se derrumbó al ver con claridad que Einstein había logrado algo grande, una visión del espacio y el tiempo de vertiginosa belleza y en sorprendente armonía con las observaciones astronómicas.

A partir de este momento, las ecuaciones comenzaban a poseer las mentes de los científicos, y con ello, a cobrar vida propia.

Tres veces me negarás

Todos nos sentamos en la prisión de nuestras propias ideas.¹

ALBERT EINSTEIN

«Más sabias que su descubridor», dijo el físico alemán Heinrich Hertz de las ecuaciones del electromagnetismo, y fue él quien demostró su principal predicción, la existencia de las ondas electromagnéticas o hertzianas. La expresión es todavía más adecuada para la teoría de la gravedad de Einstein.

Hay al menos dos maneras de interpretar la observación de Hertz, una positiva y otra negativa, y creo que ambas son pertinentes. El físico que se enfrenta a una nueva teoría, en especial cuando esta introduce conceptos inusuales, a menudo se deja llevar por la manipulación matemática de sus ecuaciones, confiando a la lógica de estas mientras las resuelve sin saber bien dónde acabará. No es raro que la solución le revele aspectos de la teoría que no sospechaba: las ecuaciones lo guían y le muestran lo que realmente contienen. Hertz supo reflejar bien la fascinación casi incrédula por esta peculiar manera de avanzar de la ciencia.

Pero, por otra parte, en ocasiones el científico no ha llegado a liberarse totalmente de los prejuicios de las antiguas formas de pensar —¿no es fácil saber qué conservar y qué tirar!— y al igual que muchos padres cuando sus hijos les cuentan historias fantásticas, no creerá lo que sus ecuaciones tratan de decirle. No sabe entenderlas, o peor aún, piensa que se equivocan; que él, con su inveterada experiencia, sabe más.

Incluso Einstein, con su valentía y su fino instinto para navegar en la confusión y entre contradicciones, fue superado por sus ecuaciones.

Más años extraordinarios

Regresemos junto a él. Ahora que ha finalizado su teoría, se encuentra aislado política y académicamente en el caótico y mísero Berlín de la mitad de la guerra. Mantiene el contacto con sus colegas de la neutral Holanda, pero está exhausto por el esfuerzo y por las privaciones de la guerra.² Su salud se resiente seriamente. Llega a perder veinte kilos en dos meses.

No obstante, su excepcional capacidad de concentración le permite mantener intacta su inventiva. Tanto es así que su creatividad desde el otoño de 1915 hasta la primavera de 1917 solo es comparable a la de su año extraordinario de 1905. No se queda embobado admirando su magna creación, sino que inmediatamente comienza a explorar las nuevas rutas que se le abren. En 1916 predice la existencia de las ondas gravitatorias, pero espera de sus ecuaciones algo mucho más ambicioso. Pese a los cien años de distancia, no puedo evitar asombrarme ante su osadía cuando decide aplicarlas al universo en su totalidad; y va en serio: en 1917 inaugura la cosmología moderna con un artículo en el que cree haber determinado la forma global del cosmos. Consciente de su atrevimiento, en esos días escribe a un amigo, no sin humor: «He perpetrado algo que me expone al riesgo de ser recluido en un manicomio».

Por si fuera poco, continúa profundizando en la física cuántica, y entre 1916 y 1917 hace dos avances fundamentales. Analiza cómo los átomos emiten y absorben luz y radiación y con ello sienta las bases de lo que, medio siglo después, recibirá el nombre de *láser* (¡la *L* inicial en LIGO!). Descubre también algo mucho más radical, algo que le sorprende y lo perturbará por el resto de su vida: es imposible predecir en qué momento y en qué dirección un átomo emitirá un fotón de luz; tan solo podemos saber la probabilidad de que lo haga. Es decir, las predicciones de la física cuántica son de carácter estadístico. Con el tiempo, Einstein rechazará cada vez con más vehemencia que la naturaleza pueda realmente, irreduciblemente, comportarse así —«Dios no juega a los dados»—, y por ello hoy en día la imagen de sus últimos años es la de un anciano sobrepasado por la revolución cuántica, incapaz de adaptarse a ella. Sin embargo, yo prefiero recordar al Einstein que se anticipó

casi una década a todos sus contemporáneos al reconocer, con característica lucidez en medio de la confusión, una de las propiedades esenciales de la desconcertante física cuántica.

Antes de que cante el gallo

Pero volvamos a lo que está ocurriendo con las nuevas ecuaciones de la gravedad, esas peculiares reglas del juego interactivo entre el espacio, el tiempo y la materia. Ya no son solo suyas: otros también se adentran en el continente recién descubierto, y en apenas dos años se hacen exploraciones de reconocimiento de las tres principales provincias de la teoría: ondas gravitatorias, cosmología y agujeros negros.

La elasticidad del espaciotiempo se manifiesta aquí en tres fenómenos imposibles en la anterior ciencia de la gravedad. Pero al asomarse a ellos, Einstein desconfía, incluso reniega, de lo que le muestran sus ecuaciones. Solo llorará (pero de manera figurada, incluso con humor) al saber de sus errores en los dos primeros casos: ondas y cosmología. En el tercero, nunca sabrá entender a sus ecuaciones cuando le dicen que el espaciotiempo puede retorcerse hasta el extremo de amputarse.

No nos equivoquemos: nada de esto degrada a Einstein. Abrió el paso a un territorio tan grandioso e inaudito que hasta él mismo se desorientó al entrar allí. Y no estuvo solo, ni mucho menos, en su perplejidad.

Primera negación: las ondas gravitatorias

Oscilando en la confusión

Habría que distinguir la oscuridad de expresión y la expresión de oscuridad.

ERNESTO SÁBATO, *Uno y el Universo*

La idea de las ondas gravitatorias estaba en el aire hacía varias décadas, al menos desde que Maxwell y Hertz demostraron que las fuerzas eléctricas y magnéticas se transmiten como ondas que viajan a la velocidad de la luz (capítulo 12).³ El propio Maxwell sugirió que algo similar podría ocurrir para la fuerza de la gravedad, y en los primeros años del siglo XX, Henri Poincaré discutió con cierto detalle la existencia de *ondes gravifiques* y sus posibles efectos.

La teoría de la relatividad de 1905 las hacía casi inevitables. Nada se puede transmitir instantáneamente, ni siquiera los cambios en la gravedad cuando se mueven las masas que la crean. Resulta natural esperar que estos cambios se propaguen como ondas similares a las electromagnéticas. Al menos en 1913, Einstein parecía estar convencido de ello.

Sorprendentemente, la primera conclusión de Einstein tras completar su teoría es que las ondas gravitatorias no existen. Le parece que la analogía con el electromagnetismo no es suficiente. La manera más sencilla de crear una onda electromagnética es acercar y alejar rápidamente entre sí una carga eléctrica positiva y otra negativa (por ejemplo, un electrón con carga negativa y un núcleo atómico con carga positiva). Ahora bien, no existen masas negativas. ¿Será entonces imposible crear ondas gravitatorias? Einstein así lo cree y se lo explica a un colega en febrero de 1916.⁴

Pocos meses después, tras analizar sus ecuaciones con más cuidado, su opinión oscila a la conclusión opuesta. Obtiene una fórmula que predice cómo las masas (siempre positivas) en movimiento crean ondas gravitatorias. Para ello hace una aproximación: si las vibraciones de la geometría son pequeñas, resultan más fáciles de calcular. Comete varios errores matemáticos por el camino, y le cuesta entender correctamente el mensaje de sus ecuaciones, pero finalmente sus criaturas le enseñan algo nuevo y valioso.

Veinte años más tarde, cuando vive en Estados Unidos, le entran dudas: ¿qué sucederá si uno trata de hallar la geometría exacta de una onda del espaciotiempo, sin suponer que la vibración sea pequeña? Analiza el problema junto con su asistente Nathan Rosen, y para su sorpresa encuentran que, en ese caso, las ecuaciones producen valores disparatados (infinitos)

para la curvatura en algunos puntos. En otras palabras, si interrogan a las ecuaciones de manera exigente y les piden que digan toda la verdad sobre las ondas gravitatorias, comienzan a recibir contestaciones absurdas.

Con este inesperado resultado escriben un artículo de título retórico: «¿Existen las ondas gravitatorias?». Pero antes de que sea aceptado para publicarse, Einstein detecta un error crucial. El absurdo que producían las ecuaciones es ficticio y se puede evitar con un análisis más cuidadoso. Al parecer, el fallo es primeramente advertido por el físico Howard Robertson, encargado de examinar el artículo para la revista antes de su publicación, pero la reacción inicial de Einstein —no sin cierta arrogancia— es no darse por enterado. Cuando finalmente reconoce su equivocación, sin ningún sonrojo corrige su artículo y lo envía, con otro título, a otra revista menos importante.⁵

Esta será su última oscilación en torno a lo que sus ecuaciones dicen sobre las ondas gravitatorias.⁶ Pero, aunque le hayan mostrado la existencia teórica de estas ondas, sus ecuaciones también dejan clara la extraordinaria dificultad de producirlas, e incluso de detectarlas en la práctica. Tanto es así que Einstein piensa que jamás llegaremos a descubrirlas.

Lo que le han contado sus ecuaciones no es una mentira. Es tan solo un sueño demasiado difícil de realizar.

Segunda negación: el universo

El ahora que no tiene un ayer

En un día del hombre están los días del tiempo, desde aquel inconcebible día inicial del tiempo...

JORGE LUIS BORGES, «James Joyce»

En mayo de 1916, Einstein le cuenta a Besso, con excitación palpable, que ha comenzado a interrogar a sus ecuaciones acerca del espaciotiempo a escala cósmica. Quiere que le digan cuál es la forma del universo. Pero la respuesta que le dan no le convence.

Aquí Einstein trata de averiguar la geometría del universo entero, algo necesariamente muy complejo ya que la materia —planetas, estrellas y galaxias, flotando en el vacío— está distribuida de manera desigual y por tanto creará una curvatura irregular en el espacio.⁷ Se requiere entonces el arte por excelencia del físico: realizar las aproximaciones adecuadas. Por ejemplo, un balón de fútbol o la Tierra misma no son esferas perfectas, pero a menudo no nos interesa ser totalmente precisos y podemos ignorar las rugosidades de la superficie.⁸ De la misma manera, argumenta Einstein, aunque la materia en el universo no esté repartida uniformemente, quizás no sea un mal punto de partida suponer que las irregularidades son pequeñas, es decir, detalles relativamente menores cuando lo que nos importa es el universo a escalas muy grandes.

A esta suposición de uniformidad en el espacio, Einstein quiere añadir otra aproximación: la uniformidad en el tiempo. Es evidente que en el universo ocurren cambios, pero no parece descabellado imaginar —propone Einstein— que su aspecto general se mantenga igual a lo largo del tiempo. Por tanto, el universo que Einstein busca para su teoría, entrecerrando los ojos para no distraerse con los detalles finos, es uniforme y estático. Y aunque sabe que la evidencia a favor de estas hipótesis es escasa, al menos tienen dos virtudes: el atractivo de la sencillez (que siempre fascina a Einstein) y la simplificación de los cálculos. Quizás así sus ecuaciones le proporcionen un buen modelo de universo.

Sin embargo, cuando acude a ellas, se niegan a darle uno que cumpla esas condiciones.

El problema es que, como todos sabemos, la gravedad es una fuerza de atracción. Es decir, no hay masas negativas que se alejen repelidas por la Tierra: cuando las lanzamos hacia arriba, todas tienden a caer de nuevo. Lo mismo ocurre a la escala del universo. Si este consiste en una distribución inicialmente estática y bastante uniforme de galaxias, la atracción gravitatoria entre ellas las hará aglomerarse cada vez más, colapsando unas sobre otras en inmensos grumos cósmicos. Y como la materia arrastra la geometría deformándola, el resultado será un espaciotiempo cada vez más retorcido y contraído.

Obviamente, este no es el universo estático y uniforme que quiere Einstein, y ni siquiera se parece al universo en el que vivimos. Algo debe fallar en sus ecuaciones. Einstein descubre entonces que, si las modifica ligeramente, le dan una respuesta que le agrada más. Introduce en ellas un nuevo término, que actúa como si el universo estuviera permeado por una misteriosa forma de energía y tensión, tal que su gravedad no atrae sino que repele y, por tanto, se opone al colapso universal. Si este nuevo componente es muy tenue, entonces solo se nota su efecto acumulativo a escalas cósmicas y no en la Tierra, ni siquiera en el sistema solar. Este añadido a las ecuaciones se conoce como la «constante cosmológica» o el «término lambda», por la letra griega que Einstein utilizó para representarlo. Hoy en día le damos un nombre más sugerente: «energía oscura», ya que es algo que no emite ni absorbe luz o radiación (luego en realidad es más transparente que oscura).

La constante cosmológica no solo consigue que el universo de Einstein se mantenga estático: también altera su curvatura y hace que tome la forma de una esfera. En el caso del universo bidimensional de la membrana elástica, esta tendría el aspecto de una pelota. De manera análoga, nuestro universo real de tres dimensiones espaciales será una esfera de una dimensión más, al menos aproximadamente.⁹ Al igual que en la Tierra o en el balón, habrá irregularidades a escalas más pequeñas, pero estos son detalles que podemos ignorar.

Por tanto, inevitablemente, la geometría del cosmos ha de ser la de una esfera apenas cambiante en el tiempo. ¡Problema resuelto!

O quizás no. Einstein ha obligado a sus ecuaciones a comportarse según sus deseos y no cómo a ellas les resulta natural: mala estrategia paterna que poco puede durar.

En el universo esférico de Einstein, el balance entre atracción y repulsión gravitatoria es tan precario como tratar de mantener un lápiz en equilibrio sobre su punta. Cualquier mínima perturbación desestabiliza este universo de forma que, o bien colapsa dominado por la materia atractiva, o por el contrario revienta por la repulsión gravitatoria de la energía oscura. El universo prefiere cualquier cosa antes que quedarse quieto. Y esto último es en realidad lo que sus ecuaciones intentan enseñarle, si tan solo él las dejase hablar libremente.

Poco después, otros tratan las ecuaciones con menos prejuicios y juegan con ellas dándoles más libertad, primeramente un joven meteorólogo ruso, Alexander Friedmann, y más adelante un alumno belga de Eddington, el brillante clérigo jesuita Georges Lemaître.¹⁰ Este último es el más audaz al conjugar sus ecuaciones con las observaciones astronómicas más recientes. Ve con claridad que las ecuaciones del espaciotiempo, sin necesidad de constantes cosmológicas, naturalmente producen universos, esféricos o no, que no permanecen estáticos sino que se expanden, donde las galaxias se separan unas de otras, al igual que los proyectiles lanzados con gran fuerza hacia arriba no se quedan quietos sino que se alejan de la Tierra durante largo tiempo. Y no solo eso: si uno proyecta la película marcha atrás (matemáticamente) y sigue a estos universos hacia el pasado, ve cómo las galaxias se juntan, se aglomeran y se deshacen en una sopa de materia cada vez más densa, mientras el espacio se contrae sin límite, hasta el instante inicial en el que las ecuaciones dejan de tener sentido. Lemaître llega a sugerir cómo la física cuántica podría resolver este momento inicial, «el ahora que no tiene un ayer, porque ayer no existía el espacio».¹¹ Son los primeros pasos hacia la moderna teoría del Big Bang.

Pese a todo, Einstein prefiere seguir ignorando el mensaje: las matemáticas de Friedmann y Lemaître pueden ser correctas, pero cualquier cosa diferente de un universo estático es —como él mismo dice a Lemaître— físicamente abominable.

Sea como sea, se trata de ciencia, y la naturaleza no tarda en dar su veredicto. En 1929, Edwin Hubble emerge de su legendaria exploración de las profundidades del cosmos demostrando con sus observaciones que las galaxias se alejan unas de otras.¹² El universo se expande, y Einstein habrá de arrepentirse por haber amordazado a sus ecuaciones cuando estas trataban de advertírselo.

Así perdió Einstein la oportunidad de realizar la predicción más asombrosa de la historia de la cosmología. Pero pese a esta decepción, el legado cósmico de Einstein presenta un balance positivo. Hoy en día oímos que su malhadada modificación de las ecuaciones no fue en realidad un error: λ ha retornado a la cosmología contemporánea para dominarla desde el

lado oscuro. Sin embargo, en mi opinión este es un mérito menor: el término añadido es matemáticamente simple y no habría tardado en ser introducido por cualquier otro sin una mejor motivación.

Lo más admirable es que, en 1916, pocos habrían creído que los métodos de la ciencia permitieran estudiar el universo como un todo coherente. Einstein no lo dudó, y con ello inauguró una cosmología física de una ambición sin precedentes, dispuesta a abordar la cuestión del Origen sin inventar fábulas a nuestra medida.

Tercera negación: agujeros negros

La insoportable gravedad del ser

Nada queda a su lado. Rodeando la decadencia De ese colosal hundimiento, ilimitado y desnudo...

P. B. SHELLEY, «Ozymandias»

Las peripecias de Einstein con las ondas gravitatorias son una comedia de errores con final feliz. En cambio, el episodio cosmológico es épico: el héroe es derrotado cuando se enfrenta a un enigma que lo supera, pero al hacerlo abre el camino a los que vienen tras él.

La historia de los agujeros negros pertenece a otro género dramático. Aquí Einstein forma parte del primer acto de una obra de teatro del absurdo, con personajes que deambulan por el escenario negándose a encarar la realidad que se les muestra. No es hasta el segundo acto, con otros protagonistas, cuando entendemos la desconcertante conclusión hacia la que se dirigía la trama.

Primer acto, primera escena. 22 de diciembre de 1915, frente de guerra ruso. A sus 42 años, el astrónomo Karl Schwarzschild no tiene la obligación de estar ahí como soldado, pero quizás haya sido ese deseo de muchos judíos en esta época —aunque ciertamente no de Einstein— de demostrar su patriotismo germánico lo que le haya hecho ir voluntario al frente. Su tarea (calcula trayectorias de misiles para la artillería) le deja tiempo para estudiar

los boletines semanales de la Academia Prusiana de Ciencias. Ha seguido el espectacular progreso de Einstein durante el mes de noviembre y se ha propuesto atacar un problema elemental: obtener la geometría del espaciotiempo en el exterior de una estrella.¹³ Y así ahora, apenas unas semanas después de que Einstein haya finalizado su teoría, escribe a este una carta donde le cuenta: «Me puse inmediatamente a buscar una solución exacta de sus ecuaciones. Un cálculo no muy difícil dio el siguiente resultado...».

Einstein, asombrado, responde a vuelta de correo que «no creía que se pudiese resolver el problema de forma exacta tan sencillamente», y dispone que el artículo se publique prontamente. En los meses siguientes, Schwarzschild completa dos artículos más —sobre el espaciotiempo en el interior de una estrella y sobre la teoría cuántica—, pero esta brillante trayectoria se rompe trágicamente en el mes de mayo, cuando sucumbe a una rara y penosa enfermedad de la piel contraída en el frente de guerra.

Segunda escena. Einstein, Eddington y otros expertos en relatividad que han estudiado la solución de Schwarzschild observan que esta da predicciones insólitas cuando se intenta aplicar a una estrella extremadamente compacta. Por ejemplo, si la masa de la estrella fuese igual a la del Sol pero estuviese comprimida hasta un diámetro de tan solo seis kilómetros, la estrella parecería cortar toda comunicación hacia el exterior: nada podría escapar más allá de su superficie. Si la estrella tuviese diez veces la masa del Sol, entonces el tamaño para producir esa siniestra desconexión unilateral con el resto del universo sería de sesenta kilómetros. Y en general, la solución de Schwarzschild predice un tamaño crítico (todavía no lo sabemos, pero más adelante lo llamaremos el diámetro del *horizonte*) que crece de forma proporcional a la masa que consideremos.

¿Cuál es la reacción ante este intrigante resultado? Indiferentes, todos vuelven la mirada a otro lado. Un efecto extravagante que requiera una estrella de seis kilómetros de tamaño, cuando el Sol mide un millón y medio de kilómetros, es tan improbable que apenas merece atención. Es mejor dedicarse a otros fenómenos de importancia más clara.

Algo después aparece Georges Lemaître por una esquina. Con su formación de matemático y esa ausencia de prejuicios acerca de las posibilidades de la teoría —propia de una generación posterior a la de

Einstein y Eddington— con la que ha predicho la expansión del universo, sabe comprender lo que las ecuaciones dicen. Una estrella suficientemente pesada podría colapsar y contraerse sin límite, haciéndose incluso más pequeña que el tamaño crítico. Sin embargo, apenas nadie advierte la presencia de Lemaître en el escenario, ya que publica sus resultados en una revista belga de escasa difusión.

Tercera escena. Mayo de 1939, Princeton (EE.UU.). Einstein vive aquí desde que, hace seis años, escapó de la persecución antisemita en la Alemania nazi. Ni en política ni en física le ha gustado nunca mirar para otro lado, y ahora siente el prurito de volver sobre el enigma de la solución de Schwarzschild, en especial cuando pocos años antes un estudiante indio de Eddington ha demostrado que pueden existir estrellas enanas de enorme densidad.¹⁴ ¿Podría una estrella real llegar a ser tan pequeña como el tamaño crítico de Schwarzschild? El propio Eddington, al entrever el abismo al que conducen las ecuaciones, exclama: «¡Ha de haber una ley de la naturaleza que impida que una estrella se comporte de una manera tan absurda!».¹⁵

Einstein trata de encontrar una salida.¹⁶ Formula de nuevo la pregunta a sus ecuaciones (sin saber del trabajo de Lemaître) y extrae de ellas esta respuesta: una estrella no puede mantenerse estable en ese tamaño crítico. Para permanecer ahí fija, la presión en la estrella debería ser infinita y sus átomos habrían de moverse a la velocidad de la luz. Es decir, una situación totalmente imposible. Podemos entonces olvidarnos de la esfera crítica y de cualquier aberración que provenga de ella.

Mientras tanto, por otro lado del escenario entra con aire de confianza Robert Oppenheimer, el mismo que pocos años más tarde dirigirá la construcción de la bomba atómica. Einstein y él no se ven, pero sin saberlo trabajan en el mismo problema. Oppenheimer, junto con su estudiante Hartland Snyder, sigue lejanamente el hilo de Lemaître.¹⁷ Extiende con limpieza el análisis de este y llega a una conclusión radicalmente distinta a la de Einstein.

Oppenheimer imagina, de manera idealizada, una estrella muy masiva que colapsa y se contrae toda ella sin dejar atrás nada de su materia. En la imagen de la cama elástica, se forma un pozo de profundidad creciente del que cada vez resulta más difícil salir. El tamaño crítico de la solución de Schwarzschild corresponde al lugar —un círculo en nuestra membrana de dos dimensiones,

una esfera en el espacio real de tres dimensiones— en el que la membrana está tan hundida que ni siquiera un rayo de luz puede escapar fuera. Y si la luz no logra salir pese a viajar a la máxima velocidad posible, entonces nada podrá hacerlo. Por tanto, los cuerpos más masivos y compactos del universo han de ser invisibles. Nada que caiga en su interior volverá a salir: las leyes de la física dictan una prisión incondicional, definitiva e irreversible.

¿Cómo ha patinado Einstein en esta ocasión? Es curioso: el error es el mismo que cometió con su cosmología. Se ha negado a aceptar la irresistible atracción de la gravedad, la misma que no le dejaba tener un universo estático. Cuando las ecuaciones le dicen —y no mienten— que es imposible que una estrella hipercompacta con el tamaño crítico se sostenga inmóvil, él lo interpreta como una demostración por reducción al absurdo. Oppenheimer, en cambio, comprende que si las ecuaciones no le permiten tener quieta esa estrella, entonces debe dejarla derrumbarse y aceptar las consecuencias, por muy disparatadas que nos parezcan. «Muy extraño», es como Oppenheimer describe su resultado a un colega.¹⁸

Incomprensiblemente, aunque posteriormente Einstein y Oppenheimer compartan escenario —nueve años juntos en Princeton—, nunca hablan de este tema. Aún peor, en adelante el propio Oppenheimer desvía su vista, para siempre y con desdén, lejos de los problemas de la gravedad.

Sin decir más, ambos personajes salen de la obra ignorando la importancia fundamental de lo que las ecuaciones les han mostrado abiertamente: la más inverosímil dislocación del tejido del espaciotiempo.

Cae la oscuridad sobre el escenario. La teoría general de la relatividad entra en un interludio de dos décadas durante las que es ignorada por los principales científicos de la época. A pesar de su suprema belleza, no da lugar a nuevos experimentos con los que competir por la atención que generan las continuas sorpresas en la física de partículas elementales. La criatura de Einstein quizás sea la más guapa de la clase, pero no es rival para esa nueva compañera, mucho más chispeante, junto a la cual parece callada y aburrida. Le falta madurez para demostrar que no es menos profunda e interesante.

Segundo acto. Entran en escena personajes nuevos, más jóvenes y con una visión más moderna de la física, más amplia y libre de anteriores prejuicios. Hay entre ellos matemáticos de talento atraídos por la esencia

geométrica de la teoría, e imaginativos físicos preocupados por los fundamentos de su ciencia, pero también astrónomos con noticias sobre violentos fenómenos cósmicos que parecen requerir explicaciones inusuales en su disciplina. Todos ellos escuchan con atención lo que los demás tienen que decir.

De manera lenta y colectiva, con creciente asombro, desentrañan el sorprendente mensaje que las ecuaciones han estado proclamando desde que, con el sonido de fondo de los disparos de la guerra, Schwarzschild extrajo de ellas su solución más básica e importante. El colosal hundimiento de las estrellas más masivas deja tras de sí una geometría vacía, un escenario de espaciotiempo desierto pero inmensamente contorsionado, en el que la misteriosa esfera crítica demarca un pozo de oscuridad absoluta.

De nuevo John Wheeler, uno de los personajes en este segundo acto, acierta de lleno cuando le da nombre: agujero negro.¹⁹

Las negras amnesias del cielo

...a través de las negras amnesias del cielo.

SYLVIA PLATH, «*The Night Dances*»

Al final siempre gana la gravedad. Inexorable, acaba colapsando en ruinas nuestras construcciones más imponentes, al tiempo que gobierna la evolución y muerte de los astros. Su estrategia es implacable: contada partícula por partícula, la gravedad es la más débil de todas las fuerzas, pero ella siempre suma, y suma todo. No hay manera de evitarlo: si existes, tienes energía; si tienes energía, gravitas, es decir, curvas el espaciotiempo.¹ No es posible estar en el espaciotiempo sin dejar huella en él. Y según las huellas se acumulan, se van haciendo más profundas, hasta que el hundimiento se hace imparable.

Negociaciones de peso

En concentraciones moderadas, la materia puede negociar distintos equilibrios con la gravedad. Por ejemplo, en la formación de la Tierra y los demás planetas menores (de Mercurio a Marte), la gravedad llevó a una nube de polvo en el espacio a aglomerarse y comprimirse hasta formar grandes esferas de roca. Esta roca se opone a continuar prensándose más bajo su propio peso, que es relativamente modesto en estos planetas. Los planetas mayores (de Júpiter a Neptuno) son en cambio bolas de gas, con una densidad menor que la de la Tierra. Todo gas tiende a expandirse, pero aquí el ingente peso de su gravedad contrarresta la expansión.

Aumentemos el tamaño hasta llegar a una esfera de gas tan masiva como el Sol. El peso ahora es tan colosal que hace falta una nueva estrategia para alcanzar un equilibrio: subiremos la temperatura para elevar el poder expansivo del gas. ¿Cómo alcanzaremos la temperatura necesaria? De nuevo, la gravedad hace su papel: el centro de las estrellas está tan comprimido por su peso que los núcleos de los átomos se agolpan unos con otros hasta fusionarse. Esta es una reacción nuclear que eleva la temperatura del gas hasta millones de grados. Con ello, la presión crece hasta equilibrar el peso. Una estrella es una continua explosión termonuclear contenida por la gravedad.

Crisis

Pero el combustible nuclear de toda estrella es finito. Irremediablemente ha de agotarse, mientras que la gravedad siempre está presente. Tras millones o miles de millones de años, la estrella comienza a apagarse y entra en una crisis aguda. Al disminuir la presión térmica del gas, la estrella se hunde sobre sí misma. Este es un fenómeno violento, en el que la estrella se disgrega y sus capas exteriores son expulsadas lejos del núcleo estelar, con lo que se alivia parcialmente la emergencia. La evolución estelar es compleja, y la descripción que sigue es tan solo un boceto, muy incompleto, de un fenómeno que depende de muchos factores. El más importante de todos ellos es la masa inicial de la estrella.

Últimos recursos

Si la estrella original no era muy masiva —la mitad que nuestro Sol o menos—, podrá permanecer billones de años como una enana roja, una estrella que quema combustible nuclear en reacciones poco eficientes y que va apagándose muy gradualmente, sin episodios violentos.

Para una estrella más pesada, esta no es una evolución viable. Su núcleo es demasiado masivo y al disminuir su temperatura no puede evitar seguir hundiéndose sobre sí misma. Cuando la concentración se hace muy alta, aparece una presión que no proviene de la temperatura del gas sino de un

extraño efecto de la física cuántica: las partículas se resisten a estar comprimidas —es decir, localizadas— más allá de lo que la indeterminación cuántica tolera.² Se trata de una situación extrema.

Las primeras partículas en presentar su resistencia cuántica a confinarse en un volumen demasiado pequeño son las más ligeras: los electrones. Si con su presión consiguen colectivamente soportar la gravedad, la estrella se convierte en una enana blanca, tan masiva como el Sol pero comprimida en un tamaño mil veces menor, como el de la Tierra.

Sin embargo, existen estrellas tan grandes (inicialmente con diez o más veces la masa solar) en las que incluso esto es insuficiente. En ellas, la compresión gravitatoria fuerza a los electrones a unirse con los protones de los núcleos atómicos y, con ello, a formar neutrones. Aunque así desaparezca la oposición cuántica de los electrones, la capacidad de los neutrones de apiñarse unos junto a otros es mucho mayor. Esto da lugar a la forma más densa de materia que conocemos, la materia neutrónica.

Hasta llegar a esta situación límite, la estrella original ha expulsado violentamente la mayor parte de su masa, posiblemente en una explosión cósmica, una supernova tan brillante como una galaxia entera. El cogollo ultracomprimido que queda es una estrella de neutrones, una especie de núcleo atómico descomunal con una masa no mayor que dos o tres veces la del Sol, pero dentro de un volumen cien billones de veces menor que el de este, en un radio de diez o veinte kilómetros. Tenemos un millón de veces la masa de la Tierra dentro del tamaño de una ciudad.

En estas escalas, la gravedad ya no solo suma las masas, sino que ahora se multiplica a sí misma.³ Si la estrella llegase al tamaño crítico de la geometría de Schwarzschild, el colapso se desbocaría. Las estrellas de neutrones, apenas una decena de veces mayores que este tamaño crítico, son el último baluarte de la materia frente a la curvatura implacable. Más allá de ellas, la gravedad no admite tregua.

Las estrellas con una masa original más de veinte o treinta, incluso cien o más veces mayor que la del Sol, quemán su combustible desafortadamente, como estrellas del rock de brillo intenso y vida breve (relativamente: apenas

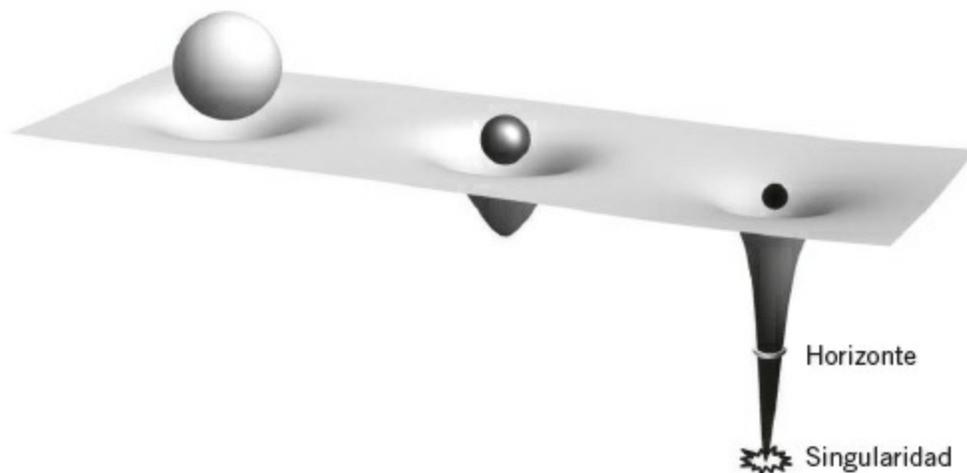
unos millones de años). Cuando sus reservas nucleares se agotan, el desmoronamiento es catastrófico y literalmente imparable. La gravedad se impone de manera absoluta.

El destino ulterior lo rigen las ecuaciones de Einstein. A ellas hemos de acudir para averiguar cómo se hunde el espaciotiempo.

Límite elástico

La cama elástica nos ayuda a comprender las ecuaciones. Planetas y estrellas curvan la membrana de forma proporcional a su densidad.⁴ Entendemos así fácilmente que otros objetos, quizás no más masivos pero sí mucho más concentrados, como las estrellas de neutrones, harán la deformación mucho más profunda.

Una estrella que colapsa sin parar llegará a hundir la membrana hasta alcanzar y superar el tamaño crítico de la solución de Schwarzschild, donde la pendiente de la membrana es tan fuerte que ni siquiera los rayos de luz escapan, arrastrados por el desplome de la geometría. Es tal como lo predijo Oppenheimer.⁵



Concentraciones crecientes de masa acentúan la deformación del espacio hasta crear un agujero negro.

A partir de ahí, la materia de la estrella no tiene más remedio que proseguir contrayéndose sin límite. Nada escapa, todo se hunde, hasta que la densidad crece infinitamente, lo que no es más que decir que las leyes elásticas de la membrana —las ecuaciones de Einstein— son incapaces de decirnos qué ocurre al final. A esa concentración infinita de materia la llamamos *la singularidad*. El término es matemático, pero ya ha comenzado a entrar en el lenguaje común para denotar un destino inevitable y más allá de nuestra comprensión.

Inferno

Volvamos a un puesto de observación en el exterior, a una distancia segura del colapso. Desde allí no podremos ver qué ocurre más allá de la esfera crítica de Schwarzschild: ningún rayo de luz que salga de ahí podrá llegar hasta nosotros. Ese límite de lo visible es lo que llamamos el *horizonte*. Al igual que la puerta del Infierno de Dante —«abandona toda esperanza»—, delimita una entrada sin posible salida.

El horizonte define al agujero negro. Pero curiosamente, allí donde se halla este horizonte no hay más que vacío. No hay ninguna señal en el espacio que lo marque. El cruce del horizonte puede llegar a ser tan poco perceptible como el paso del ecuador con la mar en calma total. Por ejemplo, quien atravesase el horizonte de un agujero negro supermasivo como los que hay en los centros de las galaxias (y algunos tienen diez mil millones de veces la masa solar), puede tardar minutos, incluso horas, antes de acabar desintegrado en la singularidad.⁶

Amnesia

Debemos evitar pensar en el agujero negro como un montón de materia muy estrujada. Fuera de la singularidad no hay sino la membrana —la geometría del espaciotiempo— vacía y curvada.⁷ La materia que colapsa era necesaria para torsionar el espaciotiempo hasta el límite, pero después no queda más

traza de ella que la curvatura que ha creado a su paso.⁸ Como en un mito ancestral, la materia desaparece al ser devorada por la curvatura que engendró.

La traumática creación de un agujero negro da lugar a una amnesia cósmica, un vacío oscuro que olvida su pasado.

Tiempo tenso

Hasta aquí lo que nos dice el modelo de la membrana para la gravedad de Einstein. No es poco: pese a no ser más que una analogía, la descripción que hemos visto es correcta. Pero la imagen de la cama elástica tiene un inconveniente: la entendemos demasiado bien. Si la idea que nos queda —una especie de pozo en el espacio, oscuro y profundo— nos parece menos misteriosa y paradójica que la reiterada por los científicos al describir un agujero negro, no es porque no hayamos comprendido bien la explicación. El problema es que la analogía de la membrana es incompleta ya que no puede mostrarnos la distorsión extrema del tiempo. Es esta la que hace que un agujero negro tense al límite nuestra imaginación. Ahora que estamos advertidos, allá vamos.

Presente continuo

Recordemos la brillante deducción de Einstein: el tiempo transcurre más lentamente cuanto mayor sea la gravedad. Tras una temporada viviendo en el ático del edificio, cuando bajemos a visitar a nuestros amigos de la planta baja veremos que para ellos ha pasado una pizca menos de tiempo que para nosotros.

Decidimos mudarnos todos hacia el centro de una galaxia en la que hay un agujero negro enorme. Una vez allí, nosotros nos instalamos a una distancia prudencial del monstruo, mientras nuestros amigos prefieren ir a una estación en órbita muy cercana al horizonte.⁹ Cuando nos despedimos, les avisamos de que bajaremos a visitarlos al cabo de un año. Así lo hacemos, pero al reunirnos nos llevamos una sorpresa: ¡ellos todavía están desempaquetando su

equipaje! Allí abajo no han transcurrido más que unas horas desde su llegada. El lapso de diferencia será mayor cuanto más cerca se hallen del agujero negro.

El tiempo se ralentiza sin límite al aproximarse al horizonte. ¿Y si uno osa ir más allá?

Fundido a negro

Nuestros amigos, amantes de las aventuras extremas, han oído decir que ninguna lo es más que tomar parte en el colapso total de una estrella. Dicho y hecho, allá van hacia una que, como en la versión idealizada que hemos tratado antes, comienza a hundirse bajo la sola acción de la gravedad, sin explosiones violentas.

Llevan consigo un emisor de radio que emite una señal, un «bip» cada segundo. Aterrizan en la superficie de la estrella y se dejan llevar por el desplome gravitatorio mientras nosotros observamos su caída desde lejos. Tal y como esperábamos, al aumentar la gravedad los «bip» nos llegan más espaciados según ellos van cayendo: los recibimos cada segundo y medio, cada dos segundos, cada 10 segundos, así hasta que la señal nos llega tan débil y tras intervalos tan grandes que ya no esperamos recibir ninguna más. Imaginamos que han cruzado el horizonte del agujero negro.¹⁰

En realidad, lo que vemos sucederá mucho más deprisa. Si el colapso forma un agujero negro con una masa comparable a la del Sol, nuestros amigos caerán muy rápidamente, y aunque en principio podríamos ver sus movimientos cada vez más ralentizados, tan solo pasarán unas cienmilésimas de segundo hasta que dejemos de recibir señales. Necesitaríamos una cámara ultrarrápida y ultrasensible para filmar la ralentización durante apenas una fracción de segundo. La imagen de ellos que vemos se apaga en un veloz fundido a negro. Si cayesen en un agujero negro supermasivo, podrían pasar unos minutos u horas hasta dejar de verlos. En cualquier caso, para nosotros tan solo queda el silencio de un vacío oscuro.

Futuro singular

¿Qué es lo que ellos experimentan? Algo muy distinto. En poco tiempo cruzan el horizonte a lomos de la estrella sin percibir nada extraño,¹¹ pero esa placidez dura un suspiro: rápidamente la curvatura se hace tan intensa que los desgarran en pedazos, para después romper sus células, sus átomos y todo lo que tenga una estructura, una extensión espacial. Porque es el mismo espacio el que ahí se desgaja, al estirarse y comprimirse sin límite aparente.

Ese momento final de destrucción absoluta *es* la singularidad. Pese a lo que la imagen de la membrana nos haya podido hacer creer (erróneamente), no se trata de un lugar en el centro del agujero negro que uno pueda observar y señalar con el dedo. La singularidad no está en un sitio, no es un punto en el espacio, sino que es un *instante* en el futuro de quien haya cruzado el horizonte.¹² Ahí dentro no tiene sentido decir «la singularidad está allí», sino «la singularidad ocurrirá dentro de unos segundos».

Dentro del agujero negro, nuestros amigos no ven la singularidad simplemente porque nadie puede ver el futuro. El motivo por el que, tras cruzar el horizonte, se dirigen sin remedio hacia la singularidad es que les es imposible evitar el paso del tiempo. Es la misma fatalidad por la que tras cada fin de semana llega el lunes siguiente.

Little Big Crunch

Esta aniquilación definitiva en una singularidad es similar a un *Big Crunch*, la inversión en el tiempo de un Big Bang.¹³ Este último es un instante explosivo que da origen al espacio, al tiempo y a la materia; a la inversa, el interior del agujero negro alberga una implosión en la que espacio, tiempo y materia llegan a su fin, pero solo dentro del horizonte. Es decir, se trata de un *Little Big Crunch* privado, un cataclismo absoluto pero localizado, imposible de presenciar para nadie que se mantenga en el exterior.

¿Qué hay más allá de esta muerte del tiempo? ¿Tiene sentido decir «después»? Las ecuaciones son incapaces de darnos ni una pista. De momento solo podemos especular si el tiempo renace tras la hecatombe para continuar en algo nuevo, o si en cambio pierde sentido hablar de él y, como decían los punks, no hay futuro.

Atrapados en su *Little Big Crunch*, nuestros amigos no conseguirán salir del agujero negro: su tiempo acaba antes de que puedan lograrlo.

La eternidad en un instante

Llegamos ahora a la paradoja extrema del agujero negro. Pese a que nadie pueda experimentar algo así directamente y vivir para contarlo, seguiremos escuchando lo que nos dicen las ecuaciones de Einstein, hasta ahora siempre veraces.

Han pasado años desde que observamos el rápido colapso de la estrella y la caída de nuestros amigos en el agujero negro. Obviamente, los damos ya por perdidos, pero sin pensarlo mucho, decidimos lanzarnos al agujero negro. La ralentización extrema del tiempo hace que, al llegar al horizonte y cruzarlo, observemos cómo *todavía está ocurriendo* el colapso; de hecho, pasaremos a formar parte de él. Una vez dentro, y tratando de no pensar en el fin inevitable al que vertiginosamente nos dirigimos, veremos objetos que cayeron en el agujero negro hace mucho tiempo.¹⁴ ¡Incluso quizás veamos a nuestros viejos amigos! Están como los recordamos: para ellos tan solo han transcurrido unas fracciones de segundo desde que nos despedimos allá en el exterior.

Los breves instantes del colapso en el *Big Crunch* interior ocurren simultáneamente con la eternidad del universo exterior.¹⁵

Esta es la propiedad más paradójica de los agujeros negros, y la principal causa de que, durante casi medio siglo, los físicos los viesan como algo absurdo. Uno de ellos, el soviético Evgeny Lifshitz, lo reconocería años más tarde diciendo: «No puedes apreciar lo difícil que era para la mente humana entender cómo los dos puntos de vista [exterior e interior] pueden ser ciertos simultáneamente».¹⁶

Gira, tiembla, radia

Todo esto apenas cuenta para quien observa desde lejos y nunca se aventura en el interior de los agujeros negros. Estos le parecen objetos extremadamente compactos y oscuros de los que nada sale. Aun así no son pozos inmóviles y

pasivos, sino que son activos y dinámicos de manera muy similar a otros objetos estelares. Por ejemplo, un agujero negro no ha de estar fijo, sino que puede desplazarse por el universo al igual que hacen las estrellas y planetas. Incluso puede girar sobre sí mismo.

¿Qué quiere decir que algo que es puro espaciotiempo gire? Aquí es conveniente que imaginemos el agujero negro como un remolino cósmico: el espacio próximo al horizonte gira al igual que lo hace el agua en el gigantesco torbellino de un *maelstrom*, y nos arrastra a dar vueltas con él.

El agujero negro también reacciona ante lo que le llega de fuera. Por ejemplo, tanto él como el espacio en su proximidad vibran y tiemblan cuando un objeto —una estrella, otro agujero negro— pasa muy cerca o cae en su interior, al igual que hace el agua cuando cae una piedra que crea ondas. No son otra cosa que las oscilaciones del espaciotiempo que responde al paso de la materia. Es decir, son ondas gravitatorias que pueden viajar lejos y que, al detectarlas, nos darán información preciosa acerca del agujero negro del que provienen.¹⁷

Cuásar

Todo en los agujeros negros nos lleva a los límites de la Naturaleza. A pesar de ser los objetos más oscuros del cosmos, están detrás de los fenómenos más luminosos y energéticos que conocemos. El motivo es la enorme atracción gravitatoria que concentran en un tamaño extraordinariamente pequeño: recordemos que un agujero negro puede ser un millón de veces menor que la estrella que lo formó, pero prácticamente tan pesado como ella. Incluso los agujeros negros supermasivos en los centros galácticos, que pueden superar el tamaño de la órbita terrestre en torno al Sol, son comparativamente pequeños para su descomunal masa.

Muchos agujeros negros están rodeados de materia diversa, gas interestelar atraído por su gravedad o quizás proveniente de estrellas que se hayan desgarrado a causa de los fuertes tirones gravitatorios. También a veces un agujero negro canibaliza lentamente a una estrella compañera de tamaño mucho mayor, mientras ambos orbitan uno en torno a otro.

Cuando el agujero negro atrae esta materia para tragarla, tenemos algo similar a intentar vaciar todo un pantano por un desagüe como el de una bañera. El agujero es tan pequeño que la materia ha de comprimirse y acelerarse enormemente según cae hacia el pozo. La fricción que se genera calienta el gas y la materia, y hace que emitan radiación intensa en forma de rayos X. En su caída, mucha de esta materia no llega a penetrar en el agujero negro, sino que sale despedida lejos y a gran velocidad en forma de chorros muy energéticos.

Si este fenómeno ocurre en uno de los agujeros negros supermasivos de los centros galácticos, tenemos un cuásar. Su formidable emisión de energía controla la evolución de esa galaxia que tiene un tamaño un billón de veces mayor que el del agujero negro.

Todavía no conocemos cómo se formaron estos monstruos supermasivos, ni cómo crecieron devorando su entorno durante miles de millones de años hasta llegar a su tamaño actual. Pero están ahí, haciendo real esa dualidad de un desplome que se consume en un instante y sin embargo continúa eternamente.

Amnesias cuánticas

No debemos finalizar sin mencionar a quien nos ha revelado muchas de las propiedades más intrigantes de los agujeros negros: Stephen Hawking. Fue él quien demostró que cuando unimos las dos mayores obsesiones de Einstein — la gravedad y la cuántica— en presencia de un agujero negro, la oscuridad de este ya no es absoluta: emite una sutilísima radiación cuántica que nos fuerza a revisar los fundamentos de la física. ¿Es irreversible la amnesia de los agujeros negros? ¿O quizás sean capaces de transferir su memoria a esa radiación? Por el momento solo se trata de planteamientos teóricos, sofisticados (y fascinantes) experimentos mentales. Pero no sigamos: esta historia nos llevaría demasiado lejos y habremos de dejarla para otra ocasión.

Llega el momento de rendir cuentas. Ya hemos escuchado a las ecuaciones de Einstein; pasemos a evaluar el legado que nos dejan.

Obstinadamente persistente

¿Y cómo se extraviarán
tus danzas nocturnas? ¿En matemáticas?

SYLVIA PLATH, «*The Night Dances*»

No cesaremos de explorar
Y el final de toda nuestra exploración
Será llegar a donde partimos
Y conocer el lugar por primera vez.

T. S. ELIOT, «*Little Gidding*»

¿Tenía entonces razón Einstein? A menudo leemos titulares de prensa en los que alguien proclama haber demostrado que Einstein se equivocó. Otras veces, en cambio, la noticia es una nueva confirmación de que estaba en lo cierto.

A Einstein le habría parecido poco adecuado enfocar la pregunta en su persona. Su autoconfianza nunca le impidió ser consciente de su propia falibilidad, algo que él reconoció muchas veces con humor. No dejaremos de considerarlo un genio por sus errores: son el reverso inevitable de la audacia que lo condujo a sus sensacionales logros.

¿Tenían razón sus ecuaciones? Esta pregunta es más interesante. Requiere que apreciemos la condición dual, siempre provisional pero a la vez duradera, del conocimiento científico.

Sabemos que el universo se expande, fuera de duda. Los agujeros negros, pese a su esencia invisible, hacen manifiesta su descomunal gravedad en multitud de fenómenos. Y finalmente hemos detectado las ondas gravitatorias. Al igual que anteriormente con Newton, las ideas y teorías de Einstein están bien establecidas cuando hacemos observaciones y experimentos dentro de ciertos rangos de masas, distancias y tiempos, con una precisión a veces muy alta pero siempre necesariamente finita.

¿Cuáles son los límites de la teoría de Einstein? Todavía no lo sabemos bien: no hemos hallado ninguna discrepancia patente entre sus predicciones y las observaciones astronómicas, cada vez más sofisticadas y minuciosas. Pero las propias ecuaciones, honestas, nos muestran abiertamente hasta dónde pueden llegar. Predicen que el universo se expande, y sin embargo son incapaces de describir lo que sucede en los primeros instantes de la expansión. Nos enseñan que el colapso gravitatorio se consuma en los agujeros negros, pero enmudecen perplejas cuando les preguntamos acerca del destino final de su interior. Y si bien esas ecuaciones nos revelan la existencia de ondas gravitatorias, al tratar de combinar estas con la mecánica cuántica nos conducen a absurdos sin aparente salida: la energía de las vibraciones cuánticas del propio espaciotiempo debería ser tan disparatadamente grande que retorcería el universo al completo hasta hacerlo microscópico.

En todos estos casos topamos con el mismo problema: las ecuaciones más perfectas de la ciencia son defectuosas ya que no incluyen la física cuántica. Todavía no tenemos ninguna evidencia clara —experimento en laboratorio u observación astronómica— que nos indique el camino a seguir. Pero al igual que Einstein entendió la necesidad de armonizar la gravedad y la relatividad, también aquí esperamos que la naturaleza sea consistente consigo misma. De alguna manera ha de permitir el matrimonio de la gravedad y la cuántica. Por ello creemos que la teoría de Einstein ha de ser modificada, o más bien sustituida por otra capaz de tratar distancias tan pequeñas y tiempos tan breves que los misteriosos efectos cuánticos en la geometría del espaciotiempo no puedan ser ignorados. En esos límites, nuestra noción del espacio se desmadeja en la incertidumbre cuántica. Quizás también le ocurra eso al tiempo. Las paradojas de los agujeros negros son la mejor guía que aquí encuentran los físicos.

Kōántica del espaciotiempo

En nuestro recorrido en este libro hemos aprendido cómo se comportan el tiempo y el espacio, pero todavía no tenemos respuesta para la pregunta que nos hicimos al comenzar: ¿qué son? Probablemente no lo sabremos hasta que no los hayamos reducido a algo más elemental. Ideas recientes originadas por el estudio de los agujeros negros en las teorías de supercuerdas nos sugieren que las ecuaciones de Einstein pueden surgir a partir de principios más básicos. Si es así, los elegantes lemas de Newton «Todo en el universo se atrae con la fuerza de la gravedad», y de Einstein «La gravedad es la ilusión creada por la curvatura del espaciotiempo», se encadenarán con este esotérico eslogan: «El espaciotiempo es la expresión geométrica del entrelazamiento cuántico».

Parece un *kōan* zen. Gravedad y cuántica no son incompatibles: el espacio es una manifestación de la cuántica (¿y el tiempo?). Estamos tratando de aclarar qué significa esto. Vivimos con lo desconocido delante.

Pervivencia

También es posible que debamos revisar la teoría para entender bien la evolución del universo en las escalas de distancias y tiempos más grandes. Los enigmas de la materia oscura y la energía oscura podrían conducirnos a alteraciones drásticas, mucho mayores que las que hizo Einstein al introducir la constante cosmológica. Y quizás también los principios de relatividad y de equivalencia no sean más que aproximadamente válidos, y dejen de aplicarse en circunstancias extremas.

La ciencia futura nos dará el contexto más amplio y preciso en el que evaluar nuestro conocimiento presente. Mas cuando llegue el momento de superar la teoría de Einstein, no habrá lugar para la pena ni para un ingenuo sentido de superioridad. Y es que, al igual que la teoría de Newton pervive en el acervo permanente de la ciencia, estoy convencido de que el núcleo central de la visión de Einstein está aquí para quedarse: el espaciotiempo es un ente dinámico, y su curvatura es lo que comúnmente

llamamos gravedad. En un amplio ámbito de la naturaleza —a cuyos límites todavía no hemos llegado—, las ecuaciones de Einstein regulan con elegancia y precisión las relaciones entre la materia y la geometría.

En esto, lo más importante, nadie le quitará la razón.

No cesaremos de explorar

Pasemos a despedirnos de Einstein.

Es el año 1950, y al igual que aquel día de 35 años antes, lo encontramos sentado a su mesa, enfrascado en un cálculo matemático. Muchas cosas a su alrededor han cambiado: ahora no hay guerra; vive en una tranquila ciudad universitaria, en otro país y utilizando otra lengua; dedica mucho más de su tiempo a la política internacional,¹ sobre todo a la causa sionista; se ha convertido en una celebridad mundial, un santo secular viviente. Pero la esencia permanece: lo personal y lo mundano le siguen pareciendo secundarios en comparación con su dedicación a la ciencia. Persiste obstinadamente en alcanzar una nueva visión, más perfecta y sublime, del misterio del universo. Se encuentra aislado, no política pero sí científicamente, y esto sigue sin importarle.

La nueva física cuántica, cuya naturaleza estadística él advirtió antes que nadie, ha tomado un camino cada vez más contrario a sus instintos. No es que no la comprenda. Al contrario, él ha realizado uno de los estudios más perspicaces y profundos de su característica más sorprendente: el entrelazamiento entre las propiedades de partículas distantes entre sí. Pero al finalizar el análisis rehúsa aceptar sus consecuencias acerca de lo que constituye la realidad física.

Él cree que la vía correcta para la física es otra, una que emprendió hace más de veinte años: la búsqueda de una teoría unificada del universo, una manera de fusionar la G y la T , separadas en su ecuación, en un *TODO* completo aún más perfecto. En los cálculos que le vemos hacer trata de resolver las ecuaciones de su teoría más reciente. Pero no hay comparación posible con aquel mes de noviembre de 1915. No hay nada similar a aquella excitación de estar interrogando a la Naturaleza para oír su veredicto. Y no es

que se arrepienta de haberse adentrado de nuevo en tierras desconocidas, en solitario y contra el consejo de sus colegas. ¿Acaso le fue mal en la anterior ocasión? Pero ahora sí que está perdido en un cenagal sin salida, una maraña matemática desligada de la naturaleza.

Uno de sus mejores biógrafos dijo que, en lo que concierne a sus contribuciones a la física, «después de 1925, Einstein bien podría haberse ido de pesca».² Siempre me ha parecido un juicio injusto. Esos años no fueron ni mucho menos baldíos. Además del trabajo de 1935 sobre el entrelazamiento cuántico que ya hemos mencionado (de hecho, es su artículo más frecuentemente citado en la literatura científica hoy en día), Einstein continuó ayudando a llevar a la maduración a sus criaturas predilectas, sus ecuaciones de la gravedad. Con ellas descubrió las geometrías de agujeros de gusano y el efecto de lente gravitatoria. Aunque modestas en comparación con sus obras magnas, son aportaciones que bien podrían justificar la carrera de otros científicos. Quizá su trabajo más interesante sobre la gravedad en estos años sea el que realizó en 1938 junto con sus ayudantes Leopold Infeld y Banesh Hoffmann. Sus resultados se emplean en la actualidad para calcular el inicio de la colisión de dos agujeros negros. El rugido del león viejo impresiona más que el de muchos perros fieros. Pero eran los años oscuros de la teoría gravitatoria y fueron pocos los que prestaron atención.

Lo dejamos ya, mientras aparta, frustrado, los imposibles cálculos de su teoría unificada. Ahora pasa a contestar una de las innumerables cartas — muchas de ellas de niños— que recibe a diario.³

Cinco años más tarde recibe la noticia del fallecimiento de su querido amigo Besso. En una carta de condolencia a la familia, dice: «Ahora ha abandonado este extraño mundo un poco antes que yo. Eso no significa nada. Los que, como nosotros, creemos en la física, sabemos que la distinción entre pasado, presente y futuro es tan solo una ilusión obstinadamente persistente». Sin sentimentalidad ni pesar, Einstein se libera definitivamente de esta ilusión un mes después que su viejo amigo, el 18 de abril de 1955.

En julio de ese año, Berna —la ciudad en la que, medio siglo antes, un inspector de patentes sacudió los cimientos de la física— acoge la primera conferencia internacional expresamente dedicada a las teorías especial y

general de la relatividad. Una nueva generación de físicos acude dispuesta a despertar a la Bella Durmiente.

PARTE II

El gato de Confucio

Lo más difícil es encontrar un gato negro
en una habitación a oscuras.
Sobre todo si no hay gato.

Apócrifo frecuentemente atribuido a Confucio

¡Hay gato! Lo hemos oído maullar.

Colaboración científica LIGO-Virgo,
11 de febrero de 2016 (traducción libre)

¿Dónde está, entonces, la clave del misterio?
Está en la magia de las sombras.

JUNICHIRO TANIZAKI, *El elogio de la sombra*

Ondas

En la naturaleza todo es flujo y reflujo, todo es movimiento ondulatorio.¹

NIKOLA TESLA

El castellano enmascara ligeramente, al desdoblar las palabras —como hace el francés (*vague, onde*), mas no el inglés (*wave*) ni el alemán (*Welle*)—, nuestra experiencia original de lo que es una onda: las olas del mar. Las oscilaciones de la superficie acuática ya nos muestran lo esencial de un fenómeno omnipresente en la Naturaleza, desde la escala subatómica hasta el límite del universo visible. Una variación rítmica, periódica, que se extiende y viaja lejos de su lugar de origen.

Pero ¿qué es lo que viaja con la ola? Lo primero que nos viene a la mente —viaja el agua— es poco acertado. Basta con poner un corcho flotando en la superficie para que lo veamos subir y bajar, pero no avanzar con la ola —quizá se vaya desplazando un poco hacia la costa según van pasando las olas, pero desde luego lo hace mucho más lentamente que estas—. Digamos entonces que es la propia oscilación, arriba y abajo, la que marcha adelante. Esto sí es apropiado: al poner varios corchos a diferente distancia de la costa, vemos cómo suben y bajan sucesivamente con el paso de las olas. La onda es un patrón de oscilación que avanza.

Pero hay algo más interesante: lo que se propaga con la onda es energía. Antes de que llegue la ola, el corcho está quieto en el agua. Entonces comienza a subir y bajar: ha adquirido energía de movimiento, energía cinética. Un generador puede aprovechar este movimiento para producir electricidad. Cuando avanzan, las ondas no transportan materia, no son como proyectiles

lanzados, sino que transmiten energía a distancia, energía que proviene de aquello que puso en marcha el movimiento inicial: el viento, un terremoto o las piedritas que un niño deja caer en un charco, fascinado por la continua expansión de los círculos concéntricos.

Junto con la energía, una onda transmite también algo más intangible pero no menos real: una señal. Es decir, información. Analizando las olas que llegan a la costa —su dirección, su ritmo de llegada y su altura, y la manera en que varían— podemos averiguar, siquiera en parte, qué pudo originarlas, cuándo, y de dónde proceden. Quizás la transmisión de información sea el aspecto más importante y profundo de una onda. De hecho, es mediante ondas como percibimos mayoritariamente nuestro entorno: tanto el sonido como la luz no son sino ondas. Pero esto no nos parece evidente: ¿cuáles son las oscilaciones en estos casos?

Sonido

Nos es más fácil advertirlo en el sonido. En particular, resulta familiar sentir los sonidos muy graves como vibraciones (en los oídos, en el vientre); es decir, como rápidas oscilaciones; es decir, como ondas. A diferencia de las del mar, las del sonido no son ondas que se propaguen en una superficie de dos dimensiones, sino en las tres dimensiones del espacio. En lugar de círculos concéntricos en la superficie del agua, las ondas de sonido —como las que se producen en una explosión— se expanden en el aire como esferas de tamaño creciente. Lo que en ellas oscila periódicamente es la presión del aire: las capas de aire más comprimidas alternan con capas adyacentes menos densas. El patrón de compresión avanza según las más comprimidas se relajan y las menos densas se aprietan sucesivamente.

Microscópicamente, podemos ver cómo las moléculas del aire oscilan adelante y atrás, concentrándose y separándose rítmicamente mientras avanza la onda de sonido. De nuevo, estas moléculas apenas se desplazan con el paso de la onda: lo que viaja con el sonido no es el aire, sino una pauta de oscilación. La oscilación transporta la energía que hace que nuestro tímpano

vibre. Así recibimos la señal, ese sonido de tono y timbre característicos que, analizados en el cerebro, delatan la guitarra que suena —generadora de ondas — al otro lado de la sala.

Basta una mínima experiencia musical para saber que el mismo aparato que produce una onda también sirve para recibirla. Pongamos dos guitarras, bien afinadas, una frente a otra. Pulsamos una cuerda, digamos la más gruesa, de una de ellas. Si acercamos el oído a la cuerda correspondiente de la otra guitarra podremos oírla vibrar, sin haberla siquiera tocado. Este es un principio general: el receptor de una onda repite, atenuado por la distancia, el patrón de oscilación del emisor.

Luz

Si ya resulta complejo reconocer en el sonido unas oscilaciones que ocurren a un ritmo de centenares de veces cada segundo, en el caso de la luz es mucho más difícil: aquí se producen cerca de 600 billones de veces por segundo. Pero a comienzos del siglo XIX, Thomas Young² —médico, egiptólogo y físico, el modesto héroe que fue «el último hombre que lo supo todo»— consiguió hacerlo manifiesto: las oscilaciones de dos haces de luz podían neutralizarse o reforzarse de la misma manera en que lo hacen las fluctuaciones arriba-abajo de dos olas que se encuentran una con otra. *Interferencia*. Recordemos el término: esta capacidad de interferir unas con otras, sumándose o restándose, es una de las propiedades más importantes de las ondas. De ella viene la *I* de LIGO.

El XIX fue el siglo en el que se comenzó a apreciar que los fenómenos ondulatorios son tan fundamentales como ubicuos. Nos hemos encontrado ya con James Maxwell y Heinrich Hertz,³ quienes —prestando buena atención a sus ecuaciones— demostraron que las fuerzas eléctricas y magnéticas también se pueden transmitir como ondas. Maxwell, además, calculó que la velocidad de esas ondas era la misma que la de la luz, y saltó de inmediato a la conclusión de que, de hecho, la luz no era sino una onda electromagnética (en estas, la fuerza eléctrica y la magnética viajan juntas, alternando una con otra en sus oscilaciones).

Veamos: la fuerza eléctrica empuja y mueve las partículas cargadas, por ejemplo, los electrones. Por tanto, una onda electromagnética hará que un electrón oscile arriba y abajo a su paso, como el corcho en la superficie del agua, si bien en este caso billones de veces por segundo. Pero ya hemos visto que el receptor de una onda también puede ser emisor. Invertiendo así el proceso, un electrón que vibre creará ondas electromagnéticas. La luz de una bombilla proviene de electrones que la emiten en sus minúsculas y velocísimas oscilaciones en los átomos. Y por su parte, nuestros receptores de luz en el ojo disponen de compuestos químicos, moléculas, con electrones dispuestos en estados ajustados —afinados— para vibrar al ritmo de la luz que les llega.

El medio no es el mensaje

Si en el sonido lo que vibra es el aire —sin él, o sin algún otro medio material, no hay sonido—, ¿qué es lo que vibra en el caso de la luz? Ya lo hemos dicho, y sin embargo conviene insistir: lo que vibra es la fuerza eléctrica y magnética en cada punto del espacio, lo que llamamos el campo electromagnético.

Pero ¿no hay algún otro medio material fundamental oscilando aquí, algo que juegue un papel similar al de las moléculas del aire o del agua? No, no lo hay, y es mejor que nos olvidemos de esta idea.

No somos los primeros en tener que hacerlo. Los físicos del siglo XIX inventaron el «éter luminífero» (después unificado con el «éter electromagnético») para cumplir esa función, y construyeron modelos cada vez más enrevesados de él. Pero Einstein, con su nuevo análisis de las propiedades de la propagación de la luz, mostró que este éter, además de problemático, era innecesario.

Nos hacemos un favor si dejamos de empeñarnos en que haya un medio material que transmita la fuerza eléctrica y magnética, por muy sutil y etéreo que lo concibamos. Esta fuerza simplemente se propaga oscilando por el

espacio —apuntando ahora arriba, después abajo, en rápido cambio— y así transmite la energía y la información sobre el movimiento de unas cargas hasta otras cargas distantes de ellas.

El mensaje no necesita un medio material.

Espectros

Obviamente, los distintos tipos de ondas difieren en aquello que oscila: la presión del aire o la fuerza electromagnética. Pero todas ellas tienen en común que se pueden caracterizar por su amplitud y su frecuencia (la tercera propiedad de las ondas es su polarización: suplemento G).

Nos parece intuitivamente claro que la amplitud del movimiento que produce una onda es una medida de su intensidad: un sonido muy fuerte, como una explosión, produce variaciones tremendas de presión. Pero una onda también puede diferir de otra en el ritmo al que produce oscilaciones, esto es, en su frecuencia.

Los aficionados a la música lo saben bien: los sonidos graves corresponden a vibraciones comparativamente lentas (decenas o pocos cientos de oscilaciones por segundo), mientras que los tonos agudos son ondas de frecuencias más altas (varios miles de oscilaciones por segundo). Amplitud y frecuencia son independientes: en una audiometría nos someten a sonidos muy agudos pero débiles, mientras que los enormes bafles de una discoteca pueden hacer temblar nuestro estómago con los sonidos graves del bajo y la batería. Este *espectro de sonidos*, graves y agudos, se extiende a otras frecuencias, tanto muy altas como muy bajas (ultrasonidos e infrasonidos), que son inaudibles a nuestros oídos, aunque no a los de algunos animales.

De manera análoga, la luz corresponde a una parte pequeña del espectro de las ondas electromagnéticas: nuestros ojos solo son sensibles a un cierto rango de frecuencias. Si en el sonido el aumento de la frecuencia nos lleva de tonos graves a agudos, en la luz lo que cambia es su color, recorriendo la gama completa del arcoíris: del rojo a bajas frecuencias, hasta el violeta a las más altas que podemos ver.

Más allá del arcoíris

Pero el espectro electromagnético va más allá del arcoíris, por encima y por debajo de él. Llega hasta ondas que nos resulta extraño relacionar con la luz. Si disminuimos la frecuencia —oscilaciones cada vez menos frenéticas—, primero encontramos la luz infrarroja (luz que emiten los objetos calientes pero que no vemos directamente), para después pasar a las microondas. Como todas las ondas, estas transmiten energía: hacen que vibren las moléculas del agua y con ello se calienten y cuezan los alimentos en el horno de microondas. También estas ondas llevan señales: por ejemplo, las conexiones wifi emiten y reciben microondas.

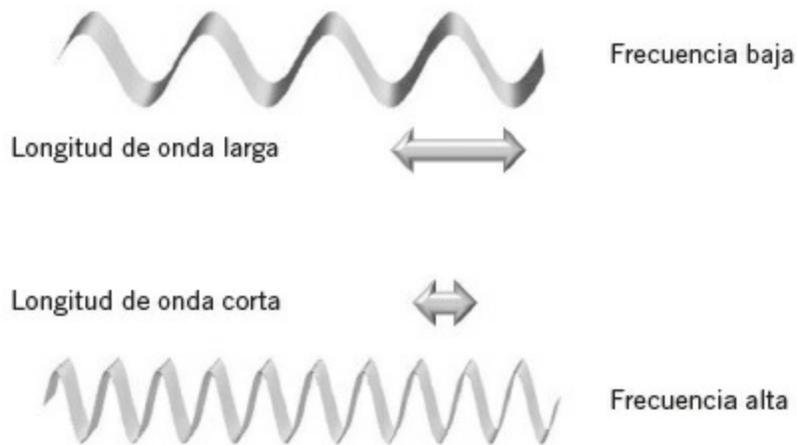
Las microondas se incluyen en lo que llamamos ondas de radio, pero el espectro de estas se extiende a frecuencias todavía más bajas. En una antena emisora de radio tenemos electrones (corrientes eléctricas) que se mueven arriba y abajo a lo largo de un alambre, miles o miles de millones de veces por segundo. Al hacerlo crean una vibración de la fuerza electromagnética que se propaga ondulante por el espacio —incluso espacio vacío, sin aire— hasta llegar a la antena receptora. Esta es otro alambre en el que los electrones comienzan a oscilar al recibir la onda, reproduciendo con ello la señal original: las voces de la radio, las imágenes de la televisión.

Eso es lo que encontramos a frecuencias cada vez más bajas. En la dirección opuesta aumentamos la frecuencia de vibración más allá de la de la luz violeta. Primero hallamos, naturalmente, la luz ultravioleta, todavía visible para algunos insectos. Esta luz es capaz de hacer vibrar tan fuertemente los electrones en las moléculas de nuestra piel que puede producir cambios importantes en ellas (cuidado, si se acumulan pueden producir cáncer). A frecuencias todavía más altas tenemos los rayos X y los rayos gamma. Si su nombre nos resulta ominoso es porque las vibraciones que producen en los electrones son extremadamente violentas (ionizan los átomos) y por ello resultan potencialmente muy nocivas. Pero recordemos que, aunque sus efectos biológicos puedan ser muy diferentes, para un físico los rayos gamma son esencialmente lo mismo que la luz visible e incluso que las ondas de radio: son ondas electromagnéticas que solo difieren en su frecuencia. Y todas ellas viajan a la misma velocidad: la de la luz.

Por ello, relajándonos un poco, podemos referirnos a todo el espectro electromagnético —desde las ondas de radio a los rayos gamma— como luz de diferentes colores. El arcoíris desplegado sin fin.

Longitud de onda

La velocidad de propagación de las ondas de luz y electromagnéticas, es decir la velocidad a la que avanzan sus crestas, es la misma para todas las frecuencias. Es fácil ver entonces que la separación entre dos crestas sucesivas de una onda en un instante dado —la longitud de onda— ha de ser mayor si las oscilaciones son de frecuencia baja, y menor si la frecuencia es alta.



Las ondas de baja frecuencia son de mayor longitud que las de alta frecuencia.

Las ondas de radio, cuya frecuencia es muy baja, son muy largas (metros o kilómetros), mientras que los rayos X y gamma tienen longitudes de onda extremadamente cortas, de tamaño inferior a un átomo. Entre estos extremos, la longitud de las microondas es de centímetros o milímetros, y la de la luz visible es entre mil y diez mil veces menor.

Estas relaciones se aplican también al sonido, pero su velocidad es un millón de veces menor que la de la luz. El aire no puede vibrar tan rápidamente como el campo electromagnético. Por ello, aunque las microondas y las ondas sonoras tengan longitudes de onda similares, las primeras vibran un millón de veces más rápido que las otras.

La longitud de una onda nos da una idea del tamaño típico del sistema que la produce. Por ejemplo, los altavoces de sonidos agudos (cuyas longitudes de onda son de centímetros o milímetros) son mucho más pequeños que los altavoces de graves

(ondas de decímetros o hasta metros de longitud).

Rumor de olas

... mirar las olas podría ser la clave para adueñarse de la complejidad del mundo.

ITALO CALVINO, «Lectura de una ola»

Si hoy vivimos inmersos en un océano de ondas que transportan una información intangible se lo debemos ante todo a Maxwell y Hertz. El nombre de este último nos es familiar por la unidad que usamos para medir la frecuencia: el hercio (Hz), un ritmo de una oscilación por segundo. Maxwell, en cambio, es conocido por los estudiantes de física e ingeniería (quienes lo reverencian solo por debajo de Newton y Einstein) y pocos más. Ni uno ni otro sospecharon el alcance e implicaciones de su descubrimiento. Fallecieron jóvenes: Maxwell a los 48 años, en 1879, y Hertz a los 39, en 1894, tan solo ocho años después de comenzar sus brillantes experimentos. Hertz, al ser preguntado sobre la utilidad de las ondas de radio y sus posibles ramificaciones, contestó seguro: «Ninguna».

Tampoco Einstein tuvo gran fe en esas ondas gravitatorias que, con los titubeos que le vimos, él mismo había predicho. No veía cómo ningún fenómeno natural en el universo que él conocía, compuesto de planetas y de estrellas como el sol, podría emitirlas con suficiente intensidad; los agujeros negros y las estrellas de neutrones todavía tardarían décadas en ser tomados en serio. Tampoco podía prever que la tecnología alcanzase la precisión necesaria para advertir el levísimo rumor de su paso. Seguramente, pensó, permanecerán para siempre fuera de nuestro alcance.

Se dice que cada uno de nosotros sobrestima lo que podrá hacer en un mes o un año, pero infravalora lo que llegará a conseguir en una década. Cuando se trata de lo que colectivamente lograremos en varias décadas o un siglo, nuestras predicciones nada valen, para mal o para bien.

Pese a lo que pudiesen anticipar Einstein y sus contemporáneos, las ondas gravitatorias han entrado ya en nuestra ciencia, y de manera espectacular. Las hemos encontrado ocasionalmente en capítulos anteriores; es hora de que las entendamos mejor.

Geometría variable

Hemos visto que las fuerzas eléctricas y magnéticas pueden propagarse oscilando de un punto a otro, haciendo vibrar las cargas a su paso. ¿Por qué no pensar que también existan olas de gravedad variable? ¿Y si es así, cómo actuarán? La gravedad empuja y acelera el movimiento de cualquier cuerpo. Por tanto, su onda será una fuerza de gravedad variable que, al alternar su dirección, empujará cíclicamente los objetos que encuentre en su avance.

Imaginemos entonces dos cuerpos flotando libremente en el espacio (suficientemente ligeros como para que apenas se atraigan). Al paso de una onda gravitatoria los vemos moverse, acercándose y separándose acompasadamente entre sí durante los instantes en que pasa la onda. Podemos decir que hemos observado una fuerza de gravedad variable empujando los dos cuerpos.

Pero ahora recordamos el salto mental que nos ha enseñado a hacer Einstein: la gravedad es una ilusión creada por la distorsión de la geometría. No hay una fuerza de gravedad variable, ninguna cuerda invisible actuando sobre los objetos: lo que oscila es el propio espaciotiempo. Al pasar una ola de distorsión del espacio, este se estira y encoge rítmicamente. Los dos objetos se acercan y alejan llevados libremente por la oscilación del espacio en el que se encuentran.¹ Es decir, es el propio escenario el que vibra y los hace moverse. Recordemos la imagen de la membrana elástica temblando.

Estas olas en la geometría avanzan a la máxima velocidad posible en el espaciotiempo: la misma que la de la luz. Al igual que las demás ondas, son capaces de transmitir energía (poniendo en movimiento los objetos que encuentran a su paso) e información, codificada principalmente en la forma en que varían su amplitud y frecuencia.

Cánticos del espacio y el tiempo

¿En qué otros aspectos se parecen y distinguen estas ondas de las que ya hemos visto? A diferencia de las de sonido, y al igual que las de la luz, las ondas gravitatorias no necesitan un medio material para propagarse. Les basta con lo mínimo: espacio y tiempo, y de manera mucho más básica que las ondas electromagnéticas. Estas últimas viajan *a través del espaciotiempo*, mientras que las ondas gravitatorias son *el propio espaciotiempo* oscilando. Son las oscilaciones más elementales que cabe imaginar.

Pero aunque su medio de transmisión sea diferente, las ondas gravitatorias se asemejan al sonido en casi todo lo demás. Por ejemplo, ambas empujan todo lo que encuentran a su paso: nada es completamente transparente al sonido, ni tampoco a las ondas gravitatorias. En cambio, las ondas electromagnéticas solo afectan a las partículas cargadas eléctricamente.

Esta es una de las razones por las que la detección de las ondas gravitatorias recuerda mucho más a la del sonido que a la de la luz. Tanto nuestros oídos y micrófonos como los detectores de ondas gravitatorias (de los que hablaremos más adelante) están diseñados para percibir vibraciones de objetos. Podemos considerarlos a todos ellos como variantes de micrófono. Además, en muchos casos de interés —como las colisiones de agujeros negros de masa estelar o las colisiones de estrellas de neutrones—, las ondas gravitatorias que se emiten oscilan con frecuencias de cientos o miles de veces por segundo, similares a las de los sonidos audibles. Si no fuesen tan débiles, las podríamos oír directamente con nuestros oídos.

Hay otro motivo más importante que nos lleva a pensar en las ondas gravitatorias como una especie de sonido y no de luz. La luz que nos llega de lámparas, estrellas y planetas la crea la agitación de los electrones en sus

átomos, que son mucho más pequeños que los objetos que vemos. En cambio, tanto el sonido como las ondas gravitatorias se producen por el movimiento en conjunto de todo un cuerpo, por ejemplo, la membrana de un tambor en un caso, o una estrella de neutrones o un agujero negro en el otro.

Esto es muy importante. Si podemos apreciar los detalles y contornos definidos de lo que hay a nuestro alrededor, es porque la luz proviene de una escala atómica mucho más pequeña que el tamaño de los objetos que observamos. En cambio, el sonido no nos permite esa precisión fotográfica, no distinguimos formas ni perfiles cuando oímos. Sin embargo, gracias al sonido podemos saber quién nos habla y qué le ocurre, aunque no lo veamos.

Lo que esto significa de forma más profunda es que la dimensión característica del sonido no es tanto el espacio como el tiempo. No nos da fácilmente imágenes, sino que nos transmite historias.² Cuando miramos un cuadro o una foto, los captamos en un instante, pero las conversaciones, los relatos y la música se desarrollan en el tiempo, con sus ritmos y cadencias.

Las ondas gravitatorias no nos darán ilustraciones deslumbrantes y nítidas. En cambio, nos traerán nuevas voces, crónicas cantadas de hechos remotos, y el retumbo de tambores cósmicos lejanos.

La fuerza más débil

La gravedad es una fuerza muy débil. De hecho, es la más débil entre todas las fuerzas fundamentales de la Naturaleza, mucho más que las nucleares y las electromagnéticas. Esto nos puede chocar: ¿no es la gravedad la fuerza que notamos más directamente? Lo que aquí ocurre es que, en circunstancias normales, las fuerzas electromagnéticas se neutralizan porque tenemos tantas cargas positivas como negativas. Por ejemplo, en cada átomo las cargas de los electrones están exactamente compensadas con las de los protones del núcleo. En cambio, no existen en la naturaleza masas negativas que contrarresten la atracción de las positivas. El efecto gravitatorio de las masas siempre se suma, incluso hasta extremos catastróficos como en el colapso estelar. En cuanto a las fuerzas nucleares —aquellas que mantienen unidos los protones y

neutrones formando los núcleos atómicos, y que son las más intensas de todas las fuerzas—, no las percibimos ya que no actúan fuera del núcleo. Sin embargo, la gravedad se extiende hasta distancias cósmicas.

¿Podemos visualizar lo débil que es la gravedad? Sí, es muy sencillo: pasamos un imán unos centímetros por encima de un clavo y este se levanta inmediatamente. ¿No es esta una demostración de fuerza impresionante? El pequeño imán está venciendo la fuerza de gravedad con que *la Tierra entera* atrae el clavo. ¿Más ejemplos? Un peine cargado de electricidad estática no tiene problema en derrotar la gravedad terrestre al poner nuestro pelo de punta. El combate de fuerzas que el imán y el peine mantienen con la Tierra hace irrisoria la historia de David y Goliat: la gravedad es espectacularmente débil cuando la comparamos con la electricidad y el magnetismo.

Esta debilidad de la gravedad —que a fin de cuentas nos muestra la tremenda resistencia a la deformación que presenta el espaciotiempo— es una de las claves para entender mejor las ondas gravitatorias. Es lo que las convierte en una pesadilla, pero también en un sueño cuando queremos aprovecharlas como transmisoras de información sobre el universo.

Radiando

Al hecho de que el electromagnetismo sea tan fuerte se debe que resulte tan fácil de crear y detectar: para producir ondas electromagnéticas en abundancia nos basta con encender una bombilla, una emisora de radio, un teléfono móvil o un horno de microondas. Y percibimos estas ondas continuamente, con nuestros ojos y antenas de radio.

Producir y detectar ondas gravitatorias es, en cambio, extraordinariamente difícil. Solo las crean de forma eficiente masas inmensas moviéndose a gran velocidad. Incluso algo tan grande y pesado como un planeta girando en torno al Sol apenas las produce: la potencia de las ondas gravitatorias que radia es de tan solo unos cientos de vatios (emitimos más energía al encender las luces de casa). Se necesitan concentraciones enormes de masa, próximas a las de los agujeros negros, y movimientos muy rápidos o violentos, para que espacio y tiempo vibren intensamente.³

Sombras bajo las olas

Tan difícil como crear las ondas gravitatorias es percibirlas: veremos dentro de poco el abrumador esfuerzo científico y tecnológico que esto ha requerido. Paradójicamente, esta capacidad de las ondas gravitatorias de pasar inadvertidas es también su mayor virtud. Para detectar una onda hay que absorber su energía, detenerla, dificultar su paso. Si la fuerza que la onda transmite es intensa, entonces nos será fácil notarla, pero también lo harán otros objetos que se encuentren en el camino, y al recibirla irán amortiguándola.

Este es el gran inconveniente de la luz. Vemos fácilmente la que emite una lámpara o una estrella, mas solo cuando no haya nada interpuesto que la absorba antes. Una simple hoja de papel ya nos tapa la visión. A escalas cósmicas, el tenue polvo interestelar basta para ocultarnos buena parte de nuestra galaxia. Y mirando más lejos, más atrás en el tiempo, hacia la luz primigenia del Big Bang, nuestras antenas y telescopios topan con un límite. Durante sus primeros 300.000 años de vida, el universo fue opaco al paso de la luz. Las imágenes más antiguas que podemos obtener nos lo muestran tal como era en ese momento. Solo después de ese período pudo ya la luz circular libremente. Lo que conocemos del aspecto anterior del universo lo sabemos de manera indirecta.

Con las ondas gravitatorias es muy distinto. Una vez emitidas, apenas nada detiene su viaje: el universo entero les es prácticamente transparente. Su endiablada indetectabilidad se transforma así —si conseguimos superarla con nuestros aparatos más sensibles— en una cualidad única. En su sigiloso viaje por el espacio, las ondas gravitatorias llevan información directa, apenas distorsionada, de los fenómenos más remotos del universo. Potencialmente, incluso del Origen mismo.

Si el universo fuese una persona, diríamos que hasta ahora solo tenemos fotografías suyas posteriores al parto —el momento de, efectivamente, dar a luz—. Mediante las ondas gravitatorias, de nuevo análogas al sonido, podremos realizar una ecografía cósmica y adentrarnos en la oscuridad de su gestación, en sus primeros instantes.

Tan solo necesitamos un instrumento capaz de registrar la llegada de estas ondas. Capaz de oír el rumor de las olas del universo.

El ruido y la furia

La tintinabulación es un área en la que a veces me adentro cuando busco respuestas.¹

ARVO PÄRT

«Es precisamente como lo había anticipado Joe Weber.»

La audiencia asentía sonriendo amablemente a las palabras de Virginia Trimble. La astrónoma, sentada en primera fila, intervenía con voz suave durante el turno de preguntas de una de las charlas más esperadas en la multitudinaria «Conferencia internacional sobre relatividad general y ondas gravitatorias», que se celebró en Nueva York en el caluroso mes de julio de 2016. La atmósfera entre los participantes era de celebración, con la euforia consciente de vivir un momento histórico. Apenas seis meses antes se había anunciado la Gran Detección: las ondas gravitatorias que Einstein había predicho hacía un siglo por fin se habían manifestado. Joseph Weber había sido el pionero del campo, el primero que lo creyó posible.²

Trimble, la viuda de Weber —éste falleció en el año 2000—, velaba para que no faltase un reconocimiento al fundador de esa nueva astronomía. Nadie se lo negó, pero muchos dudaban de que ese homenaje se hubiese podido realizar en presencia de Weber. Él jamás quiso asumir el papel de venerable precursor en la protohistoria de su disciplina. Eso habría supuesto una admisión de derrota, inaceptable para quien siempre había aspirado al premio máximo: debía ser reconocido como el genuino descubridor de las ondas gravitatorias. En 1969 había proclamado su primera detección, a la que seguirían otras, prolongadas durante más de una década. Aquel primer anuncio fue también el comienzo de una historia de ruido y de furia. De furia, la

reacción dolida y frustrada de Weber al constatar que los demás científicos le negaban el crédito que él creía suyo por justicia. Y de ruido, porque el veredicto de sus colegas había sido claro: lo que Weber había detectado en un experimento tras otro no era más que eso. Solo ruido.

Weber

Joseph Weber era un espléndido ejemplo de esos descendientes de judíos europeos emigrados a Estados Unidos que, fascinados desde su infancia por la ciencia y la tecnología, contribuyeron decisivamente a que su país tomara la vanguardia de los avances del siglo XX. Fibroso, de mirada centelleante e inteligencia rápida, estudió ingeniería electrónica y sirvió en la marina durante la Segunda Guerra Mundial. Tras sobrevivir al hundimiento del portaaviones Lexington y participar en el desembarco aliado en Italia, al finalizar la guerra se incorporó a la Universidad de Maryland. Allí, su imparable imaginación e inventiva lo llevaron a desarrollar algunos de los antecedentes del láser. Llegó, de hecho, a ser nominado al premio Nobel por ello, pero —en el primero de los que él percibiría como una sucesión de injustos agravios— fue finalmente apartado a un lado. Sea como fuere, ya había identificado otras posibilidades de dejar su huella realizando un avance fundamental.

Ningún sueño lo sedujo más que el de ser el primer hombre que sintiese vibrar el espaciotiempo.

El despertar

Las ondas gravitatorias fascinaron a Weber en la época en que las ecuaciones de Einstein despertaban tras un letargo de más de dos décadas. El papel del príncipe encantador lo jugaron en buena parte dos conferencias que, en 1955 y 1957, reavivaron la teoría, quizás no profundamente dormida, pero sí bastante somnolienta. Hoy en día se las denomina «GR0» y «GR1», las primeras en la serie de conferencias «GR» (*General Relativity*) que desde 1959 se celebran cada tres años, hasta llegar a la que hemos mencionado antes, GR21 en Nueva York en 2016, seguida de GR22 en Valencia en 2019.

La conferencia GR1, en Chapel Hill (EE.UU.), fue especialmente importante para el despegue de la ciencia de las ondas gravitatorias. La confusión inicial sobre la realidad física de estas, compartida temporalmente por Einstein, todavía no se había disipado. Podríamos pensar que, si todo sigue al espaciotiempo en sus vibraciones, ¿no será tal vez imposible notar ningún cambio? Durante esa conferencia, varios físicos convencieron a la mayoría de sus colegas de que las ondas gravitatorias pueden dar lugar a efectos indiscutibles, tales como un leve calentamiento de objetos a su paso. Es decir, las ondas gravitatorias pueden transmitir energía.

El argumento no es complicado, y fue planteado en diferentes variantes como un experimento mental, muy idealizado, por Hermann Bondi y Richard Feynman entre otros.

Tomemos una barra de acero con dos anillas de madera insertadas en ella, como en una barra de cortina. Las anillas pueden deslizarse a lo largo de la barra con una ligera fricción, no tan alta como para impedirles moverse, pero tampoco nula. Al paso de una onda gravitatoria, la barra apenas se altera, ya que es muy rígida y resiste la débil vibración de la geometría. Las anillas de madera, en cambio, se mueven mucho más libremente, y la onda hace que se acerquen y alejen entre sí. Al desplazarse rozan contra la barra metálica, y este frotamiento produce un ligerísimo calentamiento. La energía calorífica que aquí se genera ha de proceder de la energía que transporta la onda.

En la actualidad no hay ningún detector de ondas gravitatorias basado en esta idea: el propósito del experimento mental no es más que convencernos de que algo concreto ocurre al paso de la onda.

Nada hay más real para un físico que la capacidad de almacenar y transferir energía, por muy pequeña que sea: estas ondas eran genuinas, y por tanto, en principio, detectables.

El físico teórico quedaba así persuadido de la existencia de las ondas. Pero verlas en acción, no en un experimento ideal sino en uno real, era un reto inmensamente más complejo.

Posesión

Joe Weber había participado en los debates de la conferencia de Chapel Hill. El desafío de llevar los experimentos mentales hasta la práctica lo cautivó: «Planificar la construcción de un aparato que pudiese capturar un concepto tan abstruso [la cambiante curvatura del espaciotiempo] en un registro de bolígrafo y tinta, me resultaba extremadamente excitante». ³

Las ecuaciones de Einstein habían poseído su mente, y él sería el médium que las haría manifestarse en sus temblores oscilantes. Sin esa determinación absoluta no cabía imaginar que se pudiesen superar las dificultades. Apenas se sabía qué fenómenos cósmicos podrían ser tan violentos como para producir señales suficientemente intensas: ¿quizás el colapso, poco comprendido en aquella época, de una estrella que se convierte en supernova? ¿O la colisión de dos (hipotéticas) estrellas de neutrones?

Ni tampoco se tenía idea de a qué distancias podían ocurrir esos sucesos: ¿en nuestra galaxia, o quizás en galaxias lejanas?

Ni mucho menos, con qué frecuencia lo harían: ¿diariamente o solo una vez cada mil años?

Para colmo, apenas existían cálculos mínimamente precisos del tipo de señal que se podría recibir: ¿qué frecuencia y qué patrón de oscilación tendría la onda? Sin saber esto, ¿cómo se podría identificar su origen?

Sin duda, una empresa descabellada. Pero mediante consideraciones muy crudas, Weber podía llegar, de manera optimista, a creer posible medir algún fenómeno tan potente que produjese, en un detector en la Tierra, vibraciones ligeramente superiores a unas milésimas del tamaño del núcleo atómico. Esto era suficiente para él.

Tintinnabuli

La analogía sonora de las ondas gravitatorias sugería una manera de detectar esas oscilaciones. Un diapason bien afinado resuena con enorme sensibilidad al recibir el sonido de una nota determinada. Weber imaginó colosales diapasones que tintinearían al sentir la música del espaciotiempo.

En realidad, los detectores que Weber fabricó desde principios de los años sesenta se asemejaban más a xilófonos (o metalófonos) que a diapasones: eran cilindros macizos de aluminio puro, de unos dos metros de largo y un metro de diámetro. Las «barras de Weber», el nombre por el que se las conoce, resonarían cantarinas al paso de ondas gravitatorias de una frecuencia específica.⁴ Su tintineo sería registrado por delicados sensores de cristal pegados a la barra.

El problema era que, de hecho, las barras vibraban con todo lo que hubiese a su alrededor. Weber las suspendía horizontalmente mediante cables que les permitiesen moverse lo más libremente posible. Diseñó mecanismos de amortiguación que las aislasen al máximo de todos los temblores del entorno, en particular de los más leves estremecimientos sísmicos, una de las pesadillas recurrentes en la detección de ondas gravitatorias. Pero también los propios circuitos eléctricos de los aparatos de registro, incluso la agitación térmica de los átomos de las barras y los sensores, inducían señales aleatorias confusas —ruidos de fondo— que amenazaban con enmascarar cualquier señal auténtica.

Por ello, Weber construyó varias de estas barras, alejadas hasta mil kilómetros, para operar con ellas simultáneamente. El paso por la Tierra de una onda gravitatoria las haría vibrar de manera concertada, permitiendo así descartar aquellas señales fortuitas que las afectasen individualmente.

Poco a poco fue creciendo en Weber la sensación de hallarse a las puertas de un descubrimiento histórico.

Señales del cielo

En 1969 lo dijo sin reparos: sus barras habían detectado —en crucial coincidencia entre ellas— una serie de señales que parecían provenir del centro de la Vía Láctea. Si sus mediciones eran correctas, la potencia radiada había de ser descomunal: una energía equivalente a la aniquilación completa de miles, quizás millones de soles cada año, un holocausto cósmico nunca antes visto, ni tan siquiera imaginado. De hecho, con ese ritmo de destrucción la galaxia no podría haber existido ni una fracción de su vida.

La comunidad científica reaccionó con la mezcla de genuino interés y escepticismo que suscita un descubrimiento tan insólito como potencialmente sensacional. Los especialistas en la teoría de la relatividad citaban con esperanzada cautela las publicaciones de Weber. Desde Cambridge, un brillante joven de trágica figura, Stephen Hawking, motivaba uno de sus resultados más importantes sobre la teoría de agujeros negros describiendo el hallazgo de Weber.⁵

Pero a las referencias a este «extraordinario descubrimiento» seguía siempre la apostilla «si se confirma». Weber se sentía decepcionado. ¿Acaso no era evidente el sumo cuidado con que había realizado su experimento?

En la opinión de Weber un detector de ondas gravitatorias no era muy diferente de otros aparatos de medida, tales como un telescopio. Quizás fuera un instrumento difícil de construir, pero una vez en funcionamiento no debería haber duda de si con él se había visto algo o no. Sobre este punto discrepaban sus colegas. La observación no era un hecho pasivo: involucraba de manera esencial la interpretación de la señal percibida. Y esta era extraordinariamente difícil de distinguir, asfixiada como estaba por el incesante ruido de fondo.

Aislamiento sonoro

Como científico, Weber sabía que debía esperar a que otros confirmasen su descubrimiento. Pero pronto comenzaron a surgir dudas, en especial sobre su análisis de los datos. Había indicios de que Weber, probablemente de manera inconsciente, había seleccionado aquellos resultados que mejor confirmaban sus expectativas y descartado los que no se ajustaban a ellas. La historia de la ciencia experimental se podría narrar como el intento de controlar y reducir este sesgo tan humano.

Weber, impaciente, se puso a la defensiva, pero también inventó ingeniosas y más fiables técnicas de análisis de datos que permitiesen acallar definitivamente las críticas. Para su desgracia, cometió algunos errores garrafales cuya importancia intentó minimizar e incluso negar.⁶ Cuanto más se

empecinaba, más crecía el escepticismo de sus colegas, inicialmente receptivos, pero ahora cada vez más enojados por la actitud agresivamente rígida de Weber.

A comienzos de los setenta, otros físicos, espoleados por los provocadores anuncios de Weber, construyeron y operaron detectores de ondas gravitatorias similares a sus barras. De estos no salió más que ruido. En su exasperación, Weber llegó a sugerir que, dada la extrema dificultad de las mediciones, únicamente sus aparatos —y quizás tan solo manejados por él mismo— eran capaces de extraer la señal clave.

Cada vez más enrocado, Weber comenzó a perder rápidamente sus apoyos. Uno de sus principales partidarios le escribió: «He contemplado con miedo y angustia la ruina de nuestras esperanzas», al tiempo que le exhortaba a salvar su integridad científica admitiendo el fracaso.⁷ Weber ignoró el consejo y se aisló aún más. A finales de los años setenta ya apenas nadie prestaba atención a sus anuncios. En los años ochenta, los organismos oficiales dejaron de financiar sus experimentos para centrarse en el desarrollo de un aparato muy diferente a sus barras, el observatorio interferométrico LIGO.

En sus últimos años de vida, Weber se convirtió en una presencia incómoda en las conferencias sobre relatividad general. Muchos de sus colegas, lejos de requerir su humillación por los errores pasados, esperaban verlo aceptar de buena gana el papel de «tío Joe, el fundador del campo». Nunca les dio ese gusto. Hasta su muerte a los 81 años de edad, al comienzo del nuevo milenio, siguió convencido de haber sido el primer hombre en observar los temblores del espacio y el tiempo.

Hoy en día, una de las barras de Weber se expone como pieza de museo en el laboratorio LIGO en Hanford. En uno de esos giros irónicos de la historia, fue este detector el que enterró definitivamente la posibilidad de que las barras de Weber hubiesen podido oír una señal real. De haber sido así, hace años que LIGO la habría percibido. Pero durante ese tiempo no encontró más que ruido.

Humano, demasiado humano

Weber queda en la historia como un personaje de tragedia, un visionario que se anticipó fatídicamente a su época. Imaginó a su alcance algo cuya culminación no llegaría hasta medio siglo después, y esto con recursos impensables para él y mediante el trabajo de más de mil personas.

Su legado al campo que creó es dispar en todas sus facetas. Solemos pensar en los avances de la ciencia como elementos de conocimiento puro e impersonal. Pero a veces la contribución más importante de un científico es de carácter anímico y social, algo profundamente humano: el derribo de barreras psicológicas. Todos los que entraron en este campo en sus comienzos reconocen el poderoso acicate de los anuncios de Weber. Sin su visión temeraria y espléndida, sin su entusiasmo y su excitante provocación, la astronomía de ondas gravitatorias habría carecido durante años del impulso para despegar. La tarea de la ciencia es imposible —de hecho, pierde sentido— despojada de la emoción humana.

Pero si bien Weber abrió un nuevo campo tumbando una barrera mental, después fue incapaz de superar otra: la admisión de su error. Con ello originó una versión ambigua de la fábula del pastor mentiroso y el lobo. Su prolongada historia de detecciones nunca confirmadas tiñó de una reputación dudosa mucha de la investigación en ondas gravitatorias. Durante, largos años fue injustamente vista como una labor interesante pero en manos quizá no tan fiables como sería de desear. El campo sufrió en especial de un innmercido desdén por comparación con la emperatriz de las ciencias fundamentales, la física de partículas de altas energías. Como consecuencia, la sombra del fundador pesaba ominosamente en las decisiones sobre el momento y la manera en que LIGO debería anunciar su primera detección: los estándares habrían de ser al menos tan altos como los de la disciplina más exigente. En una especie de tributo inverso a Weber, la evidencia que finalmente LIGO presentó fue impecable e incontestable.

Humanos somos. Virginia Trimble sintió una emoción fuerte y compleja al recibir la noticia de este descubrimiento, celebrado por todos aquellos que habían negado la gloria a su marido. Cuando se le pregunta si este oyó realmente las ondas gravitatorias, ella contesta: «No lo sé».⁸

15

21 ceros

A menudo oigo música en el corazón del ruido.¹

GEORGE GERSHWIN

Este era el reto para Rai Weiss y Kip Thorne:

0,000 000 000 000 000 000 00X

Había que extraer ese decimal oculto tras la hilera de 21 ceros. Estos provenían de sus estimaciones para la amplitud de las ondas gravitatorias que su detector —entonces todavía poco más que un sueño— habría de llegar a medir.

Corría el año 1975, y la astrofísica había progresado mucho desde los tiempos en que Weber, con un desconocimiento casi absoluto acerca de los fenómenos que podrían emitir esas ondas, lanzó su programa pionero. Ahora, en cambio, las estrellas de neutrones se tenían ya por una realidad. Para muchos astrónomos, los agujeros negros —las más puras criaturas de las ecuaciones de Einstein— no eran más que otra fantasía de los físicos teóricos, pero para quienes trabajaban en la detección de ondas gravitatorias constituían una posibilidad fascinante. Los violentos choques entre estos objetos habían de ser una fuente intensa de vibraciones del espaciotiempo, de esa elusiva radiación gravitatoria. Es cierto que eran muy altas las incertidumbres sobre cuántas de tales colisiones cabía esperar y la distancia a la que ocurrirían. Pero al menos Weiss y Thorne tenían un número creíble al que aferrarse como su objetivo.*

Gotas en el océano

Cuando una onda gravitatoria con esa amplitud llegase a la Tierra, su paso haría que los kilométricos brazos del detector que Weiss y Thorne proyectaban se estirasen y encogiesen minúsculamente: tan solo una milésima parte del tamaño de un núcleo atómico. La ínfima magnitud de este desplazamiento es el número que yace tras los 21 ceros. Detectarlo es comparable a vaciar una jarra de agua en los océanos y medir cómo ha variado el nivel del mar, controlando, entre muchos otros factores, el oleaje incesante.

Con sus barras resonantes, Weber podía llegar a extraer un número escondido detrás de hasta 16 ceros, lo que es equivalente a medir el cambio en el nivel del agua tras vaciar la jarra en uno de los pantanos más grandes del mundo. Algo ciertamente impresionante, pero para desgracia de Weber, todavía insuficiente.

La idea que perseguía Weiss, ya antes de conocer a Thorne, requería un diseño de detector totalmente diferente, impulsado por avances técnicos recientes, en particular el gran desarrollo de la tecnología del láser. Con ello parecía verosímil llegar, si bien con mucho esfuerzo, al decimal número 21.

Suena la música

Estos nuevos detectores, denominados interferómetros de láser, serán los protagonistas del siguiente capítulo. Pero podemos adelantar algunas de sus diferencias respecto a las barras de Weber. En lugar de resonar como diapasones, los interferómetros miden cómo cambia la separación entre dos masas colgadas como péndulos que se mueven cuando entre ellas pasa una onda gravitatoria (la medida se hace con una luz láser que viaja entre ambos objetos). Por tanto, reaccionan de forma distinta al oír la música gravitatoria: si las barras de Weber se unen a cantar la melodía, los interferómetros bailan siguiendo su compás.

Además, mientras que un diapasón no vibra más que al recibir sonidos del mismo tono al que está afinado, tanto los micrófonos (y nuestros oídos) como los interferómetros permiten captar un rango amplio del espectro de frecuencias, desde tonos graves hasta agudos. En lugar de oír tan solo una barra de xilófono, los interferómetros permiten percibir la orquesta completa.

El corazón del ruido

Weiss no era el primero en proponer un interferómetro como instrumento de detección de ondas gravitatorias. La idea había sido planteada años antes por al menos dos grupos en la Unión Soviética. De hecho, parece que también el propio Weber la había sugerido. Pero a Weiss, quien la concibió independientemente, le corresponde el mérito de creer realmente en ella y estudiarla con tal grado de detalle que la situaba en la antesala de lo factible.

En una obra maestra del análisis de las dificultades que afrontará un experimento, Weiss rastreó y caracterizó exhaustivamente los distintos efectos indeseados que podrían ahogar la señal a detectar. Es decir, mostró cómo extraer la singular música de las ondas gravitatorias del interior del corazón del ruido.²

La enumeración de los distintos ruidos (es decir, fluctuaciones en la señal aleatorias e incontrolables) que Weiss estudió desafía la credulidad. Tuvo en cuenta los ruidos de: la amplitud, la frecuencia y la potencia de la luz láser; las vibraciones por la agitación térmica (microscópica) de los componentes del detector; las vibraciones sísmicas (no solo microterremotos: también el efecto rítmico de las olas que golpean las costas del continente); los posibles impactos de rayos cósmicos (radiación que cae constantemente sobre toda la Tierra); las variaciones en el campo gravitatorio que crean la atmósfera, el suelo y todas las distribuciones cambiantes de masa que rodean al detector; y los campos eléctricos y magnéticos causados por tormentas geomagnéticas.

Tras entender las características de cada ruido, Weiss propuso estrategias para suprimirlos, reducirlos o aislarlos, y para maximizar la señal a detectar.

Conclusión: se podía bucear bajo 21 decimales dominados por ruido, y de ahí extraer la cifra preciosa en su fondo.

Todavía el detector no tenía nombre, pero la concepción de LIGO se puede trazar hasta su origen en este informe.

Tomando el pulso

Mientras tanto, las ondas gravitatorias estaban revelándose de una manera muy distinta, indirecta, a través de las ondas de radio que recibía la gigantesca antena de Arecibo en Puerto Rico. En 1974, Joseph Taylor y su estudiante Russell Hulse³ observaban un sistema binario de púlsares,⁴ estrellas de neutrones que emiten pulsos rítmicos de radio mientras orbitan una en torno a otra. Lo habían descubierto recientemente, pero era posible ver que iba perdiendo energía, lo que hacía que ambas estrellas se fuesen acercando entre sí, con mucha lentitud pero sin dejar lugar a dudas. La pérdida de energía correspondía de forma exacta a los cálculos teóricos de emisión de ondas gravitatorias en la teoría de Einstein (las ecuaciones también predicen que la órbita todavía tardará 300 millones de años en reducirse hasta que ambas estrellas colisionen).

Por tanto, aunque Hulse y Taylor no estaban detectando las ondas gravitatorias, su presencia se manifestaba al ver cómo dos estrellas variaban su curso al ritmo preciso que marcaba la emisión de las ondas. En 1993 recibieron el premio Nobel de Física por su descubrimiento.

Quizás esta evidencia nos parezca poco espectacular por indirecta, pero despejaba cualquier duda razonable acerca de la realidad de las oscilaciones del espaciotiempo. Ahora el reto era su detección directa.

En el calor de la noche

En una calurosa noche de verano en Washington, en 1975, Rainer Weiss y Kip Thorne unieron sus destinos para los siguientes cuarenta años. Quizás, de hecho, para la eternidad.

Habían sido convocados allí por la NASA con el fin de examinar cómo la exploración espacial podría ayudar a la relatividad y la cosmología. Esa noche, Thorne no tenía reserva de alojamiento y todos los hoteles estaban llenos. Era la primera vez que se veían en persona, pero Weiss le ofreció compartir su habitación.

Thorne, un joven pero ya reputado físico teórico experto en la teoría de Einstein, estaba interesado en impulsar un programa de experimentos sobre gravedad en su institución, el California Institute of Technology, más conocido

como Caltech. Thorne ya había examinado la interferometría como una posible técnica de detección de ondas gravitatorias, pero la había desechado casi inmediatamente. Mediante un rápido cálculo vio que no alcanzaría la precisión necesaria.

Aquella noche, Weiss y Thorne, superando la incomodidad entre desconocidos forzados a compartir su intimidad, comenzaron a hablar de sus proyectos. Thorne no sabía del programa que Weiss había comenzado en el Massachusetts Institute of Technology (MIT). No tardó en despertar su interés: quizás se había precipitado al descartar los interferómetros. Para cuando ambos se fueron a dormir, pasadas las cuatro de la madrugada, Weiss ya había convencido a Thorne de la viabilidad imbatible de la interferometría con láser.

La enorme ambición del programa solo era comparable a su dificultad — y el reto real resultaría mucho mayor y más prolongado de lo que ninguno de ellos aún sospechaba—, pero los argumentos de Weiss lo situaban dentro de lo imaginable. A partir de ese momento, Thorne se convirtió en el cerebro de la parte teórica del proyecto y en su mejor animador y propagandista.

Troika

Ambos científicos acordaron desarrollar el programa en sus respectivas instituciones. Pocos años después, Thorne consiguió fichar para Caltech a un brillante e inventivo físico experimental escocés, Ronald Drever, que desde hacía un tiempo desarrollaba en Glasgow su propio proyecto, más reducido, de detectores interferométricos de láser.

Drever era un típico ejemplo de científico puro, tan absolutamente devoto de sus magistrales experimentos como incapaz de manejarse en otras áreas más mundanas. Entre sus colegas era famoso por su manera única de concebir en imágenes lo que otros apenas podían plasmar en ecuaciones o palabras. Con los años, sería el principal responsable de muchos de los elementos esenciales para que los modernos detectores funcionen con la precisión y eficiencia requeridas.

En 1984 nació el proyecto LIGO —el acrónimo es de Weiss—⁵ como un programa con entidad y financiación propia. Weiss, Thorne y Drever proponían construir un detector interferométrico con el que hacer ciencia real, es decir, no un mero prototipo como los de otros grupos en esa época. Para ello debían fabricar al menos dos aparatos gemelos. La experiencia de Weber demostraba que un solo detector no distingue fácilmente una señal genuina del mero ruido. Nadie se convencería del descubrimiento hasta que dos detectores idénticos oyesen el mismo sonido.

Además, resultaba claro que, para alcanzar la sensibilidad necesaria, los detectores tendrían que ser muy grandes: cuanto más largos sean los brazos del interferómetro, mayor será el desplazamiento que sufran al paso de la onda. LIGO debía construirse a escala de kilómetros, un proyecto descomunal en comparación con los que Weber continuaba haciendo en laboratorios convencionales.

El comité directivo de LIGO lo formaron, naturalmente, Weiss, Thorne y Drever, coloquialmente conocidos como la Troika. No tardó en verse que LIGO nunca despegaría con esta Troika al mando. Ninguno de ellos tenía experiencia en proyectos de esta envergadura, muy diferentes a los que hasta entonces Weiss y Drever desarrollaban en sus laboratorios con equipos de pocas personas. En particular, llevar a buen término un experimento a gran escala requiere fijar su diseño en un cierto momento y comprometerse a fondo con ello. Drever era particularmente reacio a estos compromisos, y constantemente discutía alternativas y propuestas de mejoras, pese a los retrasos y desajustes de presupuesto que conllevarían. Mes tras mes, LIGO permanecía incapaz de salir del papel de los planos.

Ante esta parálisis, la Fundación Nacional de la Ciencia (NSF), la agencia encargada de financiar el proyecto, intervino para poner al mando a un único director capaz de sacar el proyecto adelante, alguien que entendiese la ciencia involucrada pero que tuviese experiencia de gestión y capacidad ejecutiva. El físico Rochus Vogt, anteriormente vicepresidente y preboste de Caltech, fue el primero en ocupar ese asiento, pero no sin crear disensiones profundas. Drever abandonó el proyecto en 1992 en medio de un gran malestar.

Tras estos cambios, Weiss y Thorne continuarían teniendo un papel muy prominente en LIGO —a ojos de toda la comunidad seguían encarnando el espíritu científico del experimento—, pero la criatura, todavía débil, ya no era solo suya.

Gran Ciencia

LIGO había de ser un proyecto de «Gran Ciencia», comparable a los de la física de partículas elementales que, desde la posguerra, habían construido con espectacular éxito las grandes catedrales de la ciencia moderna: los aceleradores de partículas del CERN, Fermilab y otros centros. Estos son proyectos de cientos o miles de millones de dólares, que involucran impresionantes obras de ingeniería civil y coordinan equipos de centenares o miles de científicos y técnicos.

Pero con Vogt, LIGO todavía no estaba funcionando así. En 1994, tras un ultimátum de la NSF, fue sustituido por Barry Barish, un talentoso físico de partículas que recientemente había aprendido en propia carne cómo *no* gestionar un experimento de Gran Ciencia, de hecho, el más faraónico de todos ellos: el Supercolisionador Superconductor, malogrado al exceder crónicamente su superexagerado superpresupuesto.

Bajo la firme y eficiente dirección de Barish, el proyecto de LIGO adquirió por fin la solidez de un gran experimento, muy alejado de la innovadora anarquía propia de los pequeños laboratorios. A finales de 1994 comenzaron las obras en el primero de los lugares elegidos para albergar los detectores: Hanford, en el estado de Washington, seguido pocos meses después por el segundo detector en Livingston, Louisiana. Ambos aparatos estarían separados por 3.000 kilómetros.

Superada su precaria y agitada infancia, LIGO daba sus primeros pasos en el camino hacia su madurez.

Colaboración

La comunidad científica no es ni mucho menos inmune a las miserias humanas, pero a menudo presenta lo que nuestra sociedad podría llegar a ser si dejase a un lado las mezquindades tribales.

Barish no quiso que LIGO fuese el proyecto exclusivo de un reducido grupo de científicos, ni siquiera del país que lo impulsó. Y no solo por ideales de generosidad internacionalista: veía que se necesitaba del talento colectivo de la comunidad científica para poder desarrollar y explotar LIGO al máximo. Por ello impulsó la creación de la Colaboración Científica LIGO (*LIGO Scientific Collaboration*, LSC), con Rainer Weiss como su primer portavoz, que en la actualidad suma, con un funcionamiento democrático, más de mil científicos en quince países. En España, el grupo de Alicia Sintes en las islas Baleares entró a formar parte de la LSC desde su comienzo.

La larga travesía

La trayectoria estaba trazada y LIGO continuaría creciendo hasta que en 2002 pudo anunciar el arranque de su funcionamiento. Durante esta primera fase, LIGO —de acuerdo con lo previsto— todavía no llegaba a la sensibilidad deseada. Tan solo era capaz de arañar la superficie bajo los primeros 20 ceros, y hubiese necesitado mucha suerte —algún fenómeno inesperado, una colisión muy cercana— para poder anunciar un descubrimiento.

Esa suerte no llegó. Muchos de entre los ajenos al experimento observaban la evolución de LIGO sin poder evitar la sospecha de que nos halláramos ante el siguiente capítulo de la embarazosa historia de Weber. ¿Llegarían alguna vez a detectarse las ondas gravitatorias de forma indiscutible? Paradójicamente, el silencio de LIGO era la mejor garantía de su éxito. El detector funcionaba de manera impecable: los científicos estaban realmente seguros de no haber oído nada —ningún anuncio en falso— y aprendían a entender la personalidad de su complejo y delicado aparato.

En 2010, siguiendo el esquema planeado por Barish, LIGO entró de nuevo al taller. Tras una reforma tan extensa como intensiva, reapareció en septiembre de 2015 bajo su nueva encarnación, «LIGO Avanzado».⁶ Ahora sí:

diez veces más sensible que su anterior avatar, LIGO Avanzado estaba listo para sondear la estructura del espaciotiempo hasta el fondo del decimal número 21 y más allá.⁷

Pero hagamos una pausa antes de continuar con el relato de lo que sucedió a continuación. Todavía no nos han presentado al protagonista como lo merece. Porque, ¿qué es LIGO y cómo consigue el milagro de los 21 ceros?

LIGO

La oscuridad no puede expulsar a la oscuridad: solo la luz puede hacerlo.

MARTIN LUTHER KING JR., *Strength to Love*

Nunca nos alejamos de la órbita de Einstein: sus investigaciones sobre las propiedades cuánticas de la radiación están en el origen de la luz láser, el elemento esencial de LIGO. Einstein descubrió que, cuando un átomo recibe luz de una frecuencia determinada, es capaz de reemitirla con las mismas características, pero amplificada. Casi medio siglo después llegaría la principal aplicación de este fenómeno: el láser, una fuente de luz intensa, muy pura — «coherente», decimos los físicos — y de un solo color. En muy poco tiempo, sus usos se ramificarían sin límite: en la industria, en la cirugía ocular, en las discotecas, hasta entrar en nuestros hogares con los CD y DVD. Devolviendo el favor a Einstein, el láser conseguiría lo que él no creyó posible: que las ondas gravitatorias se manifestasen.

Tiempo de viaje

A finales de los años sesenta, Rai Weiss enseñaba un curso sobre la teoría de la gravedad de Einstein en el MIT.¹ ¿Cómo explicaría a sus estudiantes la manera de detectar una onda gravitatoria? Weiss lo vio con claridad: pongamos un par de masas flotando libremente en el espacio y midamos el tiempo que tarda un rayo de luz en viajar entre ellas. Este tiempo cambia

cuando pasa una onda gravitatoria que hace que las masas se separen y alejen entre sí. Cuanto mayores sean las variaciones en el tiempo de viaje de la luz, mayor será la amplitud de la onda.

Este experimento idealizado es el principio básico de una extensa clase de detectores de ondas gravitatorias, incluyendo el más exitoso de todos ellos, el que el propio Weiss ideó: LIGO.

L de láser, I de interferencia

¿Cómo medir la minúscula variación del tiempo de viaje producida por una onda gravitatoria real? Aunque hoy en día existen relojes atómicos de altísima precisión, en aquella época ninguna opción era mejor que emplear la luz misma. Recordemos que la luz es una onda cuyas crestas y valles viajan a una velocidad fija. Podemos imaginar la llegada de cada cresta como un pulso rítmico «tic-tic-tic...» igual al de un reloj. Si la luz es de la alta pureza del láser, tendremos un reloj de gran exactitud.

Supongamos ahora que enviamos luz en dos direcciones perpendiculares entre sí, que serán las direcciones de los brazos del detector, hacia dos espejos colgados al final de cada brazo. Fijémonos en dos crestas de onda que salen al mismo tiempo hacia cada uno de los dos espejos. Si ambos brazos tienen la misma longitud, las dos crestas llegarán a los espejos, se reflejarán en ellos, y volverán al punto de partida ambas al mismo tiempo. Si los espejos son muy perfectos, recuperaremos así la luz con la misma intensidad con la que salió.



Dos ondas iguales que partan hacia dos espejos a la misma distancia de ambas se reflejarán y volverán al punto de partida con sus crestas en coincidencia. Las ondas se suman (interferencia constructiva): vemos un punto luminoso.



Si la distancia a los espejos es distinta, una de las ondas se retrasa respecto a la otra. Cuando se reencuentran, una cresta coincide con un valle. Las ondas se restan (interferencia destructiva): vemos un punto oscuro.

Pero ahora supongamos que los brazos no están a la misma distancia, sino que el de la derecha se encuentra a una distancia ligeramente mayor que el de la izquierda, digamos que un cuarto de longitud de onda más allá. La cresta que viaja a la derecha tardará un poco más que la otra en hacer su recorrido

(en total, ha de viajar media longitud de onda más). Cuando vuelven al punto de partida, la cresta del brazo derecho llega con retraso. Ahora una cresta coincide con un valle.

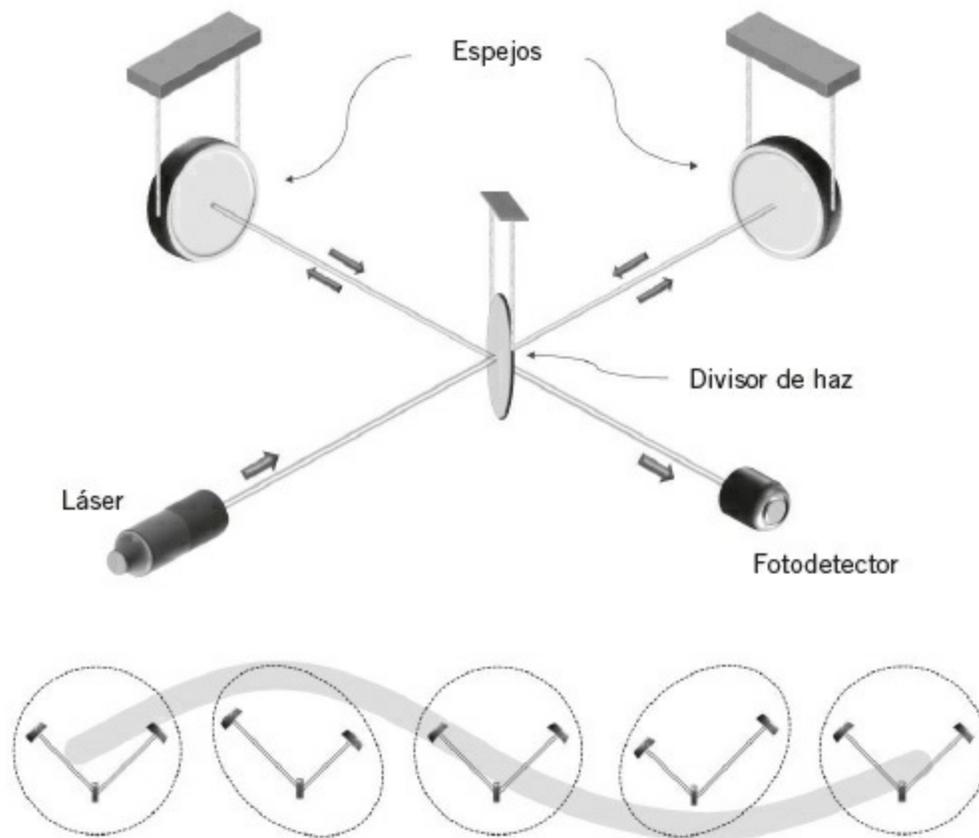
Recordemos esa propiedad básica de las ondas: la interferencia. Dos crestas de ola se suman, una cresta y un valle se restan, es decir se anulan entre sí. Luego en esta ocasión, en el centro del interferómetro los haces se anulan y en lugar de ver luz tendremos oscuridad.

G de gravedad, O de observatorio

Las variaciones en la luz que llega de vuelta² —aunque solo sean atenuaciones parciales entre dos crestas ligeramente desfasadas— son entonces una señal directa de que el tiempo de viaje de la luz ha cambiado.³ Es así como detectamos el paso de una onda gravitatoria, que estira uno de los brazos del detector al tiempo que encoge el otro. LIGO transforma las oscilaciones que crea la onda en parpadeos luminosos.

Tan solo debemos añadir un elemento más, necesario para conseguir que las crestas de onda partan exactamente al mismo tiempo de un mismo punto en direcciones perpendiculares. Se trata de un divisor de haz: un espejo semitransparente colocado a 45° de un haz entrante de luz. El espejo divide el haz en dos, un rayo reflejado y otro transmitido, que ahora viajan formando un ángulo recto. Cuando regresan al espejo semitransparente, este transmite el haz recombinado —luz u oscuridad, según haya habido un desfase o no— hacia un detector de luz.

Este diseño, extraordinariamente sensible y preciso, recibe el nombre de interferómetro de Michelson, quien lo inventó en el siglo XIX con el fin de medir la posible variación de la velocidad de la luz con el movimiento del observador (¿recordamos el problema?). La diferencia esencial entre un interferómetro convencional y LIGO es que en este último los espejos, incluido el divisor de haz, no están fijos sino que cuelgan y se balancean cuando pasa una onda gravitatoria.



LIGO mide cómo varía la distancia entre los espejos y el divisor de haz empleando luz láser para cronometrar el tiempo que tarda la luz en viajar entre ellos. Los espejos y el divisor de haz cuelgan como péndulos que se mueven libremente, y el paso de una onda gravitatoria (suplemento F) hace que la separación entre ellos varíe rítmicamente.

Las explicaciones del funcionamiento de LIGO pueden dar lugar a confusiones comunes. Por ejemplo, cuando decimos que el paso de la onda gravitatoria estira y encoge los brazos del detector, esto no significa que la onda deforme el terreno en que se asienta el detector, ni los tubos por los que viaja la luz. Tanto estos como el suelo del laboratorio y la Tierra entera son demasiado rígidos y resisten sin distorsión apreciable el paso de la onda. Lo que LIGO mide es cómo varía la distancia entre los espejos colgantes, que bailan libres al compás de la música gravitatoria que les llega.

Otra confusión frecuente se da al pensar que, si la onda gravitatoria estira la distancia entre los espejos, también estirará en la misma proporción la longitud de onda (la separación entre crestas) de la luz que circula entre ellos. Y, si la propia regla de medir que usamos se estira y encoge con la onda gravitatoria, ¿no será entonces imposible medir variación alguna?

Es cierto que la onda se estira, pero no es esto lo que LIGO mide. Tal y como hemos explicado, no determina las distancias directamente, sino que mide tiempos de viaje. Si pensamos en LIGO no como una regla de medir variable, sino como un cronómetro, desaparece la confusión.

La señal y el ruido

La sencilla esencia de este detector se reviste de numerosas capas de complejidad hasta la increíble sofisticación del aparato real que es LIGO.⁴ Pero la estrategia que se persigue es simple: maximizar la señal y reducir el ruido.

Sube el volumen

Hay dos maneras principales de aumentar la señal⁵ que sale del detector: hacer los brazos tan largos como sea posible, y tener mucha luz circulando en ellos. Cuanto mayor sea la longitud de los brazos, más los estirará la onda.⁶ Los de LIGO tienen cuatro kilómetros de longitud, pero la distancia efectiva⁷ se incrementa hasta más de mil kilómetros con espejos adicionales que hacen rebotar la luz casi trescientas veces dentro de cada brazo. Por otra parte, si el haz de luz es muy intenso, aumenta la precisión de la medida de las fluctuaciones. LIGO emplea láseres de doscientos vatios, cincuenta mil veces la potencia de un puntero láser comercial, pero todavía insuficiente. Mediante el reciclaje de la luz que circula por el detector, LIGO alcanza casi el millón de vatios, suficiente para esas armas de ciencia-ficción que vaporizan la cabeza de tus enemigos.

Busca el silencio

La mitigación del ruido en LIGO nos lleva a la suma delicadeza de un mundo rococó. Estos son solo algunos de sus elementos:

- Los espejos, de 34 centímetros de diámetro, son extremadamente reflectantes (tan solo pierden unas millonésimas de la luz que reciben), lisos hasta escalas atómicas, y muy pesados, de 40 kilogramos, para así reducir sus vibraciones. Si ni su tamaño ni su peso (ni su precio) nos disuaden de querer instalar uno de ellos en el baño, debemos saber que estos espejos son transparentes a nuestros ojos: lo que reflejan es la luz infrarroja, invisible, de los láseres de LIGO.
- Los cables que sujetan los espejos son de vidrio muy puro (sílice fundido, el mismo material de los espejos), tan solo dos veces más gruesos que un cabello. Extremadamente frágiles, vibran con un sonido muy nítido que no nos impediría

distinguir una melodía o una conversación.

- Los espejos cuelgan de un sistema de péndulos sucesivos, suspendidos de un soporte que amortigua de forma activa los movimientos sísmicos y del entorno.⁸ Así quedan aislados del ruido hasta vibraciones inferiores a un núcleo atómico. Este es el lugar más tranquilo y silencioso en toda la Tierra, mucho más que cualquier monasterio budista.
- La luz en el detector viaja en el vacío para evitar que el aire y otras partículas afecten su paso. Cuando se vaciaron los 10.000 metros cúbicos de los detectores LIGO —y la tarea duró cuarenta días—, este era el mayor volumen vacío en la Tierra. En la actualidad solo lo supera el acelerador de partículas LHC del CERN. Quizás la Naturaleza aborrezca el vacío, pero a los físicos nos fascina.

Tras mejorar la detección al máximo, todavía es necesario un tratamiento exhaustivo de los datos que salen del instrumento. Una buena parte de la preparación de LIGO consistió en entender en detalle los ruidos propios del aparato para poder restarlos de la señal final. Además, todo lo que rodea a LIGO puede afectarlo: los movimientos de los tanques de nitrógeno en la instalación, las bandas de frenado del aparcamiento, el paso de camiones por la carretera, los fuegos y la tala de árboles en los bosques próximos, el viento que zarandea los edificios, las tormentas y terremotos de todo el continente, y los rayos cósmicos que llegan a la Tierra. Esto fuerza a LIGO a un funcionamiento intermitente, y es necesario que ambos detectores estén operando al mismo tiempo para que las señales puedan ser validadas.

Finalmente, la identificación del suceso astrofísico que originó la onda requiere del trabajo de los físicos teóricos, quienes previamente deben calcular con las ecuaciones de Einstein multitud de patrones de ondas generadas por colisiones de agujeros negros, estrellas de neutrones y muchos otros fenómenos, para compararlos después con la señal observada en el detector.

Asombra que unos simios de la sabana hayamos construido algo así. Estos son los logros por los que podemos estar orgullosos de nuestra especie.

Han sido necesarios cien años, pero ya estamos listos para recibir los elusivos sonidos cósmicos. Lo que entonces se imaginó, ahora va a ser demostrado.

La primera vez

Nos hallamos en un bar de copas, repleto de gente que habla, ríe, tose y grita; en una esquina está el televisor con un partido de fútbol, en la otra hay música de baile, y por todo el bar chocan vasos y botellas, mientras en la calle los autos arrancan, suenan bocinazos, ladran los perros y pasa una ambulancia. En medio de este caos, sacamos nuestro teléfono móvil y activamos esa aplicación que es capaz de identificar una melodía. E, increíblemente, lo logra. En algún rincón del bar —no sabemos bien dónde—, una pareja se susurra al oído una canción que la une por primera vez.

Detección

Esa hora que puede llegar alguna vez fuera de toda hora, agujero en la red del tiempo.

JULIO CORTÁZAR, *Prosa del observatorio*

No sabemos cómo se han formado estos dos agujeros negros, ni cómo entraron en órbita uno en torno a otro hasta llegar al momento crucial que ahora se aproxima. Quizás ambos provengan de un sistema estelar binario en el que ambas estrellas eran tan masivas que colapsaron, primero una, luego otra, y crearon sendos agujeros negros. O puede que naciesen por separado en algún denso cúmulo de estrellas, y los encuentros azarosos en sus caminos los llevasen a formar esta pareja que danza largo tiempo en una órbita estable. Casi estable: su baile dura millones de años, pero al hacerlo radian ondas gravitatorias, inicialmente demasiado débiles para que las podamos percibir, pero que hacen que su movimiento poco a poco pierda energía y el tamaño de la órbita se reduzca progresivamente.

Imaginémoslo como si fuera una danza ejecutada en el agua, en la costa del mar, en la que dos bailarines crean olas mientras giran uno en torno a otro, ondas que se propagan lejos. Con ansiedad creciente, se aproximan entre sí cada vez más, y al hacerlo aceleran su órbita.

Ahora están ya tan próximos que el proceso se desboca y el final se acerca inevitable. La radiación gravitatoria que emiten en estos momentos es tan intensa que la podremos detectar cuando alcance la Tierra, y a partir de ella reconstruiremos los últimos instantes del baile, sus dos últimas décimas de segundo.

Fusión

El peso de estos agujeros negros es descomunal, veintinueve y treinta y seis veces el del Sol, cada uno con un horizonte de apenas un centenar de kilómetros de radio: decenas de millones de veces la masa de la Tierra en un espacio menor que una provincia. Y estas inmensas masas se desplazan en círculos vertiginosos, de apenas cuatrocientos kilómetros de radio, girando tan rápido como una batidora. Al hacerlo, su velocidad llega a dos tercios de la velocidad de la luz. ¿Nos resulta inimaginable? Todo en este espectáculo es superlativo.

Lo que sí podemos entender, ahora que estamos familiarizados con la visión geométrica de Einstein, es que semejante violencia de movimiento ha de forzar al máximo la elasticidad del espaciotiempo. Las olas que crean los bailarines son tsunamis de intensidad cósmica.¹

El final llega muy rápidamente: tras la última vuelta, en unas milésimas de segundo los agujeros negros se fusionan uno con otro. Sus horizontes, antes separados, ahora forman uno solo, y al unirse lanzan al espacio una última ola feroz, gigantesca. En esos instantes emiten energía con una potencia mayor que la de la luz de todas las estrellas del universo en su conjunto. Pero en este caso no se radia ninguna luz. La negrura es absoluta.

Lo más estremecedor de este cataclismo es que en el escenario *no hay nada*. Los agujeros negros son un puro nudo de distorsión del espacio y el tiempo, al igual que las ondas que crean. Todo es geometría, dinámica hasta el extremo, pero vacía. Los bailarines en el mar no eran sino torbellinos de agua que se funden y forman un remolino aún mayor.

Silencio

Tras la fusión, todo entrará en un silencio oscuro. Pero antes de sumergirse en la quietud, mientras alcanza su nuevo equilibrio, este nuevo agujero negro todavía vibra y emite unas últimas ondas, más débiles pero que constituyen su voz propia y nos ayudarán a identificarlo, a conocer cómo gira el nuevo torbellino y cuál es su masa: la de 62 soles.

Pero si habíamos comenzado con la masa de $36 + 29 = 65$ soles, ¿dónde está la que falta? Einstein entra con serena confianza una vez más: $E = mc^2$. La masa restante se ha transformado en energía, la que se han llevado las ondas gravitatorias. De nuevo la magnitud es inconcebible: es como si, en décimas de segundo, un millón de Tierras se hubiesen aniquilado por completo en radiación.² En hacer temblar el espaciotiempo.

Sigilo

Mientras transcurre este espectáculo, en nuestro planeta no hay más vida que bacterias y otras células individuales. Todo ocurre tan lejos que las ondas todavía tardarán 1.300 millones de años en llegar aquí. Durante ese tiempo, la onda expansiva —gravitatoria— se propaga por todo el universo, atravesando una galaxia tras otra sin apenas alterarse por el camino, tan débil es su efecto en la materia. Por ello, la información que lleva la onda, ese patrón de frecuencia y amplitud que reproduce las vibraciones que la crearon, se transmite intacto durante el trayecto.

Cuando la onda comienza a entrar en nuestra galaxia, los hombres ya habitan la Tierra, pero su tecnología de piedra sin pulir está aún muy lejos de ayudarles a explorar el misterioso cielo estrellado. Decenas de miles de años después llega a nuestro sistema solar. Ya estamos en la víspera del 14 de septiembre de 2015. Al cabo de unas horas, la ola alcanza la Tierra, a la que también atravesará sin apenas inmutarse. Mas durante su paso hace temblar de manera apenas perceptible, pero inequívoca, el conjunto de espejos colgantes de los dos detectores LIGO. El primer detector, en Louisiana, lo ha sentido siete milésimas de segundo antes que el otro, en el estado de Washington. Esto nos dice que la onda ha llegado a la Tierra por el hemisferio sur.

Tras dejar registrado su rumor, la ola se aleja para siempre, sigilosa, a la velocidad de la luz.

Ningún ser humano presencia su paso. En el laboratorio LIGO-Hanford son las 2.50 de la madrugada. Tres mil kilómetros al sureste, en LIGO-Livingston, son dos horas más. Noche cerrada, los detectores funcionan sin nadie pendiente de ellos. Las últimas personas en salir del laboratorio de Livingston, hace apenas media hora, son dos jóvenes científicos.⁴ Habían planeado realizar algunas pruebas de la sensibilidad del aparato pasando su coche por las bandas del aparcamiento —lo que podría haber inutilizado temporalmente el detector—, pero finalmente, y por casual fortuna, deciden no hacerlo e irse a dormir. No sospechan lo que ocurre mientras conducen de vuelta a casa.

En ese mismo momento son las 11.50 en Hannover, Alemania. Este 14 de septiembre de 2015, un lunes, ha comenzado como un día de trabajo ordinario en el Instituto Albert Einstein, uno de los mayores centros afiliados a la colaboración científica de LIGO. Mientras atiende una llamada de teléfono, Marco Drago, un investigador posdoctoral italiano, recibe una alerta del sistema computarizado que analiza automáticamente los datos del instrumento en busca de posibles señales. Todos los días le llega alguna —son falsas alarmas rápidamente descartables—, pero esta es mucho más llamativa de lo habitual. Ambos detectores acaban de registrar un suceso anormalmente fuerte.

Su primera sospecha —tan clara es la señal— es que se trate de una «inyección de *hardware*», una señal artificial de prueba que los investigadores introducen moviendo los espejos para ver si el sistema es capaz de detectarla.

Drago acude al despacho de un compañero y entre ambos comprueban los registros de inyección del instrumento: no hay nada. Llaman a los operadores de LIGO en los Estados Unidos: nadie trabaja ahora en los aparatos, todos se han ido a casa. A las 12.54 envían un correo electrónico a toda la colaboración: «Hola a todos, [...] se ha registrado un suceso muy interesante en la última hora [...] ¿puede alguien confirmar que no se trata de una inyección de *hardware*?».

Inmediatamente se desata la actividad en todos los laboratorios de la colaboración. Lo primero es detener los trabajos en los detectores para estudiarlos a fondo y comenzar un análisis exhaustivo de los posibles ruidos.

Rai Weiss, de vacaciones en su casa en Maine, recibe los avisos de cancelaciones de operaciones de mantenimiento y piensa que LIGO ha debido sufrir un problema serio. Pero no se trata de un problema sino de una solución,

la respuesta de la Naturaleza a aquella pregunta que se hizo ante sus estudiantes hace casi medio siglo.

Por encima de la sospecha

Una a una se van descartando todas las posibilidades de que haya sido una falsa alarma. ¿Podría haber sido otra manipulación, mucho más sutil, conocida como «inyección ciega»?⁵ Esto era un sistema diseñado para mantener a todo el equipo en alerta permanente. Cuatro personas en LIGO tenían la potestad de introducir una señal falsa, idéntica a una real, sin que lo supiese el resto de la colaboración. Estos deberían entonces ser capaces de distinguir la señal, analizarla, y concluir que, ¡por fin!, habían realizado el gran descubrimiento. Entonces, la colaboración se reuniría para abrir un sobre sellado que desvelaría la verdad: ¿señal real (¡gloria!) o falsa (de vuelta al trabajo...)? Tan perverso sistema ya se había activado años atrás, para gran decepción de quienes trabajaron durante meses siguiendo una esperanza vana.

Los miembros de la colaboración no pueden evitar su nerviosismo: ¿y si fuese otra inyección ciega? Pero en estas fechas no debería haberlas en LIGO. Hace menos de un mes que finalizó la reforma para convertirlo en LIGO Avanzado, y todavía está en período de ajustes y calibración. Según el plan, LIGO no entrará en «operaciones de ciencia» hasta dentro de cuatro días. Los responsables de las inyecciones ciegas están, por tanto, autorizados a confirmar que no han hecho ninguna. Cuando la noticia corre, resulta difícil contener la emoción: ¡es real!

También se puede descartar una intervención externa malintencionada para burlarse de los científicos. Ningún *hacker* en el mundo tiene los conocimientos de física avanzada, la experiencia con el complejísimo detector, ni el acceso a sus controles de *hardware*, como para lograrlo. Tan solo un puñado de miembros del equipo de LIGO habría podido hacerlo, y pronto se elimina esta sospecha.

Cien años de gravedad

Comienzan semanas de intensa actividad en toda la colaboración. Centenares de científicos dedican todo su tiempo a escrutar el funcionamiento del aparato, a limpiar la señal de ruidos y a interpretarla. Para el ojo entrenado es fácil ver que se trata de dos agujeros negros (suplemento H), pero se ha de ser mucho más preciso.

La portavoz de la colaboración, la argentina Gabriela González, insiste en la importancia de evitar las filtraciones. Un falso rumor puede crear interferencias, malestar y tensiones internas, o todavía peor: dañar la credibilidad del esfuerzo. Pero es imposible mantener algo así en completo secreto: en menos de dos semanas, el runrún ya circula por Twitter, creando una ola mezclada de excitación, escepticismo y cautela.

Al llegar el mes de noviembre se celebran conferencias por todo el mundo con motivo del centenario de la teoría general de la relatividad de Einstein: la comunidad entera está de cumpleaños. Las pausas para el café en esas reuniones rebullen con los rumores ya imparables: «señal muy clara», «colisión de dos agujeros negros», «mucho más masivos de lo esperado».

El día convenido para la conferencia de prensa, 11 de febrero de 2016, el mundo está alertado para el anuncio histórico. «¡Lo logramos!», comienza David Reitze, actual director de LIGO. A partir de este momento habremos de añadir la dimensión sonora al universo en que vivimos.

De todo lo visible y lo invisible

Cuéntanos una historia de antes de que pudiésemos recordar...

TERRENCE MALICK, *The tree of life*

La sala Skyline en el club de profesores de la Universidad de Columbia es el elegante escenario que la Fundación Gruber ha elegido para la cena que ofrece en honor de Weiss, Thorne, Drever y el equipo de LIGO. Les ha concedido el Premio de Cosmología de 2016, uno de los reconocimientos que reciben en anticipo de otros aún más prestigiosos. En esta cálida noche de julio, las conversaciones en las mesas se interrumpen tras los postres para que el medio centenar de científicos que asiste a la ceremonia escuche a los premiados.

Se los ve relajados entre sus colegas. Superan ampliamente la setentena, pero sigue brillando en ellos el candoroso entusiasmo de juventud que los impulsó a una empresa que algunos dirían quijotesca, pero que tiene más de la travesía de Colón, en su esperanza casi (pero no) irracional de hallar tierra. Habla primero Kip Thorne, quien nos asegura que nunca dudó del éxito de la tarea, si bien comenzaba a preocuparle no estar cuando llegase. Rai Weiss coincide: tampoco él vaciló a lo largo de esos cuarenta años, ni se sintió frustrado por las demoras. Nos cuenta que en todo momento tuvo problemas para resolver, retos que afrontar y victorias que celebrar. Como en el viaje a Ítaca de Cavafis, el camino fue largo, lleno de aventuras y experiencias, enriquecedor por sí mismo. Quizás oír esto nos suavice el reverso amargo de esta odisea: Ron Drever no está presente ya que desde hace años padece demencia. En su lugar ha venido desde Glasgow su hermano Ian, quien, muy emocionado, nos cuenta que, al menos, Ron llegó a ser consciente del descubrimiento.

Menos de un año después, en marzo de 2017, fallece Ronald Drever.

En octubre de 2017 se otorgó el premio Nobel de Física a Rainer Weiss, Kip Thorne y Barry Barish.

Interrogatorio

Volvamos al mes de diciembre de 2015. Antes incluso del anuncio oficial del primer hallazgo llega otra detección. De nuevo una colisión entre agujeros negros, de masas algo menores que las del primer suceso y a distancia similar de la Tierra. LIGO ya no es un instrumento de descubrimiento, sino el primer observatorio de la astronomía gravitatoria.

Siguen más detecciones, y cada una provoca una sucesión de artículos científicos que intentan exprimir al máximo los datos: ¿cómo se formaron esos agujeros negros? ¿Por qué tienen esas masas, esos giros, cómo han llegado a colisionar? También se cuestionan los fundamentos: ¿estamos realmente seguros de que son agujeros negros? ¿Son las ecuaciones de Einstein, y no otras, las que rigen su evolución?

Los físicos teóricos no están faltos de inventiva a la hora de proponer alternativas, otros marcos, de buscar recovecos por los que colar una idea que pueda demostrar que Einstein se equivocaba, o, más a menudo, que sus ecuaciones quizás no lo sean todo, que haya otras interacciones, otras formas de radiación y de materia hasta ahora desconocidas. De momento, todas estas «teorías de gravedad modificada» son tinglados de aspecto feo, abigarrado y antinatural en comparación con la sencillez bella, pura y austera de las ecuaciones de Einstein. Pero lo más importante es que estas últimas siguen pasando con brillantez el exigente interrogatorio de la Naturaleza.

El tercer oído

Pronto el examen se hará mucho más severo. Los trabajos de mejora continúan en LIGO para que podamos oír sonidos más lejanos y con mayor claridad. Y no solo LIGO: el interferómetro Virgo en Italia, desde hace años su hermano menor (con brazos de tres kilómetros) y compañero de colaboración, es el

primero en sumarse a una red mundial de detectores. Se necesitan tres o más de ellos para determinar con precisión en qué dirección llega una señal; lo mismo nos pasa con nuestras dos orejas: una tercera en lo alto de la cabeza nos sería de gran ayuda para distinguir desde dónde nos llaman.

Con Virgo en Pisa, con KAGRA en Japón (criogenizado y enterrado en la mina de Kamioka para reducir el ruido sísmico), con IndIGO, el tercer gemelo de LIGO en India, y con otros instrumentos por ahora en fases menos avanzadas, en pocos años la precisión de los datos hará que el primer descubrimiento, tan excitante ahora, nos parezca crudo y primitivo. Aún más: la sensibilidad creciente de los aparatos pronto nos dará nuevas detecciones cada mes, luego cada semana, y después diariamente. Llegarán a los titulares de prensa tan solo cuando nos traigan músicas radicalmente nuevas, inesperadas, o relatos de hechos excepcionales.

Quizás el más fascinante de los proyectos en desarrollo sea LISA,^{*} una espectacular versión triangular de LIGO en el espacio.¹ Sus láseres medirán los minúsculos desplazamientos entre tres masas que flotan libres mientras siguen la órbita de la Tierra en torno al Sol, separadas entre ellas millones de kilómetros. Libre de las trepidaciones sísmicas terrestres, LISA oirá infrasonidos en un rango inaccesible a LIGO. ¿Qué es lo que hallaremos ahí?

El arcoíris de la gravedad

Al igual que el espectro de ondas electromagnéticas se extiende por debajo y por encima del arcoíris de la luz visible —desde las ondas de radio hasta los rayos gamma—, las ondas gravitatorias pueden tener frecuencias muy distintas de las que perciben los interferómetros en la Tierra. Cada rango de frecuencias nos traerá información sobre fenómenos que transcurren en distintos intervalos de tiempo.

Observatorios como LIGO son excelentes para investigar lo que tarda diezmilésimas, centésimas, o hasta décimas de segundo en acontecer: los estallidos de supernovas, los rápidos giros de las estrellas de neutrones, o lo

que ya se ha oído: los últimos instantes en la fusión de dos agujeros negros con masas similares a las de las estrellas. También los choques de las estrellas de neutrones (detectados por primera vez en agosto de 2017).

Por su parte, LISA percibirá las ondas que estos agujeros negros o estrellas emiten previamente, mientras orbitan en círculo tardando segundos u horas en completar una vuelta. También presenciara los espectáculos más escalofriantes del universo: las colisiones y fusiones de dos agujeros negros supermasivos. Estas no son sino versiones de aquella colisión detectada en 2015, pero ampliadas millones de veces: ocupan un escenario millones de veces más grande, ocurren millones de veces más despacio, y liberan millones de veces más energía. Tanta como la desintegración total de billones de Tierras en apenas unos minutos.

Para escuchar la danza preliminar en órbita de estos monstruos durante meses o años se usarán otros métodos. Se trata de las redes de cronometraje de púlsares (*Pulsar Timing Arrays*, PTA), que emplean esos relojes astrofísicos naturales, los púlsares, tan precisos que permiten revelar en sus variaciones el paso de ondas gravitatorias de muy baja frecuencia. Con estas ondas esperamos oír historias sobre la formación y fusión de las galaxias en las que residen esos agujeros negros. Quizás también nos lleguen los sonidos de cuerdas cósmicas, potenciales reliquias del comienzo del universo.

El límite extremo para las ondas gravitatorias lo da, ni más ni menos, el tamaño y tiempo de vida del propio universo. Esperamos que ya desde el Origen se hayan producido ondas gravitatorias, posiblemente como resultado de fluctuaciones cuánticas del espaciotiempo primordial. Estas ondas existen en un amplísimo rango de frecuencias y quizás oigamos algunas de ellas con las redes de púlsares y con micrófonos gravitatorios como LISA. Pero a las escalas más grandes, sus señales son indirectas: son las marcas que las oscilaciones del espaciotiempo dejan en la radiación cósmica del fondo del cielo, esa reliquia del Big Bang amplificadas y enfriadas por la expansión del universo. En 2014 se creyó haber detectado esas huellas. Fue una falsa alarma, pero la búsqueda prosigue.

En la dirección opuesta del espectro, a frecuencias tan altas que escapan de LIGO, lo que pueda generar ondas gravitatorias en escalas de millonésimas de segundo o menos nos es desconocido, terreno para la especulación.

¿Agujeros negros primordiales? ¿Violentas transiciones en el universo primitivo? Por el momento ni siquiera disponemos de instrumentos que puedan detectar esas ondas.

Lo inesperado

No sabemos qué esperaba Galileo la noche en que su curiosidad lo llevó a apuntar su telescopio al cielo. Pero cuando leemos su *Sidereus Nuncius* —uno de los más maravillosos escritos de toda la ciencia— revivimos junto a él su fascinación por la inmediata sucesión de sorpresas. Una de ellas fue distinguir que esa mancha nebulosa en el cielo nocturno, la Vía Láctea, era un enorme enjambre de estrellas. Estaba muy lejos de sospechar la inmensidad de un universo con tantas galaxias como estrellas hay en cada una de ellas.

Nadie buscaba ondas de radio fuera de la Tierra cuando un ingeniero situó en el centro de nuestra galaxia el origen de unas molestas interferencias en las telecomunicaciones. En pocos años, la radioastronomía cambiaría el universo en que vivimos: a ella le debemos el Big Bang, los cuásares y púlsares, y mucho más.

Cuando, en los años sesenta, un grupo de entusiastas se propuso crear la astronomía de rayos X, muchos dudaban de su interés: la única fuente entonces conocida de esta radiación en el cielo era el Sol. Poco después se descubrieron las binarias de rayos X, que nos darían la primera evidencia indirecta de los agujeros negros. Los estallidos de rayos gamma —otros invitados inesperados— probablemente también oculten en muchos casos agujeros negros.

Entendemos la lección, ¿no es así? Antes hemos hablado de lo que esperamos de la nueva astronomía gravitatoria. Pero si la historia de la ciencia sirve de guía, también llegará lo insospechado, y sea esto lo que sea, podemos contar con que transformará nuestra imagen del cosmos.

Grande y extraño

Creo que lo más importante y misterioso que hemos descubierto sobre el universo radica en que es muy grande y muy extraño, ambas cosas en una medida apenas imaginable.

No entendemos por qué el universo es tan grande. Si acudimos a la física de partículas, esta parece decirnos que el tamaño natural del universo habría de ser microscópico. En cambio, el universo visible contiene un billón de galaxias y se extiende a casi cincuenta mil millones de años luz de distancia. Aún más: el universo no solo se expande, sino que el ritmo al que lo hace se está acelerando. Cuando se descubrió esto en 1998, la sorpresa fue mayúscula. La atracción gravitatoria de la materia debería hacer que la expansión del cosmos se frenase, al igual que una piedra lanzada al aire asciende cada vez más lentamente. Pero lo que se encontró fue tan asombroso como ver que esa piedra no cae, sino que se acelera en su subida. Las galaxias se alejan entre sí hoy más rápidamente que ayer, y menos que mañana.

La interpretación más expeditiva lo atribuye a aquella λ de Einstein, la constante cosmológica que tiene el efecto de una gravedad repulsiva. Añadida a un universo en expansión, hace que esta se acelere constantemente. Pero no sabemos si esta es la respuesta correcta. A muchos nos incomoda la introducción a mano de un parámetro inexplicado en las ecuaciones.

Contabilidad gravitatoria

No es la primera vez que recurrimos a elementos invisibles para resolver un fallo de contabilidad gravitatoria en el cosmos; la historia de la astronomía nos proporciona un ejemplo tras otro. La energía oscura² —el nuevo nombre, mucho más sugerente, para λ — es el más espectacular y enigmático de ellos, ya que ha de responder por el 70 % de la energía del universo, así de grande es el agujero en las cuentas.

Le sigue de cerca otro escándalo no menos preocupante. A lo largo del siglo XX, los astrónomos —primero, en los años treinta, el excéntrico y genial Fritz Zwicky; más adelante, y con perseverancia ejemplar, Vera Rubin, Kent Ford y otros— descubrieron que las galaxias no son suficientemente masivas

como para justificar la gravedad, atractiva en este caso, que crean. Algo falta —cerca de una cuarta parte del total de masa-energía del universo— y lo llamamos materia oscura.

No sabemos cuál es la naturaleza de estos componentes oscuros, o más apropiadamente, transparentes. De hecho, no podemos descartar que nos equivoquemos en la tesorería cósmica y, en lugar de buscar elementos ocultos, debemos cambiar nuestra manera de cuadrar los presupuestos. Es decir, modificar la teoría de la gravedad. Ya lo hizo Einstein hace un siglo, y con ello explicó el movimiento anómalo de Mercurio. La crisis gravitatoria es ahora mucho mayor que entonces y no faltan propuestas de cambio. Pero no hay una que nos convenza de despedir definitivamente al contable actual, de dejar atrás las ecuaciones de Einstein.

¿Pueden LIGO y compañía ayudarnos aquí? La visión prevalente hoy en día es que la energía y materia oscura, si existen, no habrían de emitir ondas gravitatorias en las frecuencias que pueden detectar los interferómetros terrestres. Pero ¿y si esos agujeros negros que LIGO ha oído chocar fuesen parte de la materia oscura que buscamos? ¿O si, en cambio, no hubiese energía o materia oscura y los aparentes efectos de una, de otra o de ambas fuesen en realidad debidos a una nueva gravedad? Quizás en ese caso, el espaciotiempo oscilaría de manera distinta a la predicha por Einstein, algo que nuestros aparatos podrían distinguir.

Es excitante que no conozcamos las respuestas y que podamos anticipar ese vivo diálogo entre los datos y las ideas que nos proporcionará contestaciones y, seguro, más enigmas.

Comienzos del infinito

Qué extraño resulta este universo a toda experiencia humana. Por una parte está el azar fundamental de la cuántica y su desconcertante manera de entrelazar los comportamientos de partículas distantes entre sí. Por otra parte, sabemos de esos espacios y tiempos inmensos, elásticos y vibrantes, llevados al límite en la turbadora coexistencia de la eternidad con el fin del tiempo en los agujeros negros.

Resuena en nuestra mente la exclamación alarmada de Eddington: ¿cómo pueden las leyes de la Naturaleza permitir algo tan absurdo? Sin embargo, por muy inconcebibles que nos resulten, estas no son fantasías imaginativas ni especulaciones: existen en este mismo mundo en el que transcurren nuestras vidas, y a diferencia de nosotros, parecen inevitables. ¿Por qué están ahí, para qué? Desconocemos cuál es el sentido del universo, o incluso si tiene alguno. Pero si lo hay, no podemos ignorar la enormidad de estos enigmas en la búsqueda de una respuesta.

Nos hallamos en la época en que empezamos a dominar y explotar los recursos de la cuántica. Es, tomando la expresión de David Deutsch, un «comienzo del infinito»,³ una transformación crucial en nuestra evolución hacia el futuro. Más distante aguarda otro gran comienzo de potencialidad infinita: el del control del espaciotiempo. Todavía estamos muy muy lejos de poder gobernar su geometría dinámica, de manejar la emisión de ondas gravitatorias y ralentizar el tiempo a nuestra conveniencia, de guiar la creación y evolución de los agujeros negros y modelar estructuras hechas de espacio puro.⁴ Me atrevería a asegurar que nada de esto llegará siquiera en los próximos cien años, pero cuánto me gustaría equivocarme.

Por ahora, nuestra participación en la escena del espaciotiempo es solo receptiva; acabamos de entrar en el auditorio y tomar asiento. Aprendamos de lo desconocido frente a nosotros, y mientras esperamos el momento en que podamos pasar a ser intérpretes y compositores, permitámonos disfrutar de los sonidos que nos llegan de la oscuridad cósmica.

Línea de tiempo

Hace 1.300 millones de años (aproximadamente) – En una región lejana del universo, dos agujeros negros giran rápidamente uno en torno a otro hasta fundirse en uno solo. Las ondas gravitatorias que emiten comienzan a viajar por todo el universo a la velocidad de la luz sin encontrar obstáculos. No pasarán por la Tierra hasta el 14 de septiembre de 2015.

...

1632 – Galileo Galilei, en su *Diálogo sobre los dos principales sistemas del mundo*, enuncia su principio de la relatividad del movimiento. En su posterior obra *Discursos sobre dos nuevas ciencias* (1638) argumenta la universalidad de la caída libre.

1687 – Isaac Newton publica los *Principios matemáticos de la filosofía natural*, obra descomunal que dominará la física durante más de dos siglos. El libro tercero contiene su teoría de la gravitación universal.

1865 – James Clerk Maxwell publica su teoría del electromagnetismo, que se convertirá en uno de los pilares de la ciencia y la tecnología del siglo XX. Propone que la luz es una oscilación del campo electromagnético.

1879 – Albert Einstein nace en Ulm, Alemania, el 14 de marzo.

1881 – Albert Michelson inventa el interferómetro que lleva su nombre con el fin de investigar cómo varía la velocidad de la luz con el movimiento del observador. A pesar de la alta precisión que alcanza (en especial en 1887, con Edward Morley), sus mediciones no muestran ninguna alteración en la propagación de la luz.

1887 – Heinrich Hertz verifica experimentalmente la existencia de las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell. Piensa que su descubrimiento —que será, entre otras cosas, la base de todas las telecomunicaciones modernas— carece de cualquier utilidad práctica.

- 1905** – Einstein irrumpe en el mundo de la física publicando cuatro artículos revolucionarios. En uno de ellos formula la teoría (especial) de la relatividad. Es ascendido a experto de patentes de segunda clase.
- 1907** – Einstein tiene «la idea más feliz de su vida», que lo lanza a su épica exploración acerca de la naturaleza de la gravedad, el espacio y el tiempo.
- 1915** – El 25 de noviembre Einstein anuncia la formulación definitiva de su teoría general de la relatividad. Una semana antes había mostrado cómo esta teoría describe con precisión aspectos del movimiento de los planetas que la teoría de Newton no podía explicar. En diciembre, Karl Schwarzschild descubre una solución de la teoría de Einstein que, muchos años más tarde, se entenderá que describe un agujero negro.
- 1916** – Einstein extrae de su teoría la predicción de que el movimiento de objetos masivos ha de crear ondas gravitatorias: oscilaciones del espaciotiempo.
- 1917** – Einstein inaugura el estudio de la cosmología física al aplicar su teoría de la gravedad al comportamiento del universo en su totalidad. El modelo de universo estático que propone es erróneo.
Einstein descubre (teóricamente) la emisión estimulada de radiación: el fenómeno en la base del láser.
- 1918** – Einstein, usando sus ecuaciones, calcula correctamente (salvo un factor 2) la manera en que las masas en movimiento emiten ondas gravitatorias (fórmula cuadrupolar).
- 1919** – Arthur Eddington verifica (en una observación astronómica realizada durante un eclipse) la predicción de Einstein de que la luz se desvía por la gravedad, y refuta la anterior teoría de Newton. Einstein se convierte en un icono mundial sin precedentes.
- 1929** – Edwin Hubble demuestra con sus observaciones astronómicas de la distancia y movimiento de las galaxias que el universo se expande.
- 1933** – El astrónomo Fritz Zwicky advierte que la masa visible en las galaxias no es suficiente para que su gravedad las mantenga agrupadas en cúmulos galácticos que no se disgregan. Propone la existencia de «materia

oscura» (*dunkle Materie*) que proporcione la gravedad adicional necesaria. La importancia del fenómeno resulta poco clara durante las siguientes tres décadas.

- 1936** – Einstein, con Nathan Rosen, argumenta que las ondas gravitatorias no existen. Un revisor de su artículo (Howard P. Robertson) señala su error. Einstein retorna a la visión correcta.
- 1939** – En mayo, Einstein publica un artículo en el que niega la posible existencia de agujeros negros (todavía no conocidos por ese nombre). De forma independiente, en julio Robert Oppenheimer y su estudiante Hartland Snyder envían para publicación el primer análisis, idealizado pero correcto, de cómo el colapso gravitatorio imparabile de una estrella da lugar a un agujero negro.
- 1955** – Albert Einstein fallece en Princeton (EE.UU.) el 18 de abril. Tres meses más tarde se celebra en Berna la primera conferencia internacional dedicada a las teorías de la relatividad.
- 1957** – En la segunda conferencia sobre relatividad general, en Chapel Hill (EE.UU.), se presentan argumentos a favor de la existencia real de las ondas gravitatorias, que convencen a la mayoría de la comunidad de físicos.
- 1960** – Joseph Weber comienza en la Universidad de Maryland su investigación experimental de las ondas gravitatorias mediante detectores de barras resonantes.
- Theodore Maiman construye el primer láser.
- 1962** – Los físicos soviéticos Mikhail E. Gertsenshtein y Vladislav I. Pustovoit proponen el empleo de interferómetros para la detección de ondas gravitatorias. El artículo pasa desapercibido y sus autores no continúan su desarrollo. La idea (aparentemente también ideada por Weber en 1964) es redescubierta en 1966 por otro físico soviético, Vladimir Braginsky, pero de nuevo apenas atrae atención. Los primeros prototipos los construye Robert Forward a finales de los sesenta.
- 1963** – Se descubren los primeros cuásares, fuentes compactas e intensísimas de radioondas. Hoy en día sabemos que en su centro residen agujeros negros supermasivos.

Roy Kerr halla una solución de las ecuaciones de Einstein que describe un agujero negro rotando sobre su eje.

1965 – Roger Penrose demuestra que las ecuaciones de Einstein llevan de forma natural a la formación de singularidades durante el colapso gravitatorio de la materia.

1967 – John A. Wheeler adopta el término «agujero negro» y comienza a hacerlo popular.

1969 – Weber anuncia la detección de ondas gravitatorias. Intentos posteriores de otros grupos no logran confirmar el descubrimiento. Weber continúa sus experimentos y fallece en el año 2000 sin haberse retractado.

1960-1980 – Vera Rubin y Kent Ford estudian el movimiento de rotación de las galaxias y encuentran evidencia muy fuerte de la presencia de la materia oscura que propuso Zwicky, o en su lugar, de una modificación de las leyes de la gravedad que pueda explicar los resultados.

1971 – Primera evidencia de la existencia de un agujero negro en la estrella binaria Cygnus X-1, con una masa equivalente a 15 veces la del Sol.

Donald Lynden-Bell y Martin Rees conjeturan que en el centro de la Vía Láctea podría haber un agujero negro supermasivo. En la actualidad se considera probada su existencia, con una masa 4,1 millones de veces mayor que la del Sol.

Stephen Hawking emplea las ecuaciones de Einstein para demostrar que el área del horizonte de los agujeros negros no puede disminuir. Este resultado limita la energía que se puede radiar en una colisión entre agujeros negros.

1972 – Rainer Weiss, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), propone (independientemente del precedente soviético) el método interferométrico para la detección de ondas gravitatorias. Su formidable análisis de todas las dificultades (fuentes de ruido) que habrá que solventar es fundamental para cualquier propuesta plausible de un detector de este tipo.

1974 – Los astrónomos Russell Hulse y Joseph Taylor descubren un púlsar orbitando alrededor de una estrella de neutrones. Su estudio posterior (con Joel Weisberg) revela que la distancia entre ambos está

disminuyendo debido a la emisión de radiación gravitatoria. En 1993, Hulse y Taylor reciben el premio Nobel de Física por su hallazgo.

Stephen Hawking descubre (teóricamente) que los agujeros negros pueden emitir radiación de origen cuántico.

1975 – Rainer Weiss convence a Kip Thorne de que la búsqueda de las ondas gravitatorias con detectores interferométricos es factible. Ambos lanzan programas dedicados a ello en sus respectivas instituciones (MIT y Caltech).

1979 – Ronald Drever es fichado por Caltech para su programa de interferometría láser para la detección directa de ondas gravitatorias. En la siguiente década inventará varios de sus elementos clave.

1980-1984 – La Fundación Nacional de Ciencia (NSF) destina fondos para el desarrollo de LIGO en Caltech y MIT. En 1984, ambas instituciones firman un acuerdo para avanzar conjuntamente en su diseño y construcción. El comité directivo inicial, formado por Drever, Thorne y Weiss (la Troika), carece de la experiencia requerida para llevar a cabo un proyecto a escala de «Gran Ciencia», por lo que en 1987 dará paso a otra gestión directiva más eficaz.

1990 – La NSF se compromete a financiar con 250 millones de dólares la construcción del experimento LIGO.

1994 – Comienza la construcción, bajo la dirección de Barry Barish, de las instalaciones de LIGO en Hanford (Washington) y Livingston (Louisiana). Barish dirige LIGO hasta 2005.

1995 – Empieza la construcción del detector de ondas gravitatorias GEO600 en Alemania, que se asocia con LIGO y comienza a tomar datos en 2002.

Comienza la construcción del detector TAMA300 en Japón, en el que se desarrollan técnicas para otro instrumento futuro mucho más sensible: KAGRA.

1996 – Comienza la construcción del detector Virgo en Cascina, a las afueras de Pisa en Italia.

La teoría general de la relatividad entra en nuestras vidas: el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), inicialmente restringido al ámbito militar, comienza su uso civil.

1999 – Dos equipos de astrónomos demuestran, independientemente, que el ritmo de expansión del universo está acelerándose. Sus directores recibirán el premio Nobel de Física en 2011. El efecto se puede explicar suponiendo la existencia de una misteriosa «energía oscura» que permea el universo.

1990-2000 – El modelo cosmológico « Λ CDM» (se lee «Lambda-C-D-M») se impone como la mejor explicación de la evolución del universo tras el Big Bang. De acuerdo con él, en la actualidad el universo se compone de un 69 % de energía oscura (Λ), un 27 % de materia oscura «fría» (CDM: *Cold Dark Matter*), y tan solo un 4 % de materia ordinaria visible, como la que observamos directamente.

2002 – LIGO comienza su primera fase de funcionamiento, que continúa hasta 2010 de manera muy satisfactoria, pero sin detectar todavía las ondas gravitatorias.

2007 – Primeras tomas de datos de Virgo. Los equipos de LIGO y Virgo firman un acuerdo para compartir sus datos, formando una única red mundial de detectores de ondas gravitatorias.

2010 – Se destinan 205 millones de dólares para la siguiente fase, muy mejorada en sensibilidad, de LIGO Avanzado (*Advanced LIGO*).

2014 – La película *Interstellar*, invirtiendo el proceso natural, logra que un agujero negro se convierta en una estrella (de cine).

2015 – En septiembre, LIGO Avanzado comienza su primera fase de observación. El 14 de septiembre, los dos detectores LIGO reciben una señal fuerte y clara. Comienza el análisis para confirmar que se trata de una onda gravitatoria y determinar su origen. Mientras tanto, en noviembre se celebra el centenario de la teoría de Einstein.

2016 – El 11 de febrero, el equipo de la colaboración científica LIGO-Virgo anuncia la primera detección directa de ondas gravitatorias, producidas en la fusión de dos agujeros negros hace 1.300 millones de años.

El 15 de junio de ese año, el mismo equipo anuncia una segunda detección, observada el 26 de diciembre de 2015, y de origen similar a la primera. La investigación en ondas gravitatorias pasa así de la fase de *descubrimiento* a la nueva era de *observación astronómica*.

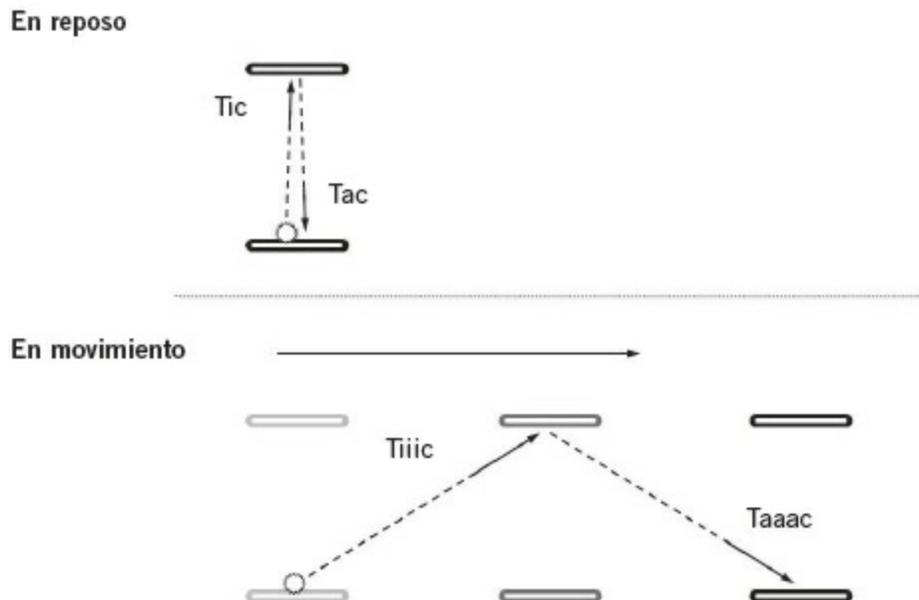
2017 – En marzo, muere Ronald Drever.

En octubre, Rainer Weiss, Kip Thorne y Barry Barish reciben el premio Nobel de Física.

Suplementos

A. Los relojes en movimiento se ralentizan

Para evitar sospechas sobre el argumento emplearemos un tipo de reloj que quizás no sea muy práctico, pero sí tan simple que no puede esconder trampas: dos espejos uno frente a otro. En uno de ellos, una bombilla emite un destello que viaja hacia el espejo opuesto y se refleja en él. Dado que sabemos a qué velocidad viaja la luz, si conocemos la distancia entre los espejos, este mecanismo marca su tictac con regularidad precisa: es el tiempo que tarda el destello en hacer su viaje de ida y vuelta.

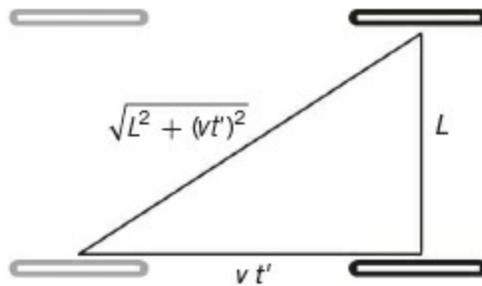


Supongamos ahora que observamos el tictac de un reloj idéntico al anterior, pero respecto al que nos estamos moviendo horizontalmente o, de manera equivalente, el reloj se mueve mientras nosotros permanecemos quietos. En este caso veremos que el rayo de luz ha de recorrer una distancia mayor hasta reflejarse en los espejos. Y dado que la velocidad de la luz nunca cambia, ahora el destello tardará más tiempo en hacer su trayecto. Es decir, el reloj en movimiento marchará más lentamente que otro reloj que llevemos con nosotros —a pesar de que ambos

relojes estén contruidos de la misma manera y su mecanismo de funcionamiento sea idéntico—. Notemos que, una vez más, es la constancia absoluta de la velocidad de la luz la que nos fuerza a esta conclusión.

¿Nos parece extraño esto? Lo es aún más cuando tenemos en cuenta lo que nos dice el principio de relatividad: el dueño del reloj que se mueve y viaja con él dirá que es nuestro reloj (que él ve moverse) el que retrasa respecto al suyo. Y él tiene tanta razón como nosotros.

Si no tenemos miedo a un poco de álgebra, no nos será muy difícil obtener el ritmo de retraso de un reloj que viaja a una velocidad v . Supongamos que la distancia entre los dos espejos es L . La duración de un tic del reloj que va con nosotros (el tac dura lo mismo) es el tiempo que tarda la luz, viajando a la velocidad c , en recorrer esa distancia: $t = L / c$. O lo que es lo mismo, $L = ct$.



Llamemos ahora t' al tiempo que vemos que tarda en hacer **tic** el reloj que se mueve. Durante este tiempo, ese reloj se desplaza una distancia horizontal vt' . Aplicando el teorema de Pitágoras calculamos que la distancia que recorre el rayo de luz es $\sqrt{L^2 + (vt')^2}$. Dado que la luz, viajando a la velocidad c (siempre la misma), recorre esta distancia en el tiempo t' , se tendrá que cumplir que

$$ct' = \sqrt{L^2 + (vt')^2}$$

Ahora sustituimos aquí nuestro anterior resultado $L = ct$. Con un poco de manipulación algebraica despejamos la duración t' de un tic del reloj en movimiento, y la expresamos en términos del intervalo de un tic t del reloj en reposo. Así obtenemos que

$$t' = t \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

Esta sencilla ecuación tiene una importancia central en la teoría de la relatividad. Para ilustrarla, supongamos que la velocidad del reloj es de 240.000 kilómetros por segundo, es decir, tres quintos de la velocidad de la luz. En este caso $\sqrt{1 - (3/5)^2} = 4/5$, luego $t' = 4/5 t$. Por tanto, en el tiempo en que nuestro reloj hace tic cinco veces, el reloj que se mueve lo hace solo cuatro veces. Los relojes en movimiento marchan más lentamente.

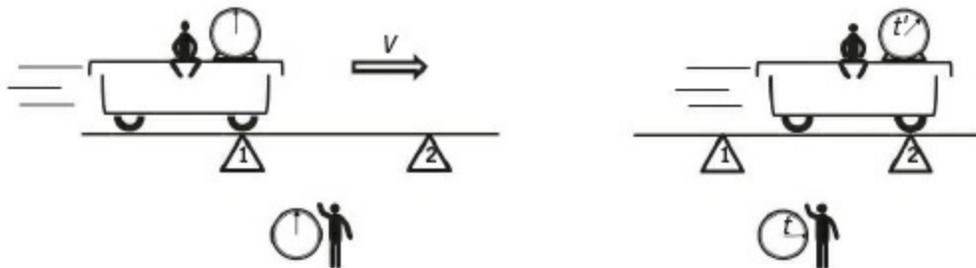
En el capítulo 6 contamos cómo los satélites del GPS viajan a 14.000 kilómetros por hora respecto a nosotros en la superficie terrestre. La fórmula de arriba nos permite hallar que si t' es igual a un minuto, entonces la diferencia entre t y t' es en este caso de 5 milmillonésimas de segundo. Es decir, por efecto de su velocidad, los relojes en los satélites retrasan 5 nanosegundos cada minuto.

B. El movimiento contrae las distancias

Queremos comparar la distancia entre dos traviesas de la vía, tal y como la miden nuestros amigos en tierra, con la distancia que medimos nosotros desde el tren. Ellos pueden determinar esa distancia fácilmente con sus reglas de medir. Pero nosotros, en el tren que se mueve, debemos explicar con más cuidado cómo vamos a realizar nuestra medida. Utilizaremos un reloj para ello.

Está claro que cuanto más tiempo tardemos en atravesar los dos puntos, mayor habrá de ser la distancia entre ellos. Si conocemos la velocidad a la que viaja el tren, podemos medir la distancia cronometrando el tiempo que nos lleva pasar entre las dos traviesas; basta con que multipliquemos la velocidad del tren por el tiempo de paso.

Para comparar las medidas pediremos a nuestros amigos en tierra que también cronometren el tiempo de paso. Ahora bien, sabemos que nuestro reloj en el tren y el reloj del andén, aunque sean idénticos, marchan a ritmos diferentes. Por tanto, unos y otros obtendremos valores distintos para ese tiempo de paso y, como consecuencia, también para la distancia recorrida. De hecho, hemos visto que el reloj en movimiento marcha más lento que el reloj quieto en la vía. A menor tiempo, menor distancia: la separación medida desde el tren será menor que la medida en tierra. Es decir, el movimiento contrae las distancias.



El reloj del tren, que marcha a velocidad t' , marca un tiempo para el intervalo de paso entre las traviesas del tren (1 y 2). Debido a la ralentización por su movimiento, este tiempo es menor que el tiempo t que marca el reloj de la vía. Por tanto, la separación entre traviesas medida desde el tren, $L' = vt'$, es menor que la medida junto a la vía, $L = vt$.

Podemos obtener el valor preciso para esta contracción relativista de las longitudes si repasamos el argumento usando los resultados del suplemento A.

Comenzamos con nuestros amigos en tierra. Dado que para ellos las traviesas están en reposo, no tienen problema en medir su separación directamente con una vara de medir. Supongamos que obtienen un resultado de L metros. Cuando el tren pasa frente a ellos, miden con su reloj el tiempo t que tarda en recorrer la distancia entre las traviesas. Así determinan que el tren marcha a velocidad $v = L / t$.

De acuerdo con la relatividad, nosotros en el vagón podemos decir que las traviesas de la vía vienen a nuestro encuentro a esa misma velocidad v . Con nuestro reloj cronometramos que nuestro paso de una traviesa a otra nos lleva un tiempo t' . Entonces diremos que la distancia entre ellas es igual a $L' = v t'$.

Combinando ambos resultados tenemos que $L' = L t' / t$. Si ahora usamos la relación entre t' y t que obtuvimos en el suplemento A, deducimos que

$$L' = L \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

Esta es la expresión general que relaciona la separación L medida en reposo —lo que se conoce como la longitud propia— con la que medimos desde el vagón en movimiento, L' . Asimismo, el tiempo t es el tiempo propio de las traviesas; solo el reloj del andén está en reposo respecto a ellas.

Veamos un ejemplo. Si el tren viaja a tres quintas partes de la velocidad de la luz, entonces

$$L' = L \sqrt{1 - (3/5)^2} = 4/5 L$$

Esto es, unas traviesas que en la vía distan entre sí 50 centímetros, nos parecerá desde el vagón que están separadas tan solo 40 centímetros.

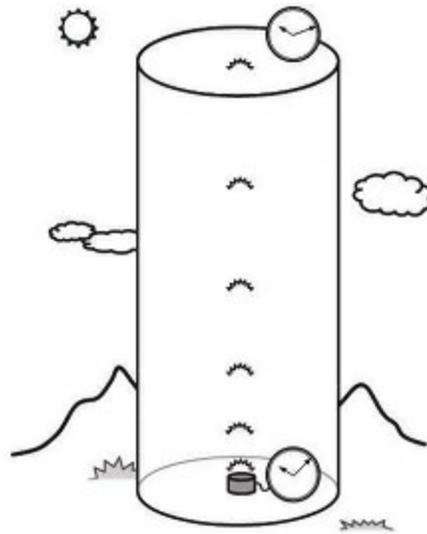
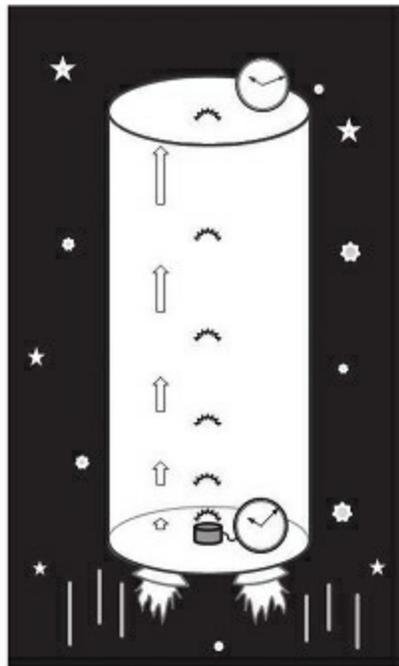
Concluimos así que cuando un objeto se mueve respecto a nosotros, su longitud en la dirección del movimiento será menor que cuando lo vemos en reposo.

C. La gravedad ralentiza el paso del tiempo

Investigaremos ahora la influencia de la gravedad sobre el paso del tiempo. Con este fin nos trasladamos a un laboratorio espacial en el que simulamos la gravedad acelerando continuamente con nuestros cohetes para producir la misma sensación de peso que en la Tierra. Tomamos dos relojes idénticos y los colocamos en el techo y en el suelo del laboratorio. Queremos comparar el ritmo al que marchan.

Para ello conectamos el reloj del suelo a una emisora de radio que, por cada tictac, emite hacia el techo una breve señal que indica la hora del reloj: las 12 en punto; las 12 y un segundo; las 12 y dos segundos...

Nos colocamos en el techo del laboratorio y medimos la llegada de las señales empleando el reloj que allí tenemos. Por supuesto, sabemos que cada señal tiene que recorrer la altura del laboratorio y emplea un tiempo en ello: esto sucede tanto si el laboratorio acelera como si no, y no es lo que nos importa aquí. El efecto más interesante está en el ritmo al que llegan las señales. Dado que el laboratorio está acelerando constantemente, mientras los pulsos de radio viajan hacia arriba, el techo del laboratorio se aleja de ellos a una velocidad cada vez mayor. Por tanto, las señales llegarán espaciadas por más de un segundo. Esto significa que nos parecerá que el reloj del suelo marcha más lentamente que el del techo. Irá retrasándose según pasa el tiempo.



Veámoslo con más cuidado: en el instante en que recibimos la primera señal proveniente del suelo «las 12 en punto» ajustamos nuestro reloj del techo para que marque esa misma hora: también las 12. Cuando después recibimos la segunda señal, la que dice «las 12 y un segundo», veremos que nuestro reloj del techo ya no marca la misma hora, sino un poco más: «las 12 y un segundo y una milbillonésima de segundo». Con la señal que dice «las 12 y dos segundos», el reloj del techo estará en «las 12 y dos segundos y dos milbillonésimas de segundo». Y así, progresivamente, el reloj del techo irá adelantándose cada vez más al del suelo.

El principio de equivalencia nos dice que lo mismo ha de ocurrir en un laboratorio en la Tierra. Es decir, si estamos en lo alto del edificio veremos que nuestro reloj marcha más rápidamente que el del suelo, cuyas señales nos llegan más espaciadas. Luego la gravedad ralentiza la marcha de los relojes.

Aquí no tenemos esa desconcertante simetría de la relatividad del movimiento uniforme, sino que todos —en el techo o en el suelo— estamos de acuerdo en que el reloj del suelo marcha más lentamente. Es fácil ver que es así. Colocamos la emisora de radio en el techo del laboratorio espacial y nos sentamos en el suelo a recibir sus señales. En este caso, el suelo del laboratorio va cada vez más rápido al encuentro de las señales, por lo que las veremos llegar con una separación menor que un segundo. Es decir, nos parecerá que el reloj del techo marca un ritmo más

rápido que el reloj que tenemos con nosotros en el suelo: es la misma conclusión que antes. Al haber una aceleración —un cambio de movimiento—, las medidas del suelo no son intercambiables con las del techo.

Notemos que si eliminamos la aceleración, el efecto desaparece. Realizar el experimento en un laboratorio que se mueva a velocidad constante es equivalente a hacerlo en reposo (aquí sí se aplica el principio de relatividad), y por tanto las señales llegan una cada segundo, sin que crezca el retraso.

No lo demostraremos aquí, pero el retraso relativo de los relojes es igual a la diferencia entre los potenciales gravitatorios en uno y otro punto. Sabiendo esto, podemos calcular la magnitud de este efecto para los satélites del GPS.

Necesitamos averiguar la diferencia de gravedad entre la superficie terrestre y el punto donde se encuentran los satélites, a 20.200 km de altura. Dado que el radio de la Tierra es de 6.300 km, los satélites orbitan en círculos de 26.500 km de radio en torno al planeta. Por otra parte, la intensidad de la gravedad que sentimos es proporcional a la masa de la Tierra. Podemos consultar el valor de esta en Wikipedia, que nos la da como un número enorme de kilogramos. Pero aquí lo haremos de una manera más sutil.

En el suplemento E explicamos que, dado que la teoría de Einstein conecta íntimamente materia y geometría, lo más natural es medir las masas en unidades de longitud: las ecuaciones se vuelven más simples si así lo hacemos, y en particular el potencial gravitatorio a una distancia dada del centro de una masa es igual a

$$\frac{\text{Masa}}{2 \text{ Distancia}}$$

Cuando usamos esas unidades, la masa de la Tierra es igual a 0,88 cm = 0,000 008 8 km (su masa es mucho menor que su tamaño: la gravedad de la Tierra no es tan fuerte!). El retraso relativo entre los relojes está dado en este caso por

$$\frac{\text{Masa Tierra}}{2} \left(\frac{1}{\text{Radio Tierra}} - \frac{1}{\text{Radio Satélite}} \right) \times 60\,000\,000\,000 \frac{\text{nanosegundos}}{\text{minuto}}$$

(esta es la diferencia entre los potenciales gravitatorios en ambos puntos, y cada minuto tiene 60.000 millones de nanosegundos). Tenemos todos los datos necesarios para introducirlos en la calculadora:

$$\frac{0,0000088}{2} \left(\frac{1}{6300} - \frac{1}{26500} \right) w \times 60000000000 = 32$$

Es decir, por efecto de la gravedad el reloj del satélite se adelanta al nuestro 32 nanosegundos cada minuto.

D. El principio de equivalencia en experimentos caseros

Entramos a un ascensor sujetando con una cuerda un globo de helio. ¿Qué sucederá cuando comencemos a bajar: se aflojará o tensará más la cuerda? Supongamos que llevamos una vela encendida. ¿Cómo se comportará la llama cuando el ascensor acelere hacia arriba o hacia abajo? Si hacemos estos experimentos mientras aceleramos en un coche, ¿hacia dónde se moverán el globo y la llama cuando arranque el vehículo?

El globo de helio pesa menos que el aire, y cuanto más fuerte sea la gravedad (real o efectiva), mayor será la diferencia de peso y más tenderá el globo a flotar y elevarse. Por tanto, cuando el ascensor comience a subir y la gravedad efectiva aumente, el globo tensará más la cuerda con la que lo sujetamos. A la inversa, cuando empecemos a bajar, la gravedad parecerá ser menor y, por tanto, la cuerda del globo se aflojará. Por el mismo argumento, al ponerse en marcha el coche, el globo se moverá hacia delante.

La llama de una vela está caliente, pesa menos que el aire que la rodea, y por ello adopta una forma que se estira hacia arriba. Cuando el ascensor acelera para subir, la diferencia de peso efectivo se hace mayor y la llama se estirará aún más.

En realidad, estos fenómenos no requieren de la relatividad de Einstein para explicarlos. La teoría de Newton también da cuenta de ellos perfectamente. La genialidad de Einstein es saber verlos de otra manera. Los reinterpreta de forma que le revelan una propiedad fundamental de la gravedad, esto es, su indistinguibilidad de un efecto de aceleración. Y después concluye que el tiempo y el espacio están curvados. ¡Guau!

Lo recordaremos cada vez que montemos en un ascensor.

E. Las ecuaciones de Einstein

La forma en que hemos presentado las ecuaciones de Einstein,

$$G = T$$

nos debería causar perplejidad. Geometría y materia son cosas completamente distintas. ¿No estaremos otra vez tratando de mezclar manzanas y peras? Es decir, si a un lado de la ecuación tenemos longitudes que medimos en metros, y al otro masas que medimos en kilos, ¿cómo pueden encajar unas con otras?

La respuesta es que para escribir estas ecuaciones empleamos unas unidades de medida adecuadas: unidades de longitud para Todo. Recordemos en primer lugar que en el espaciotiempo es posible medir el tiempo en metros, así que eso haremos. Y ahora que introducimos materia, también mediremos la masa de un cuerpo en metros. Sí, en metros. Aunque desconcierte a primera vista, la idea es muy simple (aunque inquietante): mi masa en metros es el tamaño al que habría que comprimirme para convertirme en un agujero negro.¹

Así, mi masa es de unos 0,000 000 000 000 000 000 12 milímetros negros. El que sea un número tan pequeño, mucho menor que mi estatura, significa que la gravedad que ejerzo es realmente débil: soy poco atractivo, gravitatoriamente hablando. Es decir, apenas curvo el espaciotiempo, a diferencia de lo que hace un agujero negro. Las masas de los planetas son de unos cuantos milímetros o centímetros, mientras que las estrellas tienen masas de varios kilómetros (aunque su tamaño real pueda ser de millones de kilómetros). Quizás sean unidades poco prácticas para el día a día, ya que raramente nos encontramos con agujeros negros, pero nos serán muy útiles en otros suplementos. Lo que aquí nos importa es que son absolutamente necesarias para conectar geometría y materia: ha de ser posible expresar la masa como una longitud.

Sabiendo esto ya podemos poner sin reparos el signo «igual» en la transcripción en palabras de la ecuación:

Curvatura del espaciotiempo = Movimiento y distribución de la materia

La igualdad entre los dos lados tiene sentido porque, como hemos visto, podemos expresar ambos en metros.

¿Qué nos dicen entonces estas ecuaciones? Cosas como que unas masas de tantos decímetros moviéndose durante un tiempo de tantos kilómetros crearán oscilaciones de tantos metros en la geometría. O que determinados kilómetros de curvatura del espaciotiempo harán que la distribución de la materia varíe en unos cuantos centímetros de densidad durante un tiempo de unos metros. Las ecuaciones de Einstein simplemente establecen estas relaciones de forma precisa.

¿Nos suena extraordinariamente raro? Seguro que sí, pero así es como se comporta nuestro universo según nos ha enseñado Einstein. De esta manera, materia y geometría son capaces de influir una en la otra, manteniendo un balance dinámico entre ellas a lo largo de todo el espaciotiempo.

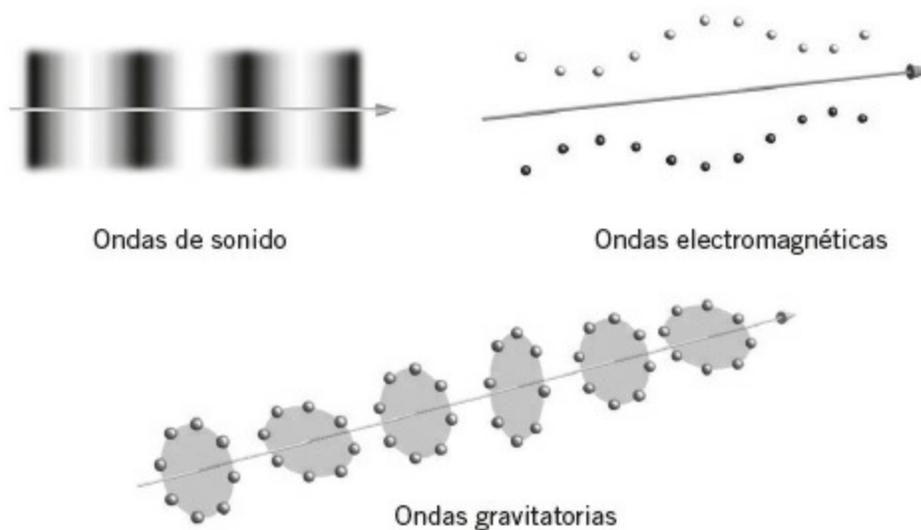
Por ejemplo, un planeta con una masa de 9 milímetros crea a una distancia de 6300 kilómetros de su centro una curvatura en el tiempo de nueve billones de kilómetros de radio $(= \frac{2 \times (6300)^2}{0,000009})$. Cuando un objeto se mueve siguiendo esta curvatura durante un tiempo de trescientos mil kilómetros, se desplaza una distancia de cinco metros $(= \frac{(300000)^2}{2 \times 9000000000000} \times 1000)$.

Esta es la versión einsteiniana de una pelota que cae hacia el suelo en la Tierra durante un segundo.

F. La polarización de las ondas

Hemos visto que las ondas de sonido son ondas de compresión variable. Mueven las moléculas de aire rítmicamente hacia adelante y hacia atrás, en la misma dirección en que viaja la onda. Cuando una onda produce oscilaciones de este tipo decimos que es una onda longitudinal.

Las ondas en la superficie del agua son diferentes de las de sonido: sus oscilaciones no son adelante-atrás, sino arriba-abajo, en dirección perpendicular a la propagación de la onda. Estas son ondas transversales, como las oscilaciones en una cuerda y las ondas electromagnéticas. Es decir, cuando pasa una onda electromagnética por donde haya un par de cargas positiva y negativa (como un electrón y un núcleo atómico), estas se acercan y se separan en dirección perpendicular al paso de la onda: arriba-abajo, o izquierda-derecha, o en direcciones ladeadas intermedias, pero nunca adelante-atrás.



Patrones de oscilación producidos por el paso de ondas longitudinales de sonido, ondas transversales electromagnéticas, y ondas gravitatorias.

Esto significa que si queremos caracterizar una onda transversal no nos basta con dar su amplitud y frecuencia: también debemos especificar en qué dirección, perpendicular a la onda, se produce la oscilación. Esto se conoce como la

polarización de la onda.

La polarización es una propiedad que nos es poco familiar, dado que en el sonido no existe y nuestros ojos no están preparados para distinguirla en la luz. De hecho, las pantallas de cristal líquido (LCD) de nuestros monitores de ordenador y teléfonos móviles emiten luz polarizada sin que lo notemos. Pero podemos fácilmente comprobarlo (y así verificar que la luz es una onda transversal) si empleamos un filtro polaroid, como los que llevan algunas gafas de sol. Al girar el filtro, podemos ver cómo la imagen se oscurece y se aclara, ya que solo pasa luz con una cierta orientación de la polarización.

También las ondas gravitatorias son transversales, y en esto se diferencian del sonido. Pero su patrón de oscilación no es el mismo que en las ondas electromagnéticas. Las ondas gravitatorias mueven los objetos tanto verticalmente como hacia los lados. Cuando pasa, una onda gravitatoria moverá unas canicas dispuestas en círculo en la manera que vemos en la ilustración. En LIGO no se mueven canicas, sino un conjunto de espejos (capítulo 16).

En física decimos que las oscilaciones que producen este tipo de movimiento son ondas tensoriales, mientras que las ondas de sonido son escalares y las electromagnéticas son vectoriales.

Esta polarización tiene consecuencias importantes para la producción de ondas gravitatorias. Imaginemos una esfera cuyo tamaño varía, por ejemplo, un globo que se hincha y se deshincha muy rápidamente, y al hacerlo emite ondas como si fuese un altavoz esférico. Estas ondas necesariamente habrán de ser longitudinales, dado que la presión actúa en la misma dirección en que se expande la onda. Esto significa que los movimientos que mantienen la simetría de una esfera no pueden crear ondas gravitatorias. Incluso una explosión tan violenta como la de una supernova, si se produce manteniendo una forma exactamente esférica, será completamente imperceptible para un detector de ondas gravitatorias.

G. Distorsión: El origen de los 21 ceros

La deformación de la geometría que produce una onda gravitatoria se suele denotar por la letra h . Su valor expresa la proporción de la distorsión: al paso de una onda con $h = 0,05$, una separación de un metro se estira y encoge un 5%, es decir, cinco centímetros. Lo que LIGO mide es esta h .

Cuando un sistema altamente relativista (con masas muy concentradas y a grandes velocidades, como en las colisiones entre estrellas de neutrones o agujeros negros) produce ondas gravitatorias, es fácil estimar el máximo valor de h que tendrá la onda cuando esta llegue a una distancia dada de la fuente. Basta con tomar la masa del sistema, medida en kilómetros (suplemento E), y dividirla por dos veces esa distancia, también en kilómetros. Es decir

$$h \lesssim \frac{\text{Masa}}{2 \text{ Distancia}}$$

Aquí « \lesssim » simboliza que, aunque el valor real de h no llegue a este máximo, el cálculo nos da una estimación aproximada de lo que podemos esperar. Vemos que h disminuye si nos alejamos de la fuente, de manera inversamente proporcional a la distancia a la que nos encontremos (también advertimos que h es igual que el potencial gravitatorio que introdujimos al final del suplemento C).

Apliquemos esta fórmula a una colisión entre estrellas de neutrones. En unidades geométricas, la masa típica de estas estrellas es de cerca de cuatro kilómetros. ¿A qué distancia de la Tierra esperamos que haya colisiones suficientemente abundantes? Este dato continúa siendo una incógnita hoy en día. Sin embargo, está claro que si consideramos distancias grandes, por una parte el valor h se hará más pequeño, pero por otra parte también estaremos explorando volúmenes cada vez mayores y por tanto mayor será la probabilidad de hallar algo. Parece razonable tomar como referencia la distancia al cúmulo de galaxias más cercano a nosotros, en la dirección de la constelación de Virgo. La gran cantidad de galaxias y estrellas que allí hay probablemente albergará un buen número de sucesos suficientemente cercanos como para que podamos detectarlos.

La distancia media al cúmulo galáctico de Virgo es de unos 54 millones de años luz, o 500.000.000.000.000.000 kilómetros: aquí ya hay 20 ceros. Para una masa de 4 kilómetros, la fórmula anterior nos da

$$h \approx 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 004$$

donde vemos que antes de llegar al 4 final pasamos por 21 ceros. Esta es la estimación de la que hablamos en el capítulo 15.

Pese a la crudeza del cálculo, este valor ha resultado ser muy consistente con los experimentos. Ni LIGO ni otros detectores hallaron nada durante los años en que apenas podían ir más allá de los primeros veinte decimales. La primera detección de las ondas gravitatorias por LIGO Avanzado, descrita en el capítulo 17 y el suplemento H, se produjo por la colisión de dos agujeros negros con masas de unos cien kilómetros, y a una distancia de la Tierra de unos 1.300 millones de años luz. El valor de h que de aquí resulta es prácticamente igual al que hemos dado arriba; la distancia es mayor de lo que la habíamos considerado, pero se compensa por la mayor masa de los objetos que colisionan.

Veamos finalmente cuál es la deformación que una de estas ondas causa en nuestro detector. Si la longitud de los brazos de LIGO es de 4 kilómetros, al multiplicarla por h nos queda una variación igual a unas milésimas del tamaño del núcleo atómico. Esto es lo que Weiss y Thorne se propusieron medir y lo que, más de cuarenta años después, LIGO logró.

H. «GW150914»

La colaboración científica de LIGO-Virgo presentó su primer descubrimiento, denominado GW150914 (Gravitational Wave, 2015, septiembre, 14), con un gráfico.²

El recuadro superior del gráfico nos muestra la señal que recibieron ambos detectores (observed). El inferior presenta la señal teórica que produciría una colisión de dos agujeros negros, obtenida resolviendo las ecuaciones de Einstein (numerical relativity). Por supuesto, la señal observada tiene un aspecto mucho más irregular que el limpio cálculo teórico, pero incluso sin necesidad de entender lo que representan los gráficos, podemos apreciar que la observación y la teoría coinciden bien.

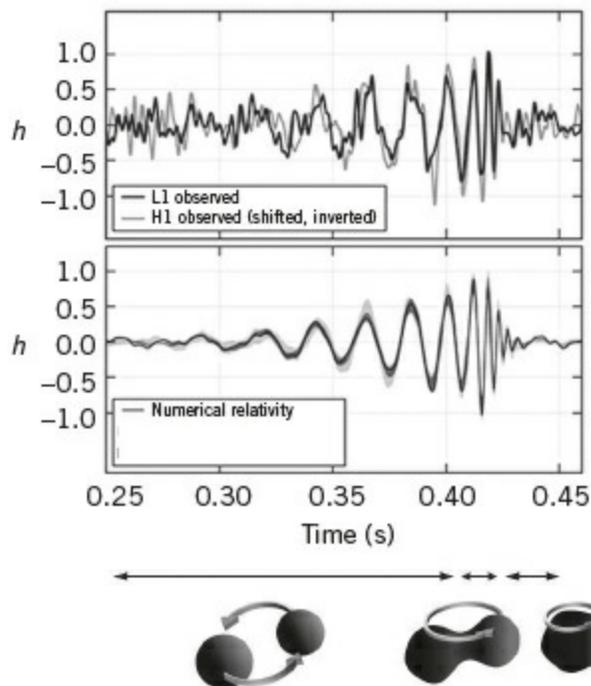


Gráfico adaptado de la fig. 1 en B. P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), «Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger», *Physical Review Letters*, 11 de febrero de 2016.

Los dibujos que hemos añadido al pie nos servirán para ilustrar lo que nos cuentan estos gráficos.

La amplitud de las oscilaciones en el eje vertical indica el desplazamiento de los espejos: es el valor de h (suplemento G); más concretamente, la cifra tras los 21 ceros. El eje horizontal corresponde al tiempo, en segundos. Por tanto, las curvas nos dicen, leídas de izquierda a derecha, cómo ha vibrado el detector durante un intervalo de unas dos décimas de segundo (desde 0,25 a 0,45 segundos).

Las primeras oscilaciones, en la parte de la izquierda del gráfico, se produjeron mientras los dos agujeros negros orbitaban uno en torno a otro. Ignorando las muchas irregularidades pequeñas (ruidos), en la señal, vemos que las oscilaciones se van haciendo progresivamente más estrechas, es decir, más rápidas, y también de mayor amplitud: los agujeros negros circulan cada vez más deprisa y emiten ondas más fuertes. Si traducimos estas oscilaciones a sonidos audibles, se oye algo como «tuuuiit»: el gorjeo de un pájaro con un final agudo.

La fusión ocurre cerca de 0,42 segundos, el momento en el que las oscilaciones son mayores y más estrechas. Tras estos picos, las últimas vibraciones, más pequeñas, nos muestran los temblores finales del agujero negro resultante antes de acallarse para siempre.

En el recuadro superior tenemos la señal observada en Livingston (L1), a la que se ha superpuesto la de Hanford (H1), tras desplazar esta un intervalo de 7 milisegundos (e invertida, por la distinta orientación de los brazos). Esta diferencia de tiempo nos dice que la onda llegó antes a L1 en Louisiana que a H1 en Washington, y por tanto entró en la Tierra por el sur y salió por el norte. Es difícil ser más preciso sobre la dirección de la que provino.

Como hemos mencionado ya, las oscilaciones de la curva van aumentando su frecuencia (estrechándose) según avanza el tiempo. Midiendo con cuidado esta variación (el gorjeo) es posible, usando las ecuaciones de la física, determinar la masa promedio de los dos agujeros negros iniciales. Resulta ser algo más de treinta veces la masa del Sol. Por otra parte, la frecuencia de la oscilación justo antes de la fusión —dos veces el ritmo al que los agujeros negros giran uno en torno a otro— nos dice que su órbita tiene menos de 400 kilómetros de radio. No hay manera de tener unas masas semejantes orbitando en un espacio tan pequeño a no ser que se trate de agujeros negros.

La comparación detallada entre las curvas observadas y las calculadas teóricamente con las ecuaciones nos permiten ser más precisos: las masas iniciales

han de ser 29 y 36 veces la del Sol. La forma en la que tiembla el agujero negro final es la que corresponde a una masa 62 veces la del Sol. Además, todos estos agujeros negros giran rápidamente sobre sus propios ejes, si bien los datos no nos dicen su velocidad de giro con mucha exactitud.

Finalmente, ahora que sabemos tanto la masa involucrada en la colisión como el valor de h que tiene la onda, podemos acudir al suplemento G para calcular la distancia a la que ocurrió el suceso: 1.300 millones de años luz.

Agradecimientos

Este libro no existiría si mi editor, Francisco Martínez Soria, no me hubiera persuadido de escribirlo tras presenciar aquel emocionante momento histórico que fue el anuncio de LIGO. Le agradezco la libertad que me ha permitido y su paciencia frente a la dilatación temporal que ha sufrido el proyecto.

Maite Álvarez, Javier Atxurra, Rodrigo Díaz Medina, Estibalitz García de Salazar, Houda Laksimi, Yolanda López, Paco Romeo y Elena Torres leyeron versiones previas del libro, y gracias a sus comentarios y sugerencias es ahora (espero) más claro, legible y ameno. Aquello que haya quedado confuso o difícil de digerir se debe enteramente a mis propias carencias.

También me ha sido muy útil la multitud de preguntas, a menudo inesperadas y siempre interesantes, de las audiencias en mis charlas divulgativas tanto antes como después de La Detección. El vibrante entusiasmo por la ciencia con que me he encontrado me ha estimulado a trabajar a fondo mis explicaciones y a cuidar mucho el resultado final.

Por último, espero que el lector me disculpe si confieso que uno de mis motivos más importantes para comenzar y acabar este libro ha sido el deseo de dedicárselo a las tres personas que más a menudo me ven perder la noción del tiempo en los agujeros negros —Yolanda, Sofía y Javier— y a quienes me pusieron en camino en el espaciotiempo: mis padres. A todos ellos les dedico este esfuerzo con todo mi amor.

Notas y referencias

Agrupo aquí notas —aclaraciones y detalles puntuales para los lectores más minuciosos, así como algunos caprichos personales— junto con referencias que documentan (no exhaustivamente) el origen de algunos pasajes del texto y guían al lector interesado hacia literatura más detallada, en castellano cuando es posible.

Preludio

1. Existen innumerables biografías de Einstein. Mis fuentes principales han sido las siguientes, todas ellas excelentes: A. Fölsing, *Albert Einstein: A biography*, Penguin Books, Nueva York, 1998; A. Pais, *Subtle is the Lord...*, Oxford University Press, Oxford, 1982; W. Isaacson, *Einstein: His Life and Universe*, Simon & Schuster, Nueva York, 2008 (trad. cast., *Einstein: su vida y su universo*, Debate, Barcelona, 2016.) Los escritos recopilados de Einstein (*Collected papers of Albert Einstein*, <http://www.einstein.caltech.edu/>) han sido también una fuente inestimable de información. Otras referencias menos genéricas para la vida de Einstein se citan abajo en su contexto específico.

2. Esto fue en 1896, contando con la aprobación de su padre. En 1901 adquirió la nacionalidad suiza, que mantuvo por el resto de su vida. Cuando los nazis subieron al poder en 1933, Einstein renunció definitivamente a su nacionalidad alemana. En 1940 se convirtió en ciudadano de EE.UU.

3. Si vamos a su artículo original veremos que Einstein menciona el valor observado como 45 segundos de arco, con una imprecisión de más o menos 5 segundos de arco. No obstante, el valor de 43 segundos (aceptado hoy en día) era citado ya por el astrónomo Simon Newcomb desde 1882.

4. Durante años se creyó que podía revelar la existencia de un nuevo planeta, llamado Vulcano. Véase T. Levenson, *The hunt for Vulcan*, Random House, Nueva York, 2015.

5. Se equivoca por muy poco Douglas Adams en la *Guía del autoestopista galáctico*, Anagrama, Barcelona, 2008, cuando afirma que la respuesta al sentido de la vida, el universo y todo lo demás es 42.

6. También se las conoce como ondas gravitacionales, término más próximo al inglés *gravitational waves*. En cualquier caso, no se deben confundir con las que en meteorología se conocen como «ondas de gravedad», con las que nada tienen que ver.

Parte I

1. Heinrich Hertz, «Sobre las relaciones entre luz y electricidad», discurso ante la Asociación Alemana para el Avance de la Ciencia Natural y la Medicina, Heidelberg, 1889. Mencionado en W. G. V. Rosser, *Classical electromagnetism via relativity*, Plenum, Nueva York, 1968, p. 119, y también en E. T. Bell, *Men of Mathematics*, Simon & Schuster, Nueva York, 1937, p. 16.

Capítulo 1

1. La fecha precisa —marzo, 14, o sea 3,14— coincide con el que se conoce como el «Día de Pi».

2. Mencionado en C. Sasaki, *Descartes's Mathematical Thought*, Springer, Dordrecht, 2003, p. 150; J. Neffe, *Einstein: A biography*, Farrar, Strauss and Giroux, Nueva York, 2007, p. 21.

3. Para los detalles de esta historia, véase G. Weinstein, «Einstein chases a light beam», [arxiv.org/pdf/1204.1833].

Capítulo 2

1. Valle-Inclán, citado en M. Aznar Soler, *Guía de lectura de «Martes de Carnaval»*, Anthropos, Barcelona, 1992, p. 50.

2. Nos referimos siempre a luz que viaja en el vacío. Al pasar por otros medios, por ejemplo, el agua, su velocidad baja a 225.000 kilómetros por segundo. Pero en cuanto sale del agua ¡vuelve a viajar a 300.000 kilómetros por segundo! Mientras se propaga en el vacío, la velocidad de la luz no puede aumentar ni disminuir.

Capítulo 3

1. H. Minkowski, discurso en la 80.^a Asamblea de Científicos y Médicos Alemanes (21 de septiembre de 1908).

2. A diferencia de lo que ocurre con las direcciones en el plano, donde un simple giro de 90° intercambia las direcciones horizontales con las verticales, en el espaciotiempo las designaciones de espacio y tiempo no son completamente intercambiables. La dimensión del tiempo no se puede «girar» tanto como para convertirla enteramente en espacio, ni a la inversa. De no ser así, cambiando nuestra velocidad podríamos movernos adelante y atrás en el tiempo (al igual que podemos avanzar y retroceder en el espacio), y con ello alterar el orden en que ocurren las cosas.

3. Más exactamente, a 8,6 años luz.

Capítulo 4

1. La publicación a partir de 1987 de los escritos recopilados de Einstein, y en especial la de su correspondencia privada, ha revelado muchos aspectos (positivos y negativos) antes poco conocidos del Einstein más humano. D. Overbye, en *Einstein in love*, Penguin Books, Nueva York, 2000, aprovecha y sintetiza mucho de este material.

Capítulo 5

1. Por ejemplo, Lewis Carroll, el autor de los cuentos de Alicia, hizo precisamente esta observación en su novela *Sylvia y Bruno* (capítulo 8). Lo que hace excepcional a Einstein es que supiese ver en ello una propiedad fundamental de la naturaleza. En cambio, Carroll continúa la discusión con un poema, muy de su estilo, sobre un canguro con un molinillo de café que resulta ser una píldora de verduras (¿?). La novela (bastante aburrida) contiene también frecuentes alusiones al tiempo, incluyendo un reloj mágico que hace que se invierta su marcha (L. Carroll, *Sylvie and Bruno*, MacMillan & Co, Londres, 1889).

2. Este nuevo principio fundamental viene con un matiz importante: si contamos con suficiente tiempo o podemos hacer medidas a suficiente distancia, entonces sí podremos distinguir entre aceleración y gravedad real. Esto es fácil de entender: la ilusión de ingravidez en caída libre no puede durar más que el tiempo hasta que choquemos con el suelo (o, en el caso extremo en que caigamos a un agujero negro, no más allá de nuestro final en la singularidad). Por otra parte, si nuestro laboratorio es tan grande como para cubrir una parte apreciable del planeta, veremos que al soltar dos bolas en dos puntos alejados, sus trayectorias no serán exactamente paralelas —como lo serían si el laboratorio estuviese acelerando en el espacio—, sino que convergerán hacia el centro de la Tierra. Estos experimentos no son indistinguibles uno de otro. Por tanto, el principio de equivalencia solo se puede usar en entornos pequeños y durante tiempos cortos, es decir, en regiones limitadas del espaciotiempo.

3. Aclaremos un error común: es perfectamente posible tratar los movimientos acelerados dentro de la teoría especial de la relatividad. ¡No sería una teoría muy buena si no pudiese describir una vuelta en tiovivo! Lo que distingue a la relatividad general es que en ella también estos movimientos forman parte de un principio de relatividad, lo que requiere la introducción de la gravedad; es decir (como veremos), requiere que el espaciotiempo sea dinámico.

Capítulo 6

1. Hagamos una precisión puntillosa: lo que aquí cuenta no es la diferencia en la *fuerza* de la gravedad entre el ático y la planta baja, sino la diferencia en el *potencial gravitatorio* entre ambos puntos.

2. En este experimento, realizado por Robert Pound y Glen Rebka, se midió la variación de la frecuencia de la luz enviada desde lo alto de una torre de 22,5 metros hasta su base. Dado que medir la frecuencia de la luz es equivalente a medir el ritmo de un reloj, podemos decir que se verificó el efecto de dilatación temporal. En 1976, el experimento *Gravity Probe A* comprobó más directamente el cambio en el ritmo de un reloj (un máser) a bordo de un cohete a 10.000 kilómetros de altitud. En vida de Einstein, las mediciones de W. S. Adams en 1925 de la variación en la frecuencia de la luz emitida por la estrella Sirio B se consideraron como una posible verificación del efecto, pero hoy en día se sabe que eran demasiado defectuosas como para resultar concluyentes.

3. *La Vanguardia*, miércoles 14 de marzo de 1923. Este artículo de prensa fue solo una de las delirantes anécdotas de la visita de Einstein a España, donde una vendedora de castañas al reconocerlo por la calle le gritó, «¡Viva el inventor del automóvil!». Véase Thomas F. Glick, *Einstein y los españoles. Ciencia y sociedad en la España de entreguerras*, CSIC, Madrid, 2005.

4. La cuadrangulación de la posición (con cuatro más medidas de distancia a los satélites) permite también determinar la altitud a la que nos encontramos sobre la superficie terrestre. En la discusión que sigue no lo tendremos en cuenta.

5. Una buena pregunta: ¿también hemos de tener un reloj atómico en nuestro propio aparato de GPS? La respuesta es no. Ese es un reloj normal de cuarzo, mucho más barato y ligero pero con una precisión mucho menor que uno atómico. Pero entonces, ¿por qué los errores de este reloj inexacto no afectan a la precisión de toda la medida? Aquí se emplea un truco astuto que permite compensar esa inexactitud. Si recibimos la señal horaria de más de tres satélites, entonces es posible calibrar la hora de nuestro reloj con tanta precisión como la de los relojes atómicos. Para entender cómo, supongamos que recibimos la señal desde cuatro satélites, llamémoslos 1, 2, 3, 4. Si nuestro reloj fuese muy preciso, podríamos determinar por triangulación dónde nos encontramos usando las señal es de tres cualesquiera de los cuatro relojes: (1, 2, 3), o (1, 3, 4), o (1, 2, 4), o (2, 3, 4). Si las medidas son exactas, las cuatro elecciones han de coincidir en cuál es nuestra posición. Pero nuestro reloj no es tan exacto, luego en general cada triplete de señales nos dará una posición distinta. La estrategia ahora es calibrar la hora de nuestro reloj hasta que estas cuatro estimaciones de la posición coincidan sobre un único punto en la Tierra. Es decir, nuestro reloj recalcula en cada instante cuál es la hora exacta que hace posible fijar su posición. De esta manera puede decirnos no solo dónde estamos, sino también darnos la hora tan fielmente como un carísimo reloj atómico.

6. No solo a eso: a lo largo de su vida Einstein llegó a registrar cerca de cincuenta patentes a su nombre, incluida una para «un nuevo, original y ornamental diseño de blusa»[<http://mentalfloss.com/article/52444/27-celebrity-patent-holders>].

7. Para la compleja historia de la observación del eclipse, véanse: M. Stanley, «“An Expedition to Heal the Wounds of War”. The 1919 Eclipse and Eddington as Quaker Adventurer», *Isis* 2003: 94(1): 57-89; D. Kennefick, «Testing relativity from the 1919 eclipse—a question of bias», *Phys. Today* 2009; 62(3): 37-42; P. Coles, «Einstein, Eddington and the 1919 Eclipse», en *Historical Development of Modern Cosmology*, ASP Conference Proceedings, 2001, vol. 252, 21.

8. K. Thorne, *The Science of Interstellar*, W. W. Norton & Co, Nueva York, 2014.

9. Los detalles de la visualización de Gargantúa (tales como el «anillo de fuego» que lo rodea, y la eliminación por motivos estéticos del desplazamiento Doppler y la atenuación gravitatoria de la luz) están explicados en Thorne, *op. cit.* En la película también juega un papel relevante un «agujero de gusano» (cuya existencia real es mucho más especulativa) que curva fuertemente la geometría del espacio. Sus imágenes también se obtuvieron calculando las trayectorias de los rayos de luz que lo atraviesan.

10. O. James, E. von Tunzelmann, p. Franklin y K. S. Thorne, «Gravitational lensing by spinning black holes in astrophysics, and in the movie *Interstellar*», *Class. Quant. Grav.* 2015; 32065001.

Capítulo 7

1. Las contribuciones de Einstein a la física cuántica están excelentemente descritas (con ecuaciones) en Pais *op. cit.*, y (sin ecuaciones) en A. D. Stone, *Einstein and the quantum*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2013.

Capítulo 8

1. *At ubi materia, ibi Geometria*. J. Kepler, citado en Ian Maclean, *Logic, signs and nature in the renaissance: The case of learned medicine*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007, p. 188.

2. Esta ayuda se conmemora en la actualidad en el nombre de una de las principales series de conferencias internacionales sobre relatividad, los «Encuentros Marcel Grossmann» [<http://www.icra.it/mg/>].

3. M. Janssen, «The Einstein-Besso manuscript: A glimpse behind the curtain of the wizard», Freshman Colloquium «Introduction to the Arts and Sciences», otoño de 2002 [<https://docgo.org/theeinstein-besso-manuscript-a-glimpse-behind-the-curtain-of-the-wizard>].

4. La expresión es de Einstein en su extraordinario testamento intelectual, las *Notas autobiográficas*, Alianza Editorial, Madrid, 2016.

5. Carta de Einstein a Erwin Freundlich, *Collected Papers of Albert Einstein* 8, documento 123.

6. Compárese por ejemplo Fölsing, *op. cit.*, pp. 375-376, con L. Corry, J. Renn, J. Stachel, «Belated decision in the Hilbert-Einstein priority dispute», *Science* 1997; 278: 1270. Las discusiones posteriores sobre este tema son poco edificantes. El artículo de D. Hilbert, «Die Grundlagen der Physik», *Nach. Ges. Wiss.*, 1916; 395, y sus pruebas de imprenta están disponibles en [\[http://einstein-annalen.mpiwg-berlin.mpg.de/related_texts/relativity_rev/hilbert\]](http://einstein-annalen.mpiwg-berlin.mpg.de/related_texts/relativity_rev/hilbert).

7. J. A. Wheeler, *Geons, black holes, and quantum foam*, W. W. Norton & Co, Nueva York, 2000, p. 235.

Capítulo 9

1. A. Einstein, *Einstein on Cosmic Religion and other opinions and aphorisms*, Dover, Mineola, NY, 2009.

2. Para los años de estancia de Einstein en Berlín, véase T. Levenson, *Einstein in Berlin*, Bantam Books, Nueva York, 2003.

3. La compleja historia de la teoría de las ondas gravitatorias está competentemente narrada por D. Kennefick, *Traveling at the speed of thought*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2007.

4. Se trata de Karl Schwarzschild, a quien presentaremos unas páginas más adelante.

5. A. Einstein, N. Rosen, «On gravitational waves», *Journal of the Franklin Institute*, 1937; 223: 4354.

6. Sin embargo, Nathan Rosen permaneció toda su vida escéptico acerca de la realidad física de las ondas gravitatorias.

7. En esta sección me desvío de algunos aspectos históricamente significativos. En particular, no menciono una motivación importante de Einstein en su investigación de la gravedad y la cosmología: un vago principio, formulado por el filósofo Ernst Mach, según el cual la inercia de un cuerpo se ha de deber de alguna manera a su interacción con el resto del universo. Esta idea hacía preferible un universo finito, y quizás también estático. Hoy sabemos que este principio no se cumple en la teoría general de la relatividad, y en mi opinión confunde más que ilumina, por lo que lo he dejado a un lado. Tampoco discuto uno de los argumentos de Einstein, de carácter estadístico, a favor de la constante cosmológica y en contra de la idea de un universo infinito y estático con masa total finita. Finalmente, en 1916 todavía no estaba claro si el universo consistía en una sola galaxia —nuestra Vía Láctea— o si esta era una entre muchas otras. Quizás las incertidumbres sobre el tamaño y la composición del universo ayudaran a Einstein a especular más libremente. Para más detalles véanse: C. Smeenk, «Einstein's Role in the Creation of Relativistic Cosmology», en Michel Janssen y Christoph Lehner (eds.), *The Cambridge Companion to Einstein*, Cambridge University Press, Cambridge, 2014, pp. 228-269; C. O'Riada, M. O'Keefe, W. Nahm, S. Mitton, «Einstein's 1917 static model of the universe: A centennial review», *EPJ H* 2017 [[arxiv.org/pdf:1701.07261](https://arxiv.org/pdf/1701.07261)]; H. Kragh, *Historia de la cosmología. De los mitos al universo inflacionario*, Crítica, Barcelona, 2008.

8. Según un chiste que circula en muchas versiones, cuando un físico quiere describir una vaca comienza por asimilarla a una esfera perfecta. La otra simplificación favorita de los físicos, que usamos varias veces en el libro, es la ausencia de fricción.

9. Sí, de acuerdo, nuestro cerebro no está preparado para visualizar esto. Los físicos nos dejamos guiar por las matemáticas para extender nuestra intuición. Pero al igual que a las hormigas de la membrana les basta con medir líneas y ángulos para convencerse de que viven en una esfera y no en un plano, lo mismo podríamos hacer nosotros. Si el radio de la esfera es suficientemente grande, entonces este puede ser un universo satisfactoriamente finito y sin bordes en el que, como las hormigas, podríamos salir de viaje en línea recta en cualquier dirección y acabar volviendo (al cabo de muchísimo tiempo) al punto de partida.

10. Para apreciar el crucial papel, a menudo injustamente infravalorado, de Lemâitre en el nacimiento de la cosmología física moderna, véase J. Farrell, *The day without yesterday*, Thunder's Mouth Press, Nueva York, 2005.

11. G. Lemaître, *The primeval atom: An essay on cosmogony*, D. Van Nostrand, Toronto, 1950, citado por Farrell, *op cit*.

12. M. Bartusiak, *The day we found the universe*, Random House, Nueva York, 2009, relata las disputas acerca de la naturaleza de las nebulosas y los descubrimientos de Hubble.

13. Como buen físico que es, la única suposición que Schwarzschild hace es que la estrella sea una esfera perfecta, sin ningún abombamiento ni irregularidad.

14. Se trata de Subramanyan Chandrasekhar. La dramática historia de su descubrimiento forma el núcleo de A. I. Miller, *Empire of the stars*, Houghton Mifflin Co, Nueva York, 2005.

15. «Minutes of a meeting of the Royal Astronomical Society», *Observatory* 1935; 58: 37.

16. A. Einstein, «On a stationary system with spherical symmetry consisting of many gravitating masses», *Annals of Mathematics* 1939; 40: 922.

17. J. R. Oppenheimer, H. Snyder, «On Continued Gravitational Contraction», *Phys. Rev.* 1939; 56: 455. El hilo que siguen pasa por el trabajo sobre estrellas relativistas de Richard Tolman, quien sí conocía el artículo de Lemaître.

18. Carta de J. R. Oppenheimer a George Uhlenbeck, citada por M. Ortega-Rodríguez *et al.*, en «The early scientific contributions of J. Robert Oppenheimer: Why did the scientific community miss the black hole opportunity?» [arxiv.org/abs/1703.04234].

19. En realidad a Wheeler se debe la difusión y aceptación del término «agujero negro» — quizás el mayor logro publicitario de la ciencia moderna—, pero no la idea ni su primer uso. Para los detalles de esta historia véase M. Bartusiak, *Agujeros negros*, Ariel, Barcelona, 2016.

Capítulo 10

De entre las introducciones a los agujeros negros disponibles en castellano recomendamos: K. S. Thorne, *Agujeros negros y tiempo curvo*, Crítica, Barcelona, 2010; J. L. Fernández Barbón, *Los agujeros negros*, CSIC/Los Libros de la Catarata, Madrid, 2014; M. Bartusiak, *Agujeros negros*, *op. cit.*

1. Si añadimos el «pienso, luego existo» de Descartes, llegamos a una conclusión que la física moderna ha cuantificado: la información requiere de un mínimo de energía, y por tanto tiene un mínimo de peso. *Pienso, luego peso.*

2. Este es un fenómeno colectivo de las partículas y no todas ellas lo exhiben. Las que lo hacen se denominan *fermiones*, y las que no, *bosones*.

3. Esto es el carácter no lineal de la gravedad relativista.

4. Sí, en cada punto la curvatura es proporcional a la *densidad*: la T en las ecuaciones es la densidad de masa y energía. Agregando mucha materia poco densa puede crearse un pozo muy amplio cuya pendiente crece poco a poco hasta hacerse muy profundo. Así es un agujero negro supermasivo.

5. Pero no en todos sus detalles. El colapso real es muy violento, con materia que se mueve en muchas direcciones (no solo en caída radial) y crea ondas de choque.

6. En este capítulo hacemos corresponder milisegundos (o centésimas de milisegundo) con agujeros negros de masa estelar, y minutos u horas con agujeros negros supermasivos. Si empleamos las unidades geométricas para el tiempo y la masa que hemos introducido en el capítulo 3 y en el suplemento E la correspondencia es inmediata:

$$1 \text{ masa solar} = 3 \text{ kilómetros} = 1 \text{ cienmilésima de segundo}$$

Es decir, el radio del horizonte de un agujero negro con la masa del Sol es de tres kilómetros (un diámetro de seis kilómetros), que son lo mismo que una cienmilésima de segundo luz. Para un agujero negro supermasivo como Gargantúa en *Interstellar*, de cien millones de masas solares, todas las cantidades se multiplican por el mismo factor: el radio del horizonte es de trescientos millones de kilómetros, y el tiempo característico es de mil segundos, o diecisiete minutos.

7. La afirmación de que a partir de un cierto instante no hay materia, sino solo espacio vacío hasta llegar a la singularidad, no es independiente de la elección de dirección temporal que hagamos. Sin embargo, siempre es posible hacer esta elección de forma que esto sea válido (por ejemplo, lo es en coordenadas de tipo Eddington-Finkelstein).

8. En principio sería incluso posible formar un agujero negro sin emplear más que curvatura y ningún tipo de materia: haciendo colisionar ondas gravitatorias de suficiente intensidad. En todo este proceso no habría nunca más que espaciotiempo puro deformándose crecientemente.

9. Esto requiere que la estación orbite en torno a un agujero negro que esté rotando muy rápidamente sobre su eje; de no ser así, no es posible hallar órbitas estables próximas al horizonte.

10. Fijémonos, sin embargo, que dado que ninguna luz puede llegarnos desde el horizonte, entonces sea cual sea la resolución de nuestros aparatos será imposible llegar a ver cómo nuestros amigos lo cruzan.

11. En realidad, la distorsión de la geometría es ya suficientemente grande para matarlos en el momento en que la estrella alcanza un tamaño de unos doscientos kilómetros, tan solo unos milisegundos antes de que aparezca el horizonte.

12. Existen soluciones matemáticas de geometrías de agujeros negros (con carga eléctrica o rotación) en las que la singularidad *sí* es un punto en el espacio, o un conjunto de puntos (como un anillo). Sin embargo, creemos que no son físicamente posibles en la realidad ya que son muy inestables: cualquier perturbación las cambia a una singularidad de tipo «instante». Técnicamente, estamos suponiendo que la «versión fuerte de la censura cósmica» es correcta —aunque no demostrada con rigor matemático completo, su validez está respaldada por una amplia evidencia teórica— y que la singularidad es siempre tan violenta que no será posible sobrevivir a ella. De acuerdo con esto, es imposible sobrevivir a la caída en un agujero negro para reaparecer en otro lugar u otra época. Para que esto pueda ocurrir debe cambiar la forma prevalente en que hoy en día entendemos los agujeros negros (no faltan especulaciones al respecto, la mayoría con poco fundamento en mi opinión).

13. Existen diferencias: en el Big Bang, el espacio se expande en todas las direcciones, mientras que en el interior de un agujero negro, algunas direcciones se contraen y otras se estiran.

14. Estamos simplificando bastante. Lo que uno encuentre dentro de un agujero negro depende de detalles de lo que haya caído previamente en él, del momento en que atravesemos el horizonte y de nuestra propia trayectoria. Lo que uno vea de esos objetos que cayeron (es decir, la luz que reciba de ellos) se encontrará además afectado por efectos de desplazamiento al rojo de la luz, similares a los que efectúan el fundido a negro que mencionamos anteriormente. En general es una situación compleja. Pero en todo caso, lo que sí es cierto es que una vez en el interior, nosotros también participamos en el colapso y podemos en principio recibir señales de lo que entró en el agujero negro mucho antes.

15. Pero ¿no habíamos dicho que la simultaneidad es relativa y depende del observador? Muy buena pregunta. Lo que queremos decir es que es posible hallar conjuntos de observadores para los que el colapso en el interior del agujero negro es simultáneo con cualquier instante en el exterior del agujero negro.

16. Se lo dijo a Kip Thorne, según lo cuenta este en Thorne, *Agujeros negros y tiempo curvo*, *op. cit.*

17. No nos confundamos: estas ondas no vienen del interior del agujero negro (del que nada puede salir), sino que se crean en el exterior próximo a él.

Capítulo 11

1. El archivo que el FBI mantenía sobre Einstein llegó a superar las 1.400 páginas. Isaacson, *op. cit.*

2. A. Pais, *Einstein lived here*, Oxford University Press, Nueva York, 1994, p. 43.

3. A. Calaprice (ed.), *Dear Professor Einstein. Albert Einstein's letters to and from children*, Prometheus Books, Amherst, NY, 2002.

Parte II

Capítulo 12

1. N. Tesla, «Experiments with alternate currents of high potential and high frequency», en *The Illustrated Tesla*, Simon and Schuster, Nueva York, 2013.

2. Young demostró la naturaleza ondulatoria de la luz (*interferómetro de Young, teoría de Young-Fresnel*); desarrolló la teoría de la elasticidad de los sólidos (*módulo de Young*) y de la capilaridad en líquidos (*ecuación de Young-Laplace*); estudió los mecanismos de enfoque del ojo y describió el astigmatismo; propuso, correctamente, que nuestra visión es tricromática (*teoría de Young-Helmholtz*); fue el principal rival de Champollion en el desciframiento de los jeroglíficos egipcios, y aunque en este caso perdió la carrera, en el camino descifró la escritura demótica y compiló su primer diccionario. Por si fuera poco, fue un consumado políglota, bailarín, músico, carpintero, experto en las mareas y en la teoría de los seguros de vida, y fue muy apreciado por sus pacientes médicos y por sus amigos, según los cuales tuvo un matrimonio «singularmente feliz» (aunque sin descendencia). No está mal para tan solo 55 años de vida, narrada en A. Robinson, *The last man who knew everything*, Oneworld, Oxford, 2006.

3. Una biografía amena de Maxwell: B. Mahon, *The man who changed everything*, Wiley, Chichester, 2003. Una biografía (menos amena) de Hertz: J. Z. Buchwald, *The creation of scientific effects*, University of Chicago Press, Chicago, 1994. Una historia del desarrollo de la teoría de Maxwell tras la muerte de éste: B. J. Hunt, *The Maxwellians*, Cornell University, Ithaca, NY, 1991.

Capítulo 13

1. Las ondas gravitatorias curvan el espacio, pero no el tiempo. Es decir, cuando una onda pasa por una región en la que tenemos varios relojes próximos entre sí, estos se separan y acercan, pero no experimentan variaciones relativas en el ritmo al que marchan (para los expertos: es siempre posible escoger la dirección temporal de manera que esto sea cierto). Esto no se debe confundir con el hecho, que veremos en el capítulo 16, de que una de las mejores maneras de detectar el paso de una onda gravitatoria entre dos masas es medir las variaciones en el tiempo que tarda una señal en viajar de una a otra masa.

2. Por supuesto, hoy en día estamos bien familiarizados con las ecografías, que son precisamente eso: imágenes hechas con sonido. Aun así, la propiedad que aquí queremos hacer notar está bien ilustrada por la baja calidad de estas imágenes y la dificultad de obtenerlas en comparación con una fotografía convencional.

3. ¿Solo ellas? Quizás hayamos oído decir que cualquier cuerpo en movimiento circular (por ejemplo, un tiovivo) o meramente irregular, emite ondas gravitatorias, aunque sean de una intensidad muy baja. Esta afirmación no es realmente cierta, ya que ignora los efectos de la mecánica cuántica, según la cual solamente se pueden emitir ondas gravitatorias en múltiplos de unidades mínimas de radiación conocidas como gravitones. Aunque todavía no tengamos una teoría completa de la gravedad cuántica, sabemos lo suficiente como para poder demostrar, mediante un cálculo sencillo, que un tiovivo no radiará más que un solo gravitón cada millón de años. Si lo que ponemos a girar es un buque de mercancías de 10.000 toneladas de peso, dando una vuelta cada diez segundos, entonces este puede radiar algunos gravitones en cada giro.

Capítulo 14

1. Arvo Pärt [<http://www.arvopart.org/tinnabulation.html>].

2. La historia y sociología de los experimentos de ondas gravitatorias (en particular, de las barras resonantes) desde sus comienzos hasta el año 2004 está tratada en ingente detalle en H. M. Collins, *Gravity's shadow. The search for gravitational waves*, University of Chicago Press, Chicago, 2004.

3. J. Weber, «How I discovered Gravitational Waves», *Popular Science*, Mayo 1972, vol. 200, n.º 5, pp. 106-107 y 190-192.

4. Las barras de Weber estaban afinadas para responder óptimamente a una frecuencia de 1.660 hercios, que correspondía a la frecuencia de las ondas gravitatorias esperables en el colapso estelar. Si uno golpease la barra, oiría un sonido muy puro y algo más agudo que el que puede llegar a producir la voz humana, un tono quizás poco agradable pero perfectamente audible.

5. Se trata de la celebrada ley del área del horizonte de sucesos. S. W. Hawking, «Gravitational radiation from colliding black holes», *Phys. Rev. Lett.* 1971; 26: 1344.

6. El más embarazoso fue el que hizo al afirmar que la señal provenía del centro de la Vía Láctea. Según Weber, sus barras recibían simultáneamente una señal en el momento justo en que Sagitario (en la dirección del centro galáctico) estaba en lo más alto del cielo, alineado con sus barras, y no en otro momento del día. Sin embargo, otros señalaron rápidamente la inconsistencia: dado que las ondas gravitatorias atraviesan la Tierra sin ninguna molestia, la señal de Weber debía aparecer dos veces al día —una vez cada doce horas, tanto cuando Sagitario estaba sobre Maryland como cuando estaba en sus antípodas— en lugar de una sola vez. Las sospechas sobre la selección de datos de Weber aumentaron cuando al poco tiempo anunció que, de hecho, un nuevo análisis también le revelaba esa segunda señal diaria. No ayudaba el que en sus artículos Weber tendiese a hacer «pronunciamientos delfícos» (la expresión es de Peter R. Saulson en «Physics of gravitational wave detection: Resonant and interferometric detectors», 26th SLAC Summer Institute on Particle Physics, 1998).

7. Se trata de Freeman Dyson, el físico teórico de Princeton. Carta privada de F. Dyson a J. Weber, 5 de junio de 1974, citada por Collins, *Gravity's shadow, op. cit.*, p. 345.

8. A. Cho, «Remembering Joseph Weber, the controversial pioneer of gravitational waves», *Science*, Feb. 12 (2016).

Capítulo 15

Para esta parte de la historia, además de los libros de Collins, *Gravity's shadow, op. cit.*, y M. Bartusiak, *Einstein's unfinished symphony*, Joseph Henry Press, Washington, 2000 (trad. cast. *La sinfonía inacabada de Einstein*, Océano Ámbar, Madrid, 2002), me han sido de valor inestimable las entrevistas a Rainer Weiss en *Caltech Oral Histories* [http://resolver.caltech.edu/CaltechOH:OH_Weiss_R].

1. George Gershwin, carta a Isaac Goldberg [citada en https://en.wikiquote.org/wiki/George_Gershwin].

2. R. Weiss, «Electronically Coupled Broadband Gravitational Antenna», *Quarterly Progress Report*, Research Laboratory of Electronics (MIT) 1972; 105: 54.

3. La demostración de que el púlsar binario revela indirectamente las ondas gravitatorias se debe a Taylor y Joel Weisberg en 1982. El descubrimiento está muy bien narrado en Bartusiak, *Einstein's unfinished symphony, op. cit.* Para la importancia del púlsar binario en el establecimiento de la realidad de las ondas gravitatorias, véase D. Kennefick, «Relativistic lighthouses: The role of the binary pulsar in proving the existence of gravitational waves» [arxiv.org/abs/1407.2164].

4. Sabemos que una de las dos estrellas de neutrones es un púlsar porque recibimos sus pulsos de radio. También la otra podría serlo, pero si es así, emite los pulsos en otra dirección.

5. Comentario de Kip Thorne al autor.

6. Muchos de los avances técnicos que incorporaba LIGO Avanzado se habían desarrollado en el detector GEO 600, en Hannover, Alemania. Aunque su tamaño mucho menor (brazos de 600 metros) limita su sensibilidad por debajo de la necesaria para esperar detecciones reales, GEO 600 forma parte de la Colaboración Científica LIGO desde su comienzo y ha realizado contribuciones muy importantes.

7. De hecho, en las frecuencias a las que era más sensible podía llegar al decimal 22.

Capítulo 16

1. J. Chu, «Q&A: Rainer Weiss on LIGO's origins», *MIT News*, 11 de febrero de 2016.

2. La distancia entre los espejos de LIGO se ajusta, de hecho, de manera opuesta a como lo hemos descrito: de forma que haya oscuridad cuando no pasa una onda. El motivo para ello es el mismo por el que distinguimos mejor una lucecita en la penumbra que una mancha oscura bajo una luz cegadora.

3. ¿Se han dado cuenta? No necesitamos el tiempo total que tarda la luz en hacer el viaje, sino que nos basta con medir las variaciones en este tiempo, lo que es mucho más sencillo. Lo mismo ocurre con nuestros sentidos: cuando escuchamos un instrumento pocos saben decir cuál es la nota concreta que suena, pero a todos nos es fácil percibir si esa nota varía.

4. Aparte de los artículos científicos de la colaboración, la revista semestral de la colaboración científica *LIGO Magazine* [disponible en <http://www.ligo.org/magazine/>], es una fuente excelente de información semitécnica. El primer número (septiembre de 2012) da una buena idea de las mejoras que hicieron de LIGO Avanzado un instrumento de tan altísima sensibilidad.

5. La señal también aumenta si empleamos luz de la longitud de onda más corta posible. Es como tener un reloj que hace «tic» más rápidamente, lo que permite notar más fácilmente sus variaciones. Sin embargo, este requisito tiende a entrar en conflicto con tener un láser continuo, potente y estable.

6. Hay una limitación: el brazo no ha de exceder la mitad de la longitud de la onda que se quiere detectar (¿sabemos explicar por qué?).

7. Para lograr este fin, Weiss había sugerido un diseño conocido como «línea de retardo» (*delay line*), pero Drever propuso otro más eficiente, la «cavidad de Fabry-Perot», que es el que LIGO incorpora.

8. Estos péndulos oscilan mucho más lentamente que la onda que pasa, por lo que los espejos se comportan de manera efectiva como masas libres.

Capítulo 17

1. Si estuviésemos muy cerca del suceso, la violencia de la distorsión espacial nos rompería en pedazos. Sin embargo, bastaría con que nos alejásemos unos cuantos miles de kilómetros para que ni siquiera nuestros tímpanos —los mejores detectores de vibraciones en nuestro cuerpo— llegasen a percibir nada. Pese a que la frecuencia de estas ondas está en el rango de lo audible, la potencia de las vibraciones se atenúa rápidamente al alejarnos.

2. Entérate, George Lucas: *esto* es el poder del lado oscuro de la fuerza, y no lo que pueda hacer un samurái disfrazado de monja.

3. El número 8 de *LIGO magazine* (marzo de 2016), dedicado al descubrimiento, contiene una cronología detallada de la detección.

4. Más de la mitad de los miembros de la colaboración científica LIGO son estudiantes (de grado o doctorado) e investigadores posdoctorales.

5. La historia de la falsa señal conocida como el «Gran Perro» (ya que aparentaba provenir de la constelación *Canis Major*) está documentada en H. M. Collins, *Gravity's Ghost and Big Dog*, University of Chicago Press, Chicago, 2013.

Capítulo 18

1. España contribuye al desarrollo de este proyecto desde que Alberto Lobo, pionero de la astronomía gravitatoria en nuestro país, entró a formar parte de la misión *LISA Pathfinder*. Poco antes de su prematuro fallecimiento nos dejó un bonito y recomendable libro: *LISA, una historia viva*, Iniciativa Digital Politècnica, 2011. El grupo que creó en el Institut de Ciències de l'Espai (ICE) en Barcelona continúa en la actualidad su labor bajo la dirección de Carlos F. Sopuerta.

2. Bajo el nombre de energía oscura se suelen agrupar todas las propuestas que involucran componentes similares de energía y tensión para explicar la aceleración de la expansión del universo.

3. D. Deutsch, *El comienzo del infinito: Explicaciones que transforman el mundo*, Biblioteca Buridán, Vilassar de Dalt, 2012.

4. El control activo del paso del tiempo (el GPS es tan solo una aplicación pasiva), gravitatoriamente o por efecto de la velocidad, es hoy en día posible, pero su utilidad es extremadamente limitada. Podría llegar a ser la primera de estas posibilidades en hacerse realidad con un impacto práctico.

Suplemento E

1. ¿Exactamente qué queremos decir con esto: su diámetro, su radio o alguna otra medida? Si decimos que la masa de un objeto es igual al radio del agujero negro equivalente, entonces la masa de la Tierra es aproximadamente un centímetro y la del Sol tres kilómetros; estos son los radios de las esferas dentro de los que habría que comprimirlos para que se conviertan en agujeros negros. Pero con esta elección, las ecuaciones toman en realidad la forma $G = 4\pi T$. El que aparezca un número u otro (1 o 4π) en estas ecuaciones es algo tan poco importante como la diferencia entre medir las distancias en kilómetros, millas terrestres o millas marinas, y podemos sin problema pasar a $G = T$ con una definición de unidades ligeramente distinta (no el radio, sino 4π veces el radio). En los suplementos tomamos las unidades de masa más habituales, basadas en el radio del agujero negro correspondiente.

Suplemento H

2. B.P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), «Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger», *Phys. Rev. Lett.* 2016; 116: 061102.

* LIGO: *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*, es decir, observatorio de ondas gravitatorias por interferometría de láser. Para parecer sofisticados lo pronunciaremos a la inglesa: «laigo».

* En el suplemento E damos una explicación más sutil de cómo las ecuaciones logran expresar esta conexión entre geometría y materia.

* Lo calculamos en el suplemento G.

* *Laser Interferometer Space Antenna*: antena espacial de interferómetro de láser.

Iluminando el lado oscuro del universo

Roberto Emparan García

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal)

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra.

Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

© 2018, Roberto Emparan García

© Editorial Planeta, S. A., 2018

Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)

www.editorial.planeta.es

www.planetadelibros.com

Diseño de la cubierta: Mauricio J. Restrepo

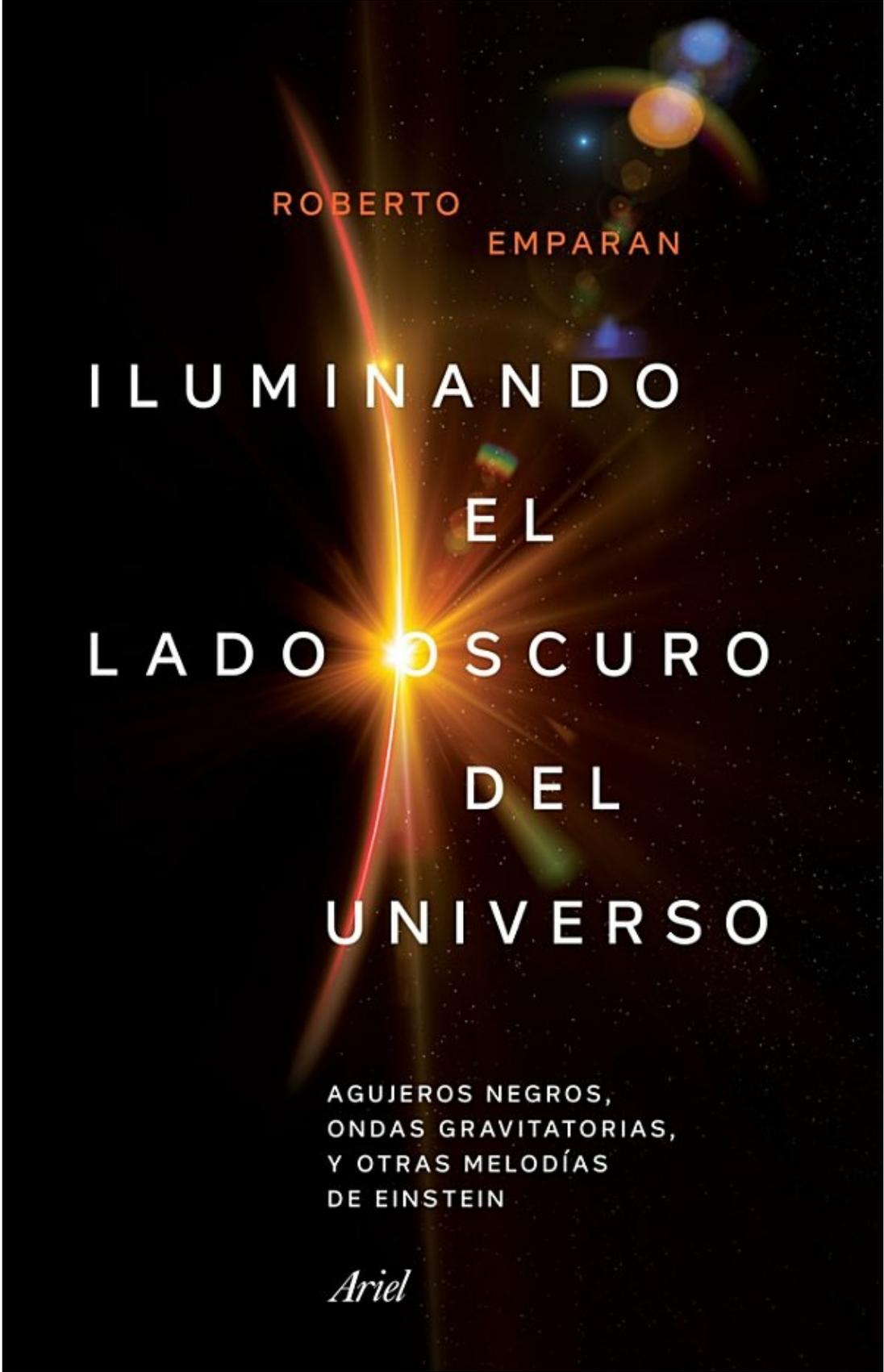
Imagen de cubierta: Shutterstock

Primera edición en libro electrónico (epub): febrero de 2018

ISBN: 978-84-344-2751-8 (epub)

Conversión a libro electrónico: Newcomlab, S. L. L.

www.newcomlab.com

The book cover features a dark, starry background with a prominent starburst and lens flare effect in the center. The text is arranged in a clean, modern layout. The author's name is at the top, followed by the title in large, spaced-out letters, and a subtitle at the bottom. The publisher's name is at the very bottom.

ROBERTO
EMPARAN

ILUMINANDO
EL
LADO OSCURO
DEL
UNIVERSO

AGUJEROS NEGROS,
ONDAS GRAVITATORIAS,
Y OTRAS MELODÍAS
DE EINSTEIN

Ariel