Relatividad General. La teoría más bella cumple cien años

Posted on 3 de marzo de 2016 by Jorge Velasco

El 25 de noviembre de 1915, Albert Einstein dio la última de las cuatro conferencias (a razón de una por semana, empezando el día 4) a que se había comprometido con la Academia de Ciencias de Prusia sobre la teoría de la gravitación, en la que estaba trabajando desde hacía casi diez años. Ese día, cuando presentó en público las ecuaciones *finales* de la teoría de la relatividad general (TRG)Albert Einstein, «Zur allgemeinen Relativatstheorie», *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1915, II, pp. 831-839 [se trata de la última de las cuatro conferencias, con las ecuaciones finales, publicada el 2 de diciembre]; Albert Einstein, «Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie», *Annalen der Physik*, vol. 49 (1916), p. 769., ha pasado a ostentar el estatus de fecha fundacional de la teoría.

Pero lo más importante en la celebración no es su importancia histórica –con serlo–, sino que las ecuaciones *siguen siendo válidas en la actualidad* y constituyen, junto con las de la Física Cuántica, las dos bases de la Física contemporánea. Podemos afirmar que *la centenaria goza de excelente salud*, como lo corroboran las pruebas que presentaré posteriormente. Lejos quedan –afortunadamente– las palabras de Max Born, gran amigo de Einstein, uno de los fundadores de la Mecánica Cuántica y premio Nobel de Física en 1954, cuando en 1955 dijo: «Los fundamentos de la Relatividad General me parecían entonces, y todavía hoy, como la mayor hazaña del pensamiento humano en lo referente a la Naturaleza, la conjunción más asombrosa de penetración filosófica, intuición física y habilidad matemática. Pero sus lazos con la experiencia eran débiles. Me seducía como una gran obra de arte que se debe apreciar y admirar a distancia». Born tenía razón en que la concepción radicalmente nueva de la estructura del espacio-tiempo de la TRG estuvo durante largo tiempo al margen del desarrollo principal de la Física. Apenas un par de confirmaciones, completamente desconectada de los extraordinarios progresos logrados entretanto gracias a la aplicación de la teoría cuántica a la física de partículas. Pero, a partir de los años sesenta, las tornas cambiaron a medida que el progreso de las técnicas de detección iba descubriendo que el Universo se hallaba poblado de objetos fascinantes que desafiaban la imaginación y que la TRG lograba explicar, como los agujeros negros o las ondas gravitacionales. ¡Se acabó la marginación! Asociada a la Física Cuántica de partículas, nos ha permitido disponer de una visión global del origen y evolución del Universo como nunca hubiéramos soñado. Born

acertaba igualmente en la belleza intrínseca de la TRG. Sin temor a equivocarme, creo que el sentir de los físicos es prácticamente unánime: la centenaria también se mantiene como la más bella, consideración que nunca ha perdido desde su aparición.

El origen de la TRG y su situación actual, teórica y experimental, son el motivo central del presente texto. Pero, antes de concluir, diré unas palabras sobre sus relaciones con la teoría cuántica, el mayor desafío de la física fundamental contemporánea, además de hacer unas breves consideraciones sobre su belleza, su verdad y su futuro.

Volvamos al 25 de noviembre de 1915. Aquel día, Albert Einstein debió de sentirse embargado por un doble sentimiento: de satisfacción y de alivio. Que tuvo que ser, en ambos casos, enorme. ¿Las razones? Ahora vienen.

El tiempo no es universal: la teoría de la relatividad especial Anthony P.French , *Special Relativity*, Nueva York, Norton, 1968; Eduard Massó, *Curs de relativitat especial*, Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona, 1998; David Mermin, *It's About Time. Understanding Einstein's Relativity*, Princeton, Princeton University Press, 2009.

En su *annus mirabilis* (1905), Einstein publicó cuatro artículos que influyeron decisivamente en la Física posteriorAntonio Ruiz de Elvira (ed.), *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, Madrid,Nivola, 2004.. Cada uno de ellos merecedor de un premio Nobel, un honor –en 1922– que correspondió al que explicaba el efecto fotoeléctrico. En el que nos concierne aquí (*Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*) formuló la teoría de la relatividad especial que alteró nuestras concepciones de espacio y tiempo.

Se sabe –al menos desde la época griega– que para describir el movimiento de un objeto hace falta un segundo objeto, al que aquél se refiere. Así, un coche o un tren se mueven con relación a la superficie terrestre; un planeta o un cometa, con relación a las estrellas visibles. Este segundo objeto lo denominamos *sistema de coordenadas*. La forma de las leyes de la Mecánica, tal como las expresó Newton en su *opus magnum*, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*Isaac Newton, *Principios matemáticos de la filosofía natural*, trad. de Eloy Rada, Madrid, Alianza, 1987. en 1687, se refieren a un sistema de coordenadas particular, llamado *sistema inercial*. Este sistema no está determinado unívocamente: cualquier sistema inercial que se mueve uniformemente y en línea recta con respecto a un sistema inercial es, a su vez, un sistema inercial. Hay, pues, infinitos sistemas inerciales. El hecho de que las ecuaciones de la mecánica tengan la misma forma en todos los sistemas inerciales se llama *principio de la relatividad galileana*.

Ahora bien, ¿cómo saber si un sistema de coordenadas arbitrario es inercial o no? ¿Qué criterio debemos seguir? Newton responde diciendo que *existe un espacio absoluto* y que los sistemas inerciales son aquellos que están en reposo, o se mueven con velocidad uniforme, respecto a aquél. El espacio sería como una inmensa caja que contendría el universo entero. Los objetos se mueven a través de él. Sobre qué podría ser este espacio nada dijo. Esta idea fue rechazada por su gran rival, Leibniz, que argumentó que era un concepto innecesario, y que sólo eran relevantes las relaciones entre cuerpos materiales. La cuestión alimentó la polémica entre físicos y filósofos durante los siguientes siglos. Einstein fue deudor, sobre todo, de las ideas del austríaco Ernst Mach, quien sostenía que los sistemas inerciales los determinaba la masa de la Tierra y los otros cuerpos celestes. El debate, realmente, no está aún cerrado.

En el siglo XIX, James Clerk Maxwell unificó las leyes de la electricidad y del magnetismo, formulando, con ayuda del concepto de campo introducido por Michael Faraday, la teoría electrodinámica, que completaría luego Hendrik Antoon Lorentz. Este campo de Faraday, en el que el electromagnetismo ejercía su acción, llenaba el espacio, vibraba, oscilaba y transportaba la fuerza eléctrica. La velocidad de la luz en el vacío era una constante universal, que se propagaba a través de un supuesto medio, que se llamó *éter*. Pero, a diferencia de lo que ocurría con la Mecánica, las ecuaciones de la *Electrodinámica no eran válidas en todos los sistemas inerciales*, sino sólo en aquellos en reposo respecto al éter. El fracaso de todos los intentos de medir la velocidad de la Tierra –como el experimento, empleando técnicas de interferometría de la luz, de Albert Abraham Michelson y Edward Morley en 1887Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, Nueva York, John Wiley, 1972.– respecto al éter comportaban una contradicción entre las dos grandes teorías: la Mecánica newtoniana y la Electrodinámica de Maxwell-Lorentz.

Einstein solucionó el problema con dos principios. *El principio especial de la relatividad*, que generaliza la noción de sistema de coordenadas inercial: cualquier ley universal natural (incluyendo la electrodinámica) debe ser válida en *todos los sistemas inerciales*. El segundo principio afirma que *la velocidad de la luz es constante en el vacío* (sea cual sea el estado de movimiento de la fuente de luz o del observador, como habían mostrado Michelson y Morley). ¿De dónde viene la confianza de los físicos en este principio? De los éxitos obtenidos por la electrodinámica de Maxwell-Lorentz.

La reconciliación lógica de ambos principios, que comportaron una revisión de la Mecánica newtoniana que no los satisfacía, se conoce como *teoría especial de la relatividad*. En palabras del maestro, «La teoría especial de la relatividad fue sencillamente un desarrollo sistemático de la electrodinámica de Maxwell y Lorentz». Sus consecuencias espectaculares e imprevistas chocan con el sentido común al modificar nuestra comprensión del espacio y

del tiempo. Al igual que el espacio, Newton consideró el tiempo como otra noción absoluta: dos observadores cualesquiera, independientemente de la distancia entre ellos y de su velocidad relativa, asignan el mismo tiempo a cualquier suceso. Subyace a la idea la posibilidad de que los dos observadores puedan intercambiar señales instantáneamente. Como demostró Einstein, la finitud de la velocidad máxima posible, la de la luz, lo impide. Carece, pues, de sentido hablar de la simultaneidad de dos sucesos *en general*; sólo podemos hacerlo *en relación con un sistema concreto de coordenadas*. Observadores que se muevan con velocidades diferentes medirán distintas duraciones temporales. Así, un reloj que se mueva con relación a otro fijo irá más *lento* que éste (medidos ambos desde el sistema de referencia del fijo). Algo parecido sucede con las longitudes: un cuerpo en movimiento medirá *menos* (en la dirección paralela al movimiento relativo; en la perpendicular permanece invariable) que uno en reposo. Estos efectos sólo empiezan a ser apreciables cuando las velocidades se aproximan a las de la luz. Si asumimos que un avión viaja a una velocidad del 99,999999% de la velocidad de la luz (como hacen los protones en el acelerador de partículas LHC del CERN a su máxima energía), un intervalo de tiempo de 1 segundo medido en la cabina será de 2 horas medido en tierra, y la distancia de 30 metros entre la punta y la cola del avión dará 4,3 milímetros medida en tierra. En cuanto a la conclusión principal, Einstein lo tenía muy claro: «El resultado más importante concierne a la masa inercial [...]. La inercia de un sistema depende necesariamente de su contenido en energía, lo que lleva directamente a la noción de que la masa inercial es sencillamente energía latente. El principio de conservación de la masa pierde su independencia y se funde con el de la conservación de la energía»Conferencia ante la Asamblea Nórdica de Naturalistas (Gotemburgo, 11 de julio de 1923), erróneamente designada a veces como la conferencia del premio Nobel, que Einstein nunca dio.. Es decir, la archiconocida ecuación $E = mc^2$, que fue el objeto de su cuarto artículo, en septiembre de 1905. ¡Cuán lejos estaba de imaginar las posibilidades futuras que habría de permitir su descubrimiento!

Hermann Minkowski, profesor de Einstein en Zúrich, elaboró el formalismo geométrico de la teoría, exponiéndolo así en su alocución del 21 de noviembre de 1908 ante la 80ª Asamblea de físicos y científicos naturales de Alemania: «Las ideas del espacio y el tiempo que deseo exponerles han brotado del suelo de la Física experimental, y ahí reside su fuerza. Son radicales. En lo sucesivo, el espacio por sí mismo, y el tiempo por sí mismo, están condenados a desvanecerse en meras sombras y sólo un tipo de unión de ambos mantendrá una realidad independiente». Comentario de Julian Schwinger (Nobel de Física en 1965): «Ampuloso, pero memorable»Julian Schwinger, *Einstein's Legacy*, Nueva York, Scientific American Library, 1986, p. 70.. Había nacido el *espacio-tiempo* (tres dimensiones espaciales, una temporal).

El espacio es curvo: la teoría de la relatividad general La exposición más completa que ha dado el creador (sin incluir consideraciones biográficas o históricas) se encuentra en Albert Einstein, *The Meaning of Relativity*, Princeton, Princeton University Press, 1967 (existe traducción española: *El significado de la relatividad*, trad. de Carlos E. Prélat, Madrid, Espasa-Calpe, 1971). Contiene las Stafford Little Lectures de mayo de 1921 en la Universidad de Princeton, con anexos posteriores.

Volvamos a nuestro admirado Newton. Para explicar por qué las manzanas caen de los árboles (y los planetas giran alrededor del Sol), imaginó la existencia de una fuerza atractiva que todos los cuerpos materiales ejercerían unos sobre otros y que llamó *gravitacional*. Sobre cómo funcionaba entre cuerpos alejados unos de otros se cuidó mucho de aventurar hipótesis. Además, su fórmula suponía que la acción atractiva entre los cuerpos se ejercía instantáneamente, lo que, como hemos dicho, la relatividad especial no permite.

Volvamos ahora a nuestro admirado Einstein. Por un lado, buscaba generalizar el proceso que lo llevó a la relatividad especial. Por ejemplo, la extensión al caso de un observador que se halla en rotación o con aceleración respecto de otro y no sólo en movimiento uniforme. ¿Por qué tiene que haber sistemas privilegiados de referencia como los inerciales? ¿Qué tiene que ver la naturaleza con nuestros sistemas de coordenadas y sus estados de movimiento? ¿No es posible encontrar una expresión de las leyes que sea completamente independiente en su formulación de la elección de un sistema concreto? A esta idea la llamó *el principio de relatividad general*.

Gracias a una experiencia singular en 1907, que posteriormente calificaría como «el pensamiento más feliz de mi vida», encontró la solución: «Estaba sentado en mi silla en la Oficina de Patentes de Berna cuando repentinamente me vino una idea […]. Si una persona se halla en caída libre, no notará su propio peso». (Einstein se inserta aquí en la estela legendaria de los más grandes: Arquímedes en su bañera descubriendo el principio hidrostático que lleva su nombre; Galileo dejando caer objetos de tamaños y composiciones diferentes desde la torre inclinada de Pisa; Newton concibiendo la ley de la gravitación universal ante la caída de una manzana; o James Watt inventando la máquina de vapor tras observar un chorro de vapor saliendo de un calentador de agua.)

Que el origen sea la observación real o imaginada de una persona cayendo del techo de un edificio cercano a la oficina donde trabajaba es lo de menos. Prosigamos pensando con Einstein, empleando sus propias imágenes. Nos hallamos haciendo experimentos con objetos en un laboratorio que, como un ascensor, puede subir y bajar verticalmente. Si está sujeto de manera que permanece fijo respecto de la Tierra, cualquier objeto en su interior caerá hacia el suelo con la aceleración de la gravedad, cualquiera que sea su masa o composición

material. Si ahora dejamos también caer el laboratorio bajo la acción de la gravedad, los objetos permanecerán fijos con relación al laboratorio, ya que ninguno se acelerará con respecto a él. Todo sucede como si la fuerza de la gravedad no existiese. Hoy en día, esta observación la hacen cotidianamente los astronautas a bordo de la Estación Espacial Internacional, que, al igual que la Luna, «cae» constantemente hacia la Tierra en su órbita. Localmente, gravedad y aceleración son equivalentes. La conclusión era inevitable: ambos fenómenos deben tener una causa común. Einstein llamó a esta hipótesis *Principio de la equivalencia entre fuerza gravitatoria y fuerza de inercia* o, más brevemente, el *Principio de equivalencia*.

Experimentos muy precisos habían mostrado que la *masa inercial* de un cuerpo (la resistencia al cambio de velocidad en relación con un sistema inercial, que aparece en la segunda ley de Newton) y la *masa gravitatoria* (la fuerza de atracción que experimenta una masa respecto de las demás, tal como se calcula con la ley de la gravitación de Newton) eran –dentro de los errores de medida– iguales. Por ejemplo (fue el experimento que hizo Newton), si ambas fuesen distintas, péndulos de igual longitud y distinta composición oscilarían con distinta frecuencia, lo que no ocurría. El principio de equivalencia implica que ambas tienen *necesariamente* que ser idénticas. ¡Extraordinario cambio de situación! Lo que parecía una coincidencia inexplicable, hasta para el gran Newton, pasaba a ser la base de la nueva teoría. Pero una cosa es tener una intuición genial y otra es elaborar, a partir de ella, una teoría consistente que dé cuenta de los fenómenos y sea capaz de predecir otros nuevos.

La gravitación no está en el espacio, como pensaba Newton: *el campo gravitacional es el espacio*

En palabras de Einstein, «El camino fue mucho más espinoso de lo que uno podía imaginar, porque exigía abandonar la geometría euclídea. Es decir, las leyes que indican cómo los cuerpos sólidos se distribuyen en el espacio no concuerdan con lo que dice la geometría euclídea. Esto es lo que queremos decir cuando hablamos de "curvatura del espacio". Los conceptos fundamentales de "línea recta", "plano", etc., pierden su significado preciso en Física. En la Teoría General de la Relatividad, la doctrina del espacio y el tiempo, o cinemática, ya no es independiente del resto de la Física. El comportamiento de los cuerpos y el movimiento de los relojes depende de los campos gravitatorios que, a su vez, son producidos por la materia». Albert Einstein necesitó ocho años, en los que académicamente fue escalando posiciones, desde la Universidad de Berna (1908) a la de Zúrich (1909), de la Universidad Alemana de Praga (1911) a la Escuela Politécnica de Zúrich (1912-1914), para concluir –gracias a los esfuerzos de su admirador Max Planck– en el pináculo académico en Berlín como director del Instituto de Física Teórica Emperador Guillermo (1914-1932), profesor de la Universidad Humboldt (sin obligaciones docentes), miembro de la Academia de

Ciencias de Prusia y presidente de la Sociedad Alemana de Física (1916-1918).

El descubrimiento de un cuaderno de notas que empezó a escribir en 1912 en Zúrich, de ochenta y cuatro páginas, hoy día conservado en los Archivos Einstein en la Universidad Hebrea de Jerusalén, lleno de símbolos y ecuaciones, revela el tortuoso camino que recorrió hasta lograr la formulación definitiva de la TRG. En 1912, Einstein tenía las ideas bastante claras. Su problema era encontrar las ecuaciones correctas para describir dos procesos interconectados. Por un lado, determinar cómo el campo gravitatorio actúa sobre la materia diciendo cómo debe moverse; por otro, determinar cómo la materia produce campos gravitatorios en el espacio-tiempo, haciéndolo curvarse. Imaginemos una cama elástica sobre la que disponemos bolas que, según su tamaño, hundirán el espacio alrededor más o menos, formando como embudos. Si lanzamos horizontalmente una bola muy pequeña, se desplazará siguiendo una trayectoria que dependerá de las ondulaciones creadas por las otras en la cama, hasta acabar deteniéndose en el hueco tipo embudo creado por una de las bolas, sin que la haya atraído ninguna misteriosa fuerza ejercida por ésta. La gravitación no es ninguna fuerza. El espacio-tiempo se curva bajo la influencia de la materia y los objetos se desplazan siempre siguiendo las líneas más *cortas* en ese espacio, llamadas geodésicas. La gravitación no está en el espacio, como pensaba Newton: *el campo gravitacional es el espacio*. Es un componente más del mundo que puede plegarse, oscilar, curvarse, retorcerse, como una gigantesca y flexible concha de caracolCarlo Rovelli, *Seven Brief Lessons of Physics*, Londres, Allen Lane, 2015, p. 6..

¿Cómo describir la curvatura del espacio-tiempo? En el siglo XIX, Carl Friedrich Gauss y su discípulo Bernhard Riemann habían logrado capturar las propiedades de los espacios curvos gracias a un objeto matemático llamado –hoy– curvatura riemanniana. Einstein debía trasponer el concepto al espacio-tiempo. Además, como sus ecuaciones debían describir movimientos, tenían que ser ecuaciones diferenciales. Resumiendo, y en lenguaje técnico: debía definir un cálculo diferencial para una superficie no euclídea del espacio-tiempo, más tarde llamado cálculo tensorial (los tensores son una generalización de los vectores). Desesperado, recurrió a su gran amigo, el matemático Marcel Grossmann: «Grossmann, tienes que ayudarme, o me volveré loco»Albert Einstein y Marcel Grossmann, «Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation» [Esbozo de una Teoría Generalizada de la Relatividad y de una Teoría de la Gravitació]), *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, vol. 62 (1913), pp. 225–261.. Juntos publicaron en 1913 un bosquejo de la teoría general de la relatividad. Aunque todavía no estaba en lo cierto, ya faltaba muy poco para lograrlo.

A comienzos de 1915, Einstein fue a Gotinga, centro de las matemáticas de la época, para dar seis charlas sobre sus trabajos. En la audiencia estaba David Hilbert, el matemático vivo

más prestigioso. Al acabar, Einstein anotó con satisfacción que había logrado interesarle por su teoría. El entusiasmo se transmutaría enseguida en preocupación. Para empezar, Hilbert se había dado cuenta de que la teoría era incorrecta. Además, decidió sumarse a la carrera para hallar las buenas ecuaciones, convirtiéndose en su gran rival. Dicho y hecho: el 20 de noviembre envió a la Academia de Ciencias de Gotinga sus resultados bajo el título *Los fundamentos de la Física*. Entretanto, Einstein estaba enfrascado con sus conferencias ante la Academia de Ciencias de Prusia, luchando a brazo partido para encontrar la formulación precisa de su teoría, siempre temeroso de que Hilbert se le adelantase. En la tercera –el 18 de noviembre– hizo un descubrimiento extraordinario que lo convenció de que iba por el buen camino. Sus ecuaciones le proporcionaron el resultado correcto de un problema irresoluble con la teoría de Newton: el avance del perihelio de Mercurio, descubierto por el astrónomo Urbain Le Verrier en 1859. Los cálculos detallados efectuados por Simon Newcomb en 1882 siguen siendo válidos hoy en día: 43 segundos de arco por siglo. Su angustia y preocupación por la competición con Hilbert dio paso a una gran exaltación. Este descubrimiento fue, quizá, la experiencia emocional más fuerte que tuvo en su vida: la naturaleza le había hablado. ¡Tenía que estar en lo cierto! «Durante varios días estuve fuera de mí, entusiasmado». Curiosamente, en apenas media página, despachaba su segundo descubrimiento, el que le abriría las puertas de la fama cuatro años más tarde: el valor de la curvatura de los rayos de luz por la acción de la masa del Sol. Aunque no son necesarias para la comprensión de este artículo, escribiré las ecuaciones finales de manera compacta tal como aparecen en los libros, artículos y camisetas:

En la parte izquierda tenemos los objetos que definen la geometría del espacio-tiempo: el tensor de curvatura de Ricci $R_{?v}$ el escalar de curvatura de Ricci R y el tensor métrico $g_{?v}$ En la derecha, el contenido de materia y energía dado por el tensor $T_{?v}$. En cuanto a G, se trata de la constante de la gravitación universal que aparece en la ley de Newton, mientras que c es la velocidad de la luz. Al término $(R_{?v} - 1/2\ Rg_{?v})$ se le llama tensor de Einstein y se representa por $G_{?v}$ quedando las ecuaciones

¡No nos dejemos engañar por su forma compacta! Son realmente muy complicadas. Dada una distribución de materia y energía, cuando se las desarrolla forman un conjunto de diez ecuaciones en derivadas parciales, acopladas y no lineales. Su comprensión y manipulación exigen años de estudio y bastante habilidad matemática. Existen excelentes libros para el lector interesado en profundizar en su conocimientoJohn Archibald Wheeler, *A Journey into Gravity and Spacetime*, Nueva York, Scientific American Library, 1990; Charles W. Misner, Kip

S. Thorne y John Archibald Wheeler, Gravitation, Nueva York, W. H. Freeman, 1973; Robert M. Wald, *General Relativity*, Chicago, The University of Chicago Press, 1984; Bernard Schutz, *A First Course in General Relativity*, 2ª ed., Cambridge, Cambridge University Press, 2009..

La revolución científica einsteniana estaba completa. Desde los días de Newton, el espacio y el tiempo componían un escenario fijo en el interior del cual la materia y la energía evolucionaban como los actores en un teatro. Con la TRG, el escenario también se pasaba al elenco de actores y el mundo que iba a revelar era imposible imaginárselo entonces. Nosotros hemos tenido la suerte de disfrutar de los asombrosos tesoros que han ido apareciendo: la expansión del universo, agujeros negros, estrellas de neutrones, ondas gravitacionales, energía oscura… Un mundo lleno de color, energía, movimiento, sorprendente e increíble que cada día nos depara nuevos misterios para ser explorados.

Se atribuye a Thomas Edison la frase según la cual el genio es un 1% de inspiración y un 99% de transpiración. Apliquémoslo a Einstein: tuvo una inspiración un día de 1907 que le llevó a concebir el principio de equivalencia; luego trabajó ocho años hasta obtener sus ecuaciones. Casi tres mil días. Dividiendo 1 entre 3000 se obtiene tres por diez mil. Podemos concluir que Edison era mucho más genial que Einstein o que crear la TRG fue mucho más difícil que inventar la lámpara eléctrica o el fonógrafo. O, más en serio, comprobamos cómo los grandes descubrimientos científicos o inventos son esencialmente el fruto de un esfuerzo denodado y obstinado, como ocurre asimismo con las grandes creaciones artísticas.
¿Eh? ¿Qué pasó con Hilbert? ¿No envió sus ecuaciones para publicar cinco días antes que Einstein diese su cuarta conferencia? ¡Ya me gustaría a mí también saberlo! Existen discrepancias entre especialistas que no se han solucionado a día de hoy. Por mi parte, me atengo a la declaración de la Sociedad Max Planck, que, con motivo de disputas en las que participaron destacados historiadores de la ciencia, incluidos algunos de sus miembros, y que adquirieron un tinte excesivamente polémico que llegó a las descalificaciones personales, emitió un comunicado afirmando que «La Sociedad Max Planck no tomará posición en la controversia científica sobre la prioridad de Einstein o de Hilbert»Max Planck Gesellschaft, comunicado de 14 de septiembre de 2006.. Por mi parte, remito al lector a las biografías recientes de Einstein que tratan el asuntoJürgen Neffe, *Einstein. A Biography*, Nueva York, Farrar, Straus and Giroux, 2007; Walter Isaacson, *Einstein. His Life and Universe*, Nueva York, Simon & Schuster, 2007.. Si nos atenemos a la actuación de nuestros héroes, retengamos la frase que Hilbert colocó en la versión final de su artículo: «Einstein ha hecho el trabajo, no los matemáticos». Y Einstein, ante la propuesta de Hilbert de nombrarlo miembro de la Real Sociedad de Ciencias de Gotinga, respondió: «Pienso de nuevo en usted con simpatía y le pido que haga lo mismo conmigo. Objetivamente, es lamentable que dos personas que han logrado situarse por encima de este mundo mezquino no se puedan

reconfortar uno al otro».

El eclipse solar de 1919: Einstein, una estrella mediática

Einstein había basado su derivación de la TRG en argumentos lógicos de sencillez y generalidad. Surgió la cuestión de saber si la teoría predecía fenómenos nuevos, diferentes de los de la newtoniana, lo que serviría de línea de demarcación crucial entre ambas. Desde un punto de vista matemático y lógico, su teoría era muy atractiva. Pero para los astrónomos planeaba la duda de si no sería una fantasía, bella, pero fantasía. Encontró tres tests, hoy conocidos como «los tests clásicos», en los que la curvatura del espacio-tiempo desempeñaba un papel importante, uno de los cuales se conocía. Los otros dos eran totalmente nuevos: nunca se habían observado, ni siquiera imaginado. Su verificación probó el rigor de la teoría. Con lo que sabemos ahora y luego describiremos en otro apartado, es posible añadir un cuarto test (y tercero totalmente nuevo): la existencia de las ondas gravitacionalesAlbert Einstein, «Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation», *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1916, I, pp. 688-696; Albert Einstein, «Gravitationswellen», *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1918, I, pp. 154-167..

Pasemos al primero. ¿Había observaciones celestes en desacuerdo con la teoría de Newton? Encontró sólo una: el avance del perihelio de Mercurio. Irresoluble con la teoría newtoniana, la TRG lo predijo exactamente. Gran tanto a favor de Einstein.

Vayamos al segundo. Desde 1911, cuando estaba en Praga, Einstein había sido consciente de la curvatura de los rayos de luz al pasar cerca del Sol y concibió una posible verificación de sus ideas: un rayo proveniente de una estrella lejana en línea recta sería desviado al pasar cerca del campo gravitacional del Sol. En 1914 encontró el apoyo y dinero necesarios para llevar a cabo esta observación. Erwin Freundlich, un astrónomo del Observatorio de Berlín, dirigiría las medidas durante un eclipse solar visible desde Crimea. Cuando comenzó la Primera Guerra Mundial, Freundlich y miembros de su expedición fueron arrestados por espías; el asunto se fue al garete.

En Inglaterra la nueva teoría suscitó gran interés. Por primera vez, una teoría seria podía destronar a la del rey Newton. En marzo de 1917, el Astrónomo Real indicaba que se produciría un eclipse total de Sol el 29 de marzo de 1919. Concluida la guerra, una expedición inglesa dirigida por Arthur Eddington, físico y astrónomo de Cambridge, realizó el experimento desde la isla de Príncipe, en el Atlántico, en la fecha prevista. Durante los 302 segundos del eclipse se tomaron dieciséis fotografías. Analizadas y discutidas, el resultado confirmó de manera brillante la TRG: los rayos luminosos son desviados por la gravedad del

Sol en la cantidad predicha.

El 6 de noviembre, el presidente de la Royal Society, Sir Joseph John Thompson (premio Nobel en 1905 por su descubrimiento del electrón), abrió la sesión en que se presentaron los resultados oficialmente con las palabras: «La teoría de Einstein es uno de los mayores monumentos del pensamiento humano». Un testigo de excepción, el lógico, matemático y filósofo Alfred North Whitehead, captó maravillosamente el carácter único del momento: «La atmósfera entera de intensa atención fue exactamente la de un drama griego […]. Formábamos el coro que comenta los decretos del destino, tal como los revela el suceso supremo […]. En segundo plano, el retrato de Newton nos recordaba que la mayor de las generalizaciones de la ciencia después de dos siglos recibía el primer golpe […]. Las leyes de la Física son los decretos del destino»Philipp Frank, *Einstein. His Life and Times*, Boston, Da Capo Press, 2002..

La resonancia mediática fue extraordinaria. Nunca en la historia se había dado un caso parecido. Todos los periódicos se esforzaron por presentar a sus lectores el contenido de la teoría en pocas palabras… sin conseguirlo. Los titulares de *The New York Times* son clásicos: «Los rayos de luz se tuercen en el cielo / Einstein triunfa / Las estrellas no están donde parecía o donde se había calculado, pero no hay que preocuparse». ¡Uf! De buena nos hemos librado. Había nacido el icono mediático científico del siglo XX.

Aunque había pasado un año desde al armisticio que puso fin a la Primera Guerra Mundial, los ecos del conflicto aún no se habían extinguido. En una entrevista realizada poco después, Einstein puso de manifiesto con su habitual ironía las connotaciones políticas de su éxito: «En Alemania me llaman un científico alemán y en Inglaterra un judío suizo. Si el destino me llevase a ser considerado un peligro, me convertiría en un judío suizo para los alemanes y en sabio alemán para los ingleses». Desgraciadamente, la realidad iba a darle la razón: cuando los nazis subieron al poder en 1933, sus teorías fueron prohibidas en Alemania y tuvo que abandonar su país para instalarse en Princeton, hasta su muerte.

¿Y el tercer test? Consistía en medir el desplazamiento hacia el rojo de la frecuencia de los rayos de luz en un campo gravitacional. O lo que es lo mismo: el tic-tac de un reloj varía según la posición que ocupa en un campo gravitacional. Era un efecto imposible de medir con la tecnología de la época. Robert Pound y Glen Rebka lograron realizarlo en 1959Robert Pound y Glen A. Rebka, «Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance», *Physical Review Letters*, vol. 3, núm. 9 (1 de noviembre de 1959), pp. 439-441., cuatro años después de la muerte de Einstein.

Nacimiento de la cosmología moderna

La TRG ha permitido el nacimiento de la cosmología moderna. De las especulaciones metafísicas de los filósofos a lo largo de los siglos hemos pasado, gracias a los instrumentos conceptuales proporcionados por la TRG, a describir y estudiar científicamente las propiedades globales del Universo, su estructura y evolución como un todo, llevando a cabo una auténtica revolución científica y cultural. El Universo deja de ser una pura idea para convertirse en un objeto físico, susceptible de estudio, de medida, definido por su geometría espacio-temporal y su contenido en materia y energía. Paralelamente, se produce un prodigioso desarrollo técnico, los telescopios devienen cada vez mayores y nos muestran un Universo más y más grande; Edwin Hubble descubre que existen innumerables galaxias además de la Vía Láctea y –en 1929– que las galaxias se alejan unas de otras con una velocidad que aumenta con la distancia. Hoy sabemos que lo que se desplaza es el espacio mismo llevándolas. Lo que obtenemos es una visión enormemente enriquecedora del Universo. Deja de ser un ente estático, impasible, para mostrársenos tremendamente dinámico y en constante evolución.

Pero no era así en 1917. Einstein, como la mayor parte de sus colegas, imaginaba el Universo de otra manera. La Vía Láctea era una isla aislada, rodeada por el espacio vacío que se extendía… ¿hasta el infinito? Pero la TRG predecía que, en tal caso, el Universo no podía ser estático, puesto que, al ser la gravedad atractiva, la materia acabaría colapsándose sobre sí misma. Para lograr un Universo estacionario y eterno, introdujo un término en sus ecuaciones, llamado luego *constante cosmológica*, ? la letra griega *lambda*), que representaba una fuerza *repulsiva* que contrarrestaba la atracción de la gravedad.

Las ecuaciones de Einstein se modificaban para escribirse



donde el término añadido $?g_{?v}$ contiene la constante cosmológica ?. Salvo evitar el colapso, este término no tenía contenido físico. Era, digamos, un simple apaño. No le gustaba mucho; en 1919 escribió que «perjudicaba gravemente la belleza formal de la teoría». Antes de Hubble, en 1927, el astrónomo belga Georges Lemaître desarrolló un modelo del Universo en expansión a partir de las ecuaciones de la TRG en las que mencionaba un *átomo primitivo*: el futuro Big Bang se dejaba entrever. «Sus cálculos son correctos, pero su física es abominable», exclamó Einstein. Para empeorar las cosas, el holandés Willem de Sitter había encontrado otra solución que describía un Universo en expansión…¡sin materia!, en contra de las ideas de su querido Ernst Mach, lo que gustó aún menos a Einstein.

Y, finalmente, tuvo que rendirse a la evidencia de los resultados de Hubble. El Universo no era estático: ¡fuera la constante cosmológica! George Gamow cuenta en su autobiografía que

Einstein le confesó que «introducirla había sido el mayor error cometido en mi vida»George Gamow, *My World Line. An Informal Autobiography*, Nueva York, Viking, 1970.. La expansión del Universo hubiera podido ser entonces otra maravillosa predicción su teoría…

Pero el error de Einstein lo era por partida doble. Por un lado, el Universo no era estático y no hacía falta ?. Por otro, porque cálculos detallados mostraron que el equilibrio que daba ? era muy inestable y la más mínima perturbación hubiera llevado al colapso, por lo que tampoco servía. ¡La historia no acaba ahí! Un gran descubrimiento sacudió el mundo científico en 1998Adam G. Riess *et al.*, «Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant»; Saul Perlmutter *et al.*, «Measurement of ? and ? from 42 High-Redshift Supernovae»; Adam G. Riess y Michael S. Turner, «The Expanding Universe: From Slowdown to Speedup». (sus autores obtuvieron el Nobel en 2011). El Universo se expande, cierto, pero lo hace ¡acelerándose!, *como si lo impulsase algo que actúa como si fuese una constante cosmológica*… La *energía oscura* había hecho su aparición, para ocasionar el mayor quebradero de cabeza actual a los físicos, pues representa ¡el 70% del contenido energético del Universo! ¿Cuanto más conocemos, menos sabemos? ¿O viceversa?

La pregunta queda en el aire: ¿no habrá vuelto a cometer Einstein otro error monumental *suprimiendo* la constante cosmológica?

La Relatividad General en campos gravitacionales fuertes: los agujeros negros Edwin F. Taylor y John Archibald Wheeler, *Exploring Black Holes*, Nueva York, Addison-Wesley Longman, 2000; José Luis Fernández Barbón, *Los agujeros negros*, Madrid, CSIC/Libros de la Catarata, 2014; Kip S. Thorne, *Black Holes and Time Warps. Einstein's Outrageous Legacy*, Nueva York, Norton, 1995.

Hasta el presente, la TRG ha resistido con éxito todos los tests a que se ha visto sometida. Pero todos se han producido en campos gravitacionales no demasiado fuertes. ¿Qué ocurriría en campos extremos? En la parte del Universo que hemos explorado con telescopios, en ningún lugar es tan fuerte como en las proximidades de un agujero negro. Lancémonos a su interior.

El segundo test clásico de la TRG se basaba en que el Sol curva los rayos de luz que pasan cerca debido a la influencia del campo gravitacional creado por su masa. Cuanto más masivo es un cuerpo, más *hundirá* el espacio alrededor, y el pozo creado será más profundo. Un agujero negro es un pozo tan profundo que todo lo que *caiga* en él no puede escaparse, ni siquiera la luz. La TRG asigna a cada cuerpo un radio crítico tal que, si toda la masa del cuerpo está dentro de una esfera con tal radio, dará lugar a un agujero negro. Así, el Sol, que

es una esfera cuyo radio mide 700.000 kilómetros tiene un radio crítico de ¡3 kilómetros! Y el radio crítico de la Tierra es de ¡1 centímetro! Las propiedades de los agujeros negros son tan asombrosas que se dudó de su existencia durante mucho tiempo. Son realmente bichos raros, tanto que Einstein nunca creyó en ellos. Las teorías son más grandes en posibilidades que lo que pudieron concebir sus creadores. Caben aquí las palabras de Wolfgang Pauli, autor de un maravilloso artículo publicado en la *Enciclopedia de Física* sobre la TRG cuando apenas tenía veintiún años, en el prólogo de una reedición con motivo del cincuentenario del *annus mirabilis* de Einstein: «Considero la teoría de la relatividad un ejemplo que muestra cómo un descubrimiento científico fundamental, en ocasiones contra la resistencia de su creador, da lugar a fructíferos desarrollos que siguen su propio curso autónomo»Wolfgang Pauli, *Theory of Relativity*, Londres, Pergamon Press, 1958..

Una vez formado, el agujero negro alcanza un estado de equilibrio caracterizado por dos parámetros: su masa y su espín (propiedad asociada a la masa y a la velocidad de rotación de un cuerpo sobre sí mismo). No tiene forma, composición química, color, lo que se expresa diciendo que «un agujero negro no tiene pelo». Pero es activo: ejerce o sufre la influencia de otros cuerpos, emite o absorbe energía, lo que permite detectar su existencia y estudiar sus propiedades. La superficie de un agujero negro no es una frontera sólida, sino una superficie que demarca una región *sin retorno*. Se llama horizonte de sucesos: más allá, nada se puede observar.

Diciembre de 1915. Einstein recibe un telegrama de un astrofísico alemán, Karl Schwarzschild, que está en el frente de combate ruso. Ha logrado resolver las ecuaciones de la TRG que describen el campo gravitacional alrededor de una estrella solitariaKarl Schwarzschild, «Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie», *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1916, I, pp. 189-196.. Lo más curioso, o sorprendente, es que a cierta distancia del centro de la estrella –luego conocida como radio de Schwarzschild, que no es otra cosa que el radio crítico mencionado más arriba–, las ecuaciones no son válidas. «Si el resultado es cierto, sería un desastre», respondió Einstein. En los años treinta, los físicos nucleares, estudiando cómo brillaban las estrellas quemando combustible nuclear, concluyeron que, dependiendo de su masa, al final de su vida podían colapsarse. Y remacharon el clavo Robert Oppenheimer y Hartland SnyderRobert Oppenheimer y Hartland Snyder, «On Continued Gravitational Contraction», *Physical Review*, núm. 56 (1 de septiembre de 1939), p. 455. en 1939, dotando de contenido físico al concepto de agujero negro al estudiar el colapso gravitacional de una nube de polvo: si la masa es grande, el colapso es inevitable. El artículo se publicó el día en que Alemania invadió Polonia, con lo que la atención se desvió hacia otros temas. Sobre Oppenheimer recaería la dirección científica del Proyecto Manhattan para construir la bomba

atómica y su éxito militar –Hiroshima y Nagasaki– tuvo un efecto boomerang favorable. El dinero fluyó abundantemente para la Física en la posguerra. En particular se abrió un nuevo campo –la radioastronomía– que descubrió objetos desconocidos para los telescopios ópticos en el Universo, generadores de potentísimas ondas de radio –equivalentes al de cientos de millones de estrellas en un volumen apenas mayor que el del Sol– que, a juzgar por su corrimiento al rojo de su luz, estaban muy lejanos. Los cuásares entraban en escena. El año: 1962.

Un joven matemático neozelandés prendió la llama que lanzaría a la TRG al primer plano de los avances de la Física tras cincuenta años de permanecer en estado somnoliento. Roy Kerr halló en 1963 una solución de las ecuaciones de Einstein que podían explicar el fenómeno cuásar: un agujero negro supermasivo. Su rotación crearía una región en el exterior del horizonte de sucesos en la cual la materia cercana caería hacia el agujero girando a velocidades enormes. Se crearían dos chorros a lo largo del eje de rotación, que serían observables como ondas de radio de cuásares. Lo importante del asunto es que, por primera vez, *la TRG era capaz de explicar nuevos fenómenos*.

Hubo una explosión de estudios y de medidas y podemos afirmar que la Relatividad General Experimental vivió un desarrollo extraordinario. Las nuevas tecnologías, como relojes atómicos, vehículos espaciales, empleo de técnicas de radar y láser, posibilitaron experimentos nuevos y de mayor precisión. La investigación teórica, tan avanzada, durante el período 1920-1960, sobre la investigación experimental, no se quedó, afortunadamente, rezagada. La estructura geométrica de los agujeros negros fue comprendiéndose, entre otros, con los trabajos de Roger Penrose y del que se ha convertido en el físico más mediático desde Albert Einstein, Stephen Hawking, que demostró en 1974 –combinando la TRG y la Física Cuántica– que los agujeros negros no son tan negros como se pensaba: emiten una radiación característica que sugiere que el agujero negro posee una entropía propia, estableciéndose una profunda conexión entre gravitación, termodinámica y teoría cuántica.

En sentido estricto, agujero negro es todo lo que se encuentra en la zona sin retorno, pero no lo que se encuentra en el fondo. ¿Qué hay ahí? En principio, la TRG dice que la materia se acumularía indefinidamente generando *una singularidad del espacio-tiempo* o zona de curvatura infinita. Pero si está en rotación, podría dar lugar a un agujero de gusano –habitual habitante de las novelas de ciencia ficción–, un tubo que iría del fondo hasta otra región del Universo, permitiendo un enorme atajo en los viajes intergalácticos. Aunque de momento su existencia es estrictamente matemática, han proporcionado un buen filón de ideas para

enriquecer las películas de ciencia ficción que, en la era moderna de extraordinarios efectos digitales –véase *Interstellar*–, dan *verosimilitud y visibilidad cinematográficas* a las especulaciones científicas más apasionantes.

Aunque los agujeros negros no son visibles directamente, pueden ser detectados por los efectos que originan en sus proximidades. Al caer y comprimirse, la materia tragada por el agujero va calentándose hasta alcanzar millones de grados, produciéndose muchísima radiación electromagnética. Paradójicamente, pues, el entorno de un agujero negro se convierte en uno de los lugares más brillantes del cosmos. Así, en las fuentes de rayos X binarias, un agujero negro traga la atmósfera de su compañera por succión gravitatoria, generando un torbellino de gas que, al caer a gran velocidad hacia el agujero negro, transforma la masa en luz. Se piensa que un enorme agujero negro, bautizado Sagitario A*, ocupa el centro de nuestra galaxia, a veintisiete mil años luz de nosotrosFulvio Mella, *The Black Hole at the Center of Our Galaxy*, Princeton, Princeton University Press, 2001.. A partir del movimiento de las estrellas cercanas, se calcula que su masa es cuatro millones de veces la del Sol. El de nuestra vecina Andrómeda se estima cien veces mayor.

Un gran proyecto, EHT (Event Horizon Telescope), basado en interferometría de ondas de radio en la zona milimétrica, en la que la Vía Láctea es bastante transparente, pretende llegar a *ver* Sagitario A* y tener la certeza de que, efectivamente, es un agujero negro. Formado por una red de radiotelescopios y antenas repartidos por el mundo entero, alcanzará una resolución angular de millonésimas de segundo de arco, lo que equivale a la resolución de un telescopio óptico capaz de distinguir un DVD sobre la Luna. También estudiará los mecanismos físicos subyacentes a los chorros que salen de galaxias como M87, analizando la polarización de la radiación emitida por el agujero negro. Incluso se aventurará a posibilidades más fascinantes. Podría incluso ocurrir que se encuentren *singularidades desnudas*, aquellas que no se encuentran *vestidas* por un horizonte de sucesos. Su hallazgo falsearía la hipótesis de la censura cósmica de Hawking, que prohíbe su existencia. EHT será asimismo capaz de reconstruir en tres dimensiones el espacio-tiempo alrededor de un agujero negro, lo que equivale a probar la TRG en campos gravitacionales extremadamente intensos.

La Relatividad General en campos gravitacionales fuertes: las ondas gravitacionales David G. Blair y Geoff McNamara, *Ripples on a Cosmic Sea. The Search for Gravitational Waves*, Nueva York, Allen & Unwin, 1997; Daniel Kennefick, *Traveling at the Speed of Thought. Einstein and the Quest for Gravitational Waves*, Princeton, Princeton University Press, 2007; Pierre Binétruy, *À la poursuite des ondes gravitationnelles*, París, Dunod, 2015.

Posiblemente la mayor parte de cosmólogos actuales se pondrían de acuerdo en que, en realidad, no todo movimiento es relativo y que el espacio-tiempo tiene una existencia independiente de la materia, contrariamente al principio de Mach, tan caro a Einstein. Un excelente ejemplo lo tenemos en la existencia de ondas gravitacionales (OG), oscilaciones del espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz.

Einstein fue rápidamente consciente de que sus ecuaciones permitían la existencia de ondas gravitacionales, el mejor ejemplo posible de la estructura elástica del espacio-tiempo en la TRGAlbert Einstein, «Näherungweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation», *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1916, I, pp. 688-696.. Una distribución de materia (pero no demasiado simétrica) que varía en el tiempo –como un sistema formado por dos estrellas de neutrones o dos agujeros negros– va a deformar la geometría del espacio-tiempo que lo rodea, y esta deformación va a propagarse en todas las direcciones como una onda, cuyas oscilaciones reflejan la variación temporal de la distribución de materia. Una analogía nos la proporciona una piedra arrojada en medio de un estanque: al caer en el agua, perturbándola, genera ondas que se propagan hacia los bordes del mismo. O el sonido, una vibración/perturbación que se propaga a través de las moléculas del aire. Los seres humanos somos capaces no sólo de detectarlo, sino de extraer mucha información útil: su origen (ruido, voz humana o animal, instrumento de música y tipo del mismo), la dirección (el sonido alcanza ambos oídos en momentos distintos). Lo mismo ocurrirá con las OG: en función de sus características (frecuencia, intensidad, polarización) nos darán información valiosísima de la fuente que las emite. Se plantean tres problemas/desafíos formidables: comprender su generación, su forma de propagación y cómo detectarlas.

Hemos dicho antes que las ecuaciones de la TRG son de resolución muy compleja. Einstein empezó por un caso sencillo, considerando pequeñas perturbaciones de un espacio-tiempo inicialmente plano y encontró seis tipos de ondas (hoy en día diríamos seis *polarizaciones*). Una onda física se desplaza con cierta velocidad y transmite un flujo de energía; sólo dos de las seis eran físicas, propagándose a la velocidad de la luz y siendo, como ésta, transversales, es decir, vibran en el sentido perpendicular a su velocidad de propagación. Existen hoy en día teorías alternativas a la TRG en las que algunas de las otras polarizaciones también serían reales; su observación tendría consecuencias revolucionarías, indicando que la TRG debería de ser reemplazada.

Pero el análisis de situaciones físicas concretas era, y es, muy complicado. El cálculo detallado y realista de la energía transportada, o la interacción de la OG con un detector real, son tan complejos que ha llevado mucho tiempo y estudio entenderlos. Einstein incluso tuvo sus dudas en 1936, llegando a creer por un momento que la predicción de su existencia era

un resultado falso debido a que había utilizado una aproximación incorrecta y que las ondas gravitacionales eran inestables y se colapsarían. Después, corrigió su opiniónAlbert Einstein y Nathan Rosen, «On gravitational waves», *Journal of the Franklin Institute*, vol. 223, núm. 1 (enero de 1937), pp. 43-54.. Durante bastante tiempo todavía se discutió la posibilidad de la realidad física de las ondas gravitacionales, hasta que finalmente fue admitidaPeter R. Saulson, «Josh Goldberg and the physical reality of gravitational waves», *General Relativity and Gravitation*, vol. 43, núm. 12 (2011), p. 3289-3299..

Hoy en día nadie duda de su existencia. Ni siquiera la bastante (¿o diremos muy?) conservadora Academia sueca –que no concedió a Einstein el premio Nobel por la Teoría de la Relatividad General– lo duda, fiándose de una buena prueba indirecta, por la cual concedió el premio Nobel en 1993 a Joseph Taylor y Russell Hulse. Ambos descubrieron el primer púlsar binario (formado por dos estrellas de neutrones, girando muy rápidamente una alrededor de la otra), el *PSR 1913+16* (PSR indica púlsar; 1913+16 su situación en el firmamento) en 1974.

(El primer púlsar, *PSR B1919+21*, fue descubierto en 1967 por la astrónoma Jocelyn Bell, a la sazón estudiante de doctorado en la Universidad de Cambridge. Objeto inesperado, completamente desconocido, ejemplo excelente de serendipidad que, en su momento, muchos físicos calificaron como el descubrimiento astronómico del siglo. Posteriormente se interpretó como una estrella de neutrones girando sobre sí misma a gran velocidad, emitiendo chorros de ondas electromagnéticas como emite rayos de luz la lámpara giratoria de un faro; de ahí, el nombre de *púlsar*. Ese hallazgo le valió el premio Nobel de 1974 a su director de tesis, Anthony Hewish, «por su papel decisivo en el descubrimiento de púlsares». Academia sueca *dixit*. ¡Ahí es nada!)

Tras varios años de estudiarlo, Taylor y Hulse hallaron que el período de la órbita disminuía (lo que indicaba que los dos objetos giran cada vez más deprisa en una órbita cada vez más pequeña), aunque muy lentamente (75 millonésimas de segundo cada año). Si asumían que la causa era la emisión de OG, de acuerdo con la predicción hecha por Einstein en 1916, los cálculos teóricos y las medidas se ajustaban perfectamente. La Academia afirmaba: «El buen acuerdo entre el valor observado y el calculado teóricamente pueden verse como una prueba indirecta de la existencia de las ondas gravitacionales». ¡Habló Estocolmo, la duda ha terminado! Para concluir: «Tendremos probablemente que esperar hasta el próximo siglo para tener una demostración directa de su existencia». Una vez más, la Academia ha acertado. El suspense ha durado veintidós años.

La detección directa de las ondas gravitacionales: 14 de septiembre de 2015

Nos queda pendiente la prueba decisiva: la *detección directa* de OG. Pasemos primero a su producción. ¿Qué fuentes originan OG en cantidad apreciable? En general, cualquier sistema compacto con movimientos rápidos, próximos a la velocidad de la luz, es un excelente candidato, como un sistema binario de dos estrellas de neutrones. Uno particularmente adecuado es la fusión, o coalescencia, de dos agujeros negros. La potencia emitida mediante OG sería de cien trillones de veces superior a la potencia luminosa del Sol. Vamos bien. ¿Qué pasa con la propagación? Aquí tenemos un serio problema: las posibles buenas fuentes de OG se estiman muy lejanas, originando señales que nos llegarán a la Tierra muy débiles.

En segundo lugar, veamos los detectores. Aquí el progreso también ha sido enorme. De los primeros intentos serios del gran pionero Joseph Weber con la técnica de las barras resonantes para medir las OG en los años sesentaJoseph Weber, «Detection and Generation of Gravitational Waves», *Physical Review*, vol. 117 (1960), pp. 306-313; Joseph Weber, *General Relativity and Gravitational Waves*, Nueva York, InterScience Publishers, 1962., el progreso –en términos del aumento de la sensibilidad de la medida– ha sido extraordinario. Me concentraré en dos enormes experimentos: VIRGO, al sur de Pisa, en Italia, y LIGO (en dos lugares de Estados Unidos, Washington y Luisiana), en los que trabajan cientos de científicos en cada uno. Prodigiosas realizaciones técnicas, maravillas de ingeniería, increíbles experimentos: los calificativos son todos justos. Su coste es superior a varios cientos de millones de euros, ingresando en la categoría *Big Science*, como los gigantescos detectores del acelerador LHC del CERN en Ginebra. Conceptual, y prácticamente, son dos interferómetros tipo Michelson-Morley, mucho más grandes, modernos y sofisticados que la versión original de 1887. La idea es sencilla: dos brazos perpendiculares que albergan cavidades ópticas de varios kilómetros de largo cada uno (tres para VIRGO, cuatro para LIGO). Una fuente de láser infrarrojo emite un haz que se dirige a un espejo semitransparente –situado donde se cruzan ambos brazos– que dirige la mitad del haz a un brazo y la otra mitad al otro. En cada brazo, los haces efectúan muchos recorridos de ida y vuelta (técnicamente, son cavidades de Fabry-Pérot), con lo que el recorrido real es muy superior a los tres o cuatro kilómetros de cada brazo, hasta que atraviesan el espejo semitransparente de nuevo y se reúnen en uno solo. Los haces se ajustan de tal manera que interfieren de manera destructiva (en oposición de fase), por lo que se anulan uno al otro en un lugar donde un sistema de detección de luz (fotodiodo) mide su intensidad (cero, en este caso). Ahora bien, si una onda gravitacional atraviesa el interferómetro, un brazo se contraerá o se alargará, alterando (mínimamente) la distancia recorrida por los haces, con lo que la interferencia entre los haces de los dos brazos no será cero, lo que será registrado por el fotodiodo. ¡*Habemus* ondas gravitatorias!

Bueno, esto es en teoría, ya que en la práctica hay muchísimas fuentes de ruido que

enmascaran la señal, lo cual representa el mayor desafío técnico para que los experimentos funcionen. Pero se pueden controlar. (LIGO controla entre cuarenta y cincuenta fuentes de ruido distintas.) Con muchísimo trabajo y muchísima imaginación, pero se puede hacer. ¿Y qué sensibilidad tienen? No van a creérselo, pero ahí va. En el estado actual de la técnica (y de la ciencia de materiales, de la óptica y los láseres y de muchísimas más), VIRGO y LIGO son capaces de detectar variaciones relativas en los brazos de los interferómetros de una diez miltrillonésima parte. Más o menos, el cociente entre el diámetro de un átomo y la distancia de la Tierra al Sol. El diámetro de un átomo es 0,00000000001 metros. La distancia Tierra-Sol es 150.000.000.000 de metros. Dividan ambas cantidades y lo tienen: créanselo.

Con tal sensibilidad, VIRGO y LIGO han rastreado entre 2007 y 2011 los cielos y nada han encontrado. La sensibilidad determina la distancia máxima a la que podemos detectar una fuente en función de sus características (la intensidad de la onda emitida, su duración y su frecuencia). VIRGO, por ejemplo, detectaría una colisión de estrellas de neutrones de masa solar hasta a cuarenta millones de años-luz de distancia. Sin embargo, la señal de un púlsar sólo se detectaría a unas decenas de miles de años-luz de distancia. Aumentar la sensibilidad equivale a aumentar el volumen de Universo explorado. Están previstas nuevas mejoras en ambos detectores, que les llevará a sondear un volumen de Universo mil veces mayor.

Pero el día 11 de febrero de 2016 la situación ha cambiado: completamente. Para mucho mejor. Si en el futuro se utilizase una cronología basada en hallazgos científicos capitales, en lugar de las referencias históricas actuales, podría marcar una separación entre Eras. En una conferencia de prensa muy bien organizada por la National Science Foundation (NSF) de Estados Unidos, principal agencia pública financiadora de LIGO, se anunció que LIGO «había detectado ondas gravitacionales». En el artículo publicado en la revista *Physical Review Letters* en el que explican detalladamente los detalles científicos y técnicos de la detección, afirman: «Cien años después de las predicciones de Einstein, informamos de la primera detección directa de ondas gravitacionales y de la primera observación directa de un sistema binario de agujeros negros fundiéndose en uno solo».

La noticia recorrió la Tierra, yo diría que casi a la velocidad de las ondas gravitacionales. Los periódicos en primera página, las cadenas de televisión abriendo sus informativos e Internet (YouTube se llenó de vídeos visualizando el hallazgo) informaron por doquier sobre la fecha de la detección, las características del fenómeno y del detector, las presentes y posibles implicaciones del hallazgo. (En nuestro país ha habido excelentes artículos divulgativos en los diarios escritos por reconocidos especialistas.) En los blogs, las personas participantes, con formación científica o sin ella, manifestaron un interés y curiosidad formidables. Los

físicos más prestigiosos manifestaron su alegría y no escatimaron elogios, que puedo afirmar de sobra merecidos. Por un día, la ciencia ocupó el centro de la atención general. Muchas personas se abstrajeron de la realidad cotidiana y olvidaron sus preocupaciones sobre el paro, los refugiados, la economía, el terrorismo y tantos otros temas. En nuestro país también sirvió para dejar momentáneamente de lado las negociaciones para la formación de un Gobierno tras las elecciones y que la gente se enterase que el excelente grupo de Relatividad y Gravitación de la Universidad de las Islas Baleares, con una larga tradición en este campo, estaba participando en LIGO. Muchas personas conocidas, de las profesiones más diversas, me preguntaban qué era eso de las ondas gravitacionales y por qué era un descubrimiento tan importante. ¿Podía explicarse en pocas palabras? Al margen de las consideraciones estrictamente científicas, pienso que este caso representa lo mejor del ser humano, la capacidad de colaborar, más allá de las diferencias culturales e ideológicas, de una serie de personas unidas en proyectos que permiten avanzar nuestro conocimiento y comprensión del mundo que nos rodea. Como nos indica la historia –pensemos en Copérnico y Galileo–, cada vez que hacemos un gran descubrimiento nuevo referido al Universo, nuestro lugar en él y nuestra idea de nosotros mismos se ven profundamente alterados.

Resumamos (con ligeros retoques; en la traducción no incluyo los errores y convierto parsecs en años-luz) lo que, en su artículo, LIGO dice que midió y sus consecuencias. Así lo cuenta: «El 14 de septiembre de 2015, a las 09:50:45 UTCDos horas más tarde, a las 11:50:45, en España., los dos detectores de LIGO observaron simultáneamente el paso de una onda gravitacional […]. La forma de la señal corresponde a la predicha por la Relatividad General para el movimiento en espiral y fusión de un par de agujeros negros […]. La fuente se sitúa a una distancia de 1.300 millones de años-luz, las masas iniciales de los agujeros negros son 36 y 29 veces la masa del Sol y la masa del agujero negro final es 62 veces, con 3 masas solares radiadas como ondas gravitacionales […]. Estas observaciones demuestran la existencia de sistemas binarios de agujeros negros con masas solares. Es la primera detección directa de ondas gravitacionales».

Es decir, una onda gravitacional, tras haber viajado 1.300 millones de años-luz desde su lugar de creación, pasó por ambos detectores de LIGO, el de Luisiana y el de Washington, con siete milisegundos de diferencia. El dato es esencial: es el tiempo que las OG, que viajan a la velocidad de la luz, tardan en recorrer los tres mil kilómetros que separan ambos detectores (esa detección, llamada en coincidencia, permite eliminar muchísimas señales espurias). Un análisis detallado de la forma de la onda y el tiempo de paso (lo que se realiza con la ayuda de complejos modelos teóricos basados en la TRG, que necesitan una gran potencia de cálculo por ordenador y que prueban diferentes hipótesis teóricas) permite reconstruir perfectamente los últimos instantes del dramático y gigantesco proceso. En dos

décimas de segundo, la señal aumenta su frecuencia de 35 a 150 herzios hasta producir un pico final de intensidad máxima, cuando se ha formado el agujero negro único (es la etapa final en la que los agujeros negros giran uno alrededor de otro aumentando la velocidad; su frecuencia orbital es la mitad de la frecuencia de la señal, esto es, 75 herzios). La energía que emitieron los agujeros negros en forma de OG al fusionarse en uno único tras moverse en espiral casi a la velocidad de la luz, equivalente a tres masas solares, fue absolutamente colosal: *representa más que la que liberan, en el mismo lapso de tiempo, todas las estrellas en el Universo observable*.

LIGO no sólo ha detectado por primera vez directamente las OG, sino que también ha probado la existencia directa de agujeros negros y, también por primera vez, ha medido cómo dos de ellos se convierten en uno solo. ¡Triple descubrimiento de una sola tacada! Entretanto, ¿qué le pasó a VIRGO? Hubiese sido fantástico que también hubiese registrado el fenómeno del que, así, la evidencia sería aún más incontrovertible. Desgraciadamente, estaba siendo mejorado y no se hallaba operativo. Pero tuvo un premio de consolación: el artículo con los resultados de LIGO fue firmado conjuntamente por los miembros de ambas instituciones.

Pero lo más interesante es que hemos abierto una ventana enteramente nueva para observar el cosmos. Desde el origen de la humanidad, la información del Universo nos ha llegado por la luz visible que detectan nuestros ojos, que constituye una parte ínfima del conjunto de las ondas electromagnéticas. Desde mediados del siglo pasado empezamos a ser capaces de medir otras ondas electromagnéticas: centimétricas, milimétricas, microondas, infrarrojas, rayos X, rayos gamma y, en cada ocasión, han aparecido nuevos e inesperados fenómenos. Posteriormente hemos detectado neutrinos procedentes de la explosión de una supernova, iniciándose otro tipo distinto de astronomía (merecedora de un premio Nobel). Lo mismo ocurrirá con las ondas gravitacionales: ¡acabamos de entrever una pequeñísima parcela de lo posible! Ha habido con ello una ganancia semántica: se ha ampliado el concepto de *telescopio*.

¿Qué mejor manera de conmemorar el centenario de la TRG que llevando a cabo tan extraordinario descubrimiento? En el futuro, nuevos proyectos, como el Telescopio Einstein, con brazos de diez kilómetros de largo en la Tierra, o el más ambicioso proyecto eLISA, de la Agencia Espacial Europea, previsto para 2034, que consiste en instalar en el espacio (con lo que se evitan todas las interferencias de tipo sísmico, posibilitándose el estudio de frecuencias entre 1 mHz y un herzio) un interferómetro con brazos de ¡un millón de kilómetros! albergado en tres naves espaciales, capaz de detectar la fusión de agujeros negros supermasivos u ondas gravitacionales cosmológicas provenientes del Big Bang, lograrán probablemente que una nueva música, hasta ahora inaccesible, del Universo nos

resulte familiar.

La Relatividad General y la Física Cuántica

Aquí, como decía la canción, estamos tocando el fondo. Sobre ambas teorías se apoya toda la Física actual. Las dos han sido verificadas, en sus dominios de aplicación, con enorme éxito. Sin embargo, sus formulaciones son muy distintas. La TRG describe un espacio-tiempo dinámico, en interacción con la materia y la energía, mientras que la Física Cuántica se basa en el espacio-tiempo de la relatividad especial, escenario pasivo donde se producen los fenómenos. Las dos visiones parecen contradictorias. ¿Pueden conciliarse?

Cuando se ha intentado *cuantificar* la TRG, los cálculos dan resultados absurdos. El procedimiento construido para cuantificar una teoría clásica, como la electrodinámica, llamado renormalización, no funciona en este caso. No es fácil encontrar situaciones que nos indiquen cómo podría ser una teoría que funcione. Dos son las más estudiadas, ya que las extraordinarias densidades que alcanza la materia exigen un enfoque a la vez cuántico y relativista: el Universo primitivo y los agujeros negros. Varios argumentos apuntan a la necesidad de una teoría cuántica de la gravitación. Hemos visto las singularidades que aparecen en el centro de los agujeros negros; también lo hacen en el origen del Big Bang. A distancias muy pequeñas, como la escala de Planck, obtenida combinando las tres constantes fundamentales de la Física –la velocidad de la luz, c; la constante de Planck, h, y la constante de Newton, G–, la gravedad llega a ser tan intensa como las otras tres interacciones fundamentales (fuerte, electromagnética y débil), bien descritas por la Física Cuántica. Probablemente haya que construir un marco completamente nuevo. Los dos candidatos más en boga presentan enfoques muy distintos.

La *teoría cuántica de la gravitación de bucles* aún se halla en sus inicios. De entrada, se ocupa sólo de cuantificar la gravitación, dejando de lado las otras tres interacciones. Obtiene un espacio-tiempo de estructura granular, habiendo logrado resultados prometedores aplicada a los agujeros negros, como en el cálculo de su entropía. La *teoría de cuerdas*, por su parte, se halla más avanzada. Su objetivo es unificar las cuatro interacciones, siguiendo el viejo sueño de Einstein. Sus objetos básicos no son puntuales (partículas) sino unidimensionales (minúsculas cuerdas). Sus modos de vibración –el análogo de las notas de un instrumento de cuerda, como el violín– corresponden a las partículas reales observadas (electrones, quarks…). Pero no se han logrado elaborar en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Para ser coherente necesita muchas más, como 11 o 26. Suscitó un gran interés –y sigue haciéndolo– porque predecía la existencia de una partícula, el gravitón, que transportaría la interacción gravitatoria y los cálculos no producen cantidades infinitas. Sin embargo, tiene problemas para explicar dos características del Universo: la inflación (la

gigantesca expansión de los primeros instantes) o la aceleración observada en 1998. De momento, además, no existe confirmación experimental alguna.

¿Hasta cuándo la más bella será verdadera?

Como avancé en la introducción, el consenso entre los físicos es unánime en cuanto a la belleza de la teoría. En mi época de estudiante me impresionaron las palabras de Lev Landau, uno de mis físicos más admirados, cuando estudiaba el segundo tomo de su *Curso de Física Teórica*, dedicado a las teorías clásicas de campos (donde «clásica» se contrapone aquí a «cuántica»): «La teoría de los campos gravitatorios, construida sobre la base de la relatividad, se llama teoría de la relatividad general. Fue establecida por Einstein […] y representa probablemente la más bella de las teorías físicas existentes. Es notable que Einstein la desarrolló de manera puramente deductiva y tan solo después se vio apoyada por observaciones astronómicas»Lev Landau y Evgenii Lifshitz, *Teoría clásica de campos*, trad. de Ramón Ortiz Fornaguera, Barcelona, Reverté, 1973..

La insistencia en el desarrollo basado en criterios intrínsecos de consistencia y elegancia es un Leitmotiv constante. Paul Dirac, quien se guiaba por criterios estéticos en su búsqueda de ecuaciones, y a quien que muchos consideran el mejor físico teórico después de Einstein del siglo XX, calificó la TRG como «el descubrimiento científico más importante de todos los tiempos». Un aspecto que recoge asimismo la unanimidad es la motivación de Einstein: no intentaba entender resultados experimentales inexplicados, sino que se dejó guiar por su intuición sobre qué debía de ser la gravedad.

Si hojeamos lo escrito en la prensa mundial con motivo del centenario de la TRG, el acuerdo parece también unánime entre los periodistas. «La teoría más bella de la historia de la ciencia», publicaba *The New York Times*, y hasta *The EconomistThe Economist*, 28 de noviembre de 2015. la celebraba con idéntico título en un amplio artículo.

Pero toda teoría, por bella que sea o nos parezca, y por mucha unanimidad que suscite en su favor, debe adecuarse a la realidad, que constituirá, en la forma de experimentos, el último juez sobre su validez. La estructura lógica cerrada de la TRG es su principal atracción. Pero, al mismo tiempo, apunta a sus riesgos: si alguna de sus conclusiones resultara no ser cierta, parece imposible modificarla sin destruir su estructura global. Ello podría ocurrir por nuevos resultados experimentales que la contradijesen, independientemente de sus relaciones con la Física Cuántica.

En este artículo he intentado mostrar cómo la TRG es una bellísima teoría de gran actualidad, como lo confirma el recentísimo descubrimiento de las ondas gravitacionales por LIGO,

poniendo un magnífico broche de oro a su centenario. Habiendo pasado, hasta el momento, todas las pruebas a que se ha visto sometida con gran brillantez, convertida en herramienta esencial para explicar lo que ocurre en el Universo a gran escala, la TRG seguirá afrontando pruebas cada vez más rigurosas –como las de su principio fundador, el de equivalencia–, de las que he procurado describir algunas de las más características (el lector interesado podrá encontrar un excelente informe completo, tanto popular como más técnico, en los escritos de Clifford M. Will).

Concluyamos con las palabras de una persona, buena conocedora de la teoría, cuya obra científica representa la contribución contemporánea más importante a los desarrollos teóricos de aquella: «En 1948 le fue ofrecida la presidencia del nuevo Estado de Israel, pero la declinó. En cierta ocasión dijo: “La política es para el momento, pero una ecuación es para la eternidad”. Las ecuaciones de Einstein de la relatividad general constituyen su mejor recuerdo y epitafio, y deberían durar tanto como el universo»Stephen Hawking, *The Universe in a Nutshell*, Ealing, Bantam Press, 2001, capítulo 1. Cita extraída de la versión española, *El Universo en una cáscara de nuez*, trad. de David Jou, Barcelona, Crítica, 2002.. Pero sólo el futuro nos dirá lo que va a ocurrir. ¡Y no faltará trabajo! No olvidemos que el 95% del contenido de energía del Universo –la energía oscura y la materia oscura– nos es desconocido.