

EFEMÉRIDES

UN BUEN AÑO PARA LA FÍSICA:
2015 Y EL LEGADO DE ALBERT EINSTEIN
(1879-1955)

Primera parte (recibida el 18-feb-2016)

INTRODUCCIÓN

Newton, Darwin y Einstein son, seguramente, los más grandes científicos de la historia. En esa selección influye que –matemáticas aparte– la física y la biología constituyen la base de todas las ciencias si se acepta, claro está, que la química es consecuencia del enlace químico y éste es el resultado de las leyes de la física cuántica. Dada la trascendencia de su descubrimiento, cabe mencionar también a James Watson y Francis Crick por descifrar en 1953 la estructura del DNA, cuya importancia en la copia del material genético “no les pasó inadvertida”, como no se olvidaron de puntualizar en su breve y fundamental artículo en *Nature*. Y en un plano muy diferente, no estrictamente científico, se encuentra Timothy Berners-Lee por crear, en 1989, la *world wide web* en el CERN. Internet ha producido, y continúa haciéndolo, una transformación social mucho más veloz, profunda y universal que la originada por Gutenberg en el s. XV (y de efectos no todos positivos). Todos los citados son físicos, por cierto, salvo Darwin y Watson, y todos ingleses, salvo el estadounidense Watson (que sí lo sería científicamente, pues trabajó en el famoso laboratorio Cavendish de física de la Univ. inglesa de Cambridge), y Einstein, que renegó de su nacionalidad alemana. Einstein se encontraba fuera de Alemania cuando Hitler tomó el poder en 1933 y nunca más regresó a ella. Dos años antes se había publicado en Leipzig el libro *Cien autores contra Einstein*, ante el que comentó: “si estuviera equivocado, un solo profesor bastaría”. Y, en mayo de 1933, en autos de fe acompañados de los inevitables portadores de antorchas, sus libros ardieron junto con muchos otros, sobre todo de autores judíos. Einstein detestó toda su vida el nacionalismo, que tildaba de “enfermedad de la humanidad”.

Es frecuente creer que los descubrimientos de Einstein fueron sólo de naturaleza teórica; ciertamente, es el físico teórico por excelencia. Sin embargo, también han generado incontables aplicaciones prácticas, pues a toda revolución conceptual le sigue *siempre* una gran revolución tecnológica, algo que deberían recordar quienes insisten en que la investigación debe ser fundamentalmente ‘práctica’: la primera condición para la aparición de ciencia aplicada es que haya, en primer lugar, ciencia. Pues, como decía Cajal, “¿habrá alguno tan menguado de sindéresis que no repare que allí donde los principios o los hechos son descubiertos brotan también, por modo inmediato, las aplicaciones?” Y efectivamente, el trabajo de 1905 que incluye la explicación del efecto fotoeléctrico, la primera gran contribución de Einstein a la física cuántica nacida en 1900, es la base de incontables aplicaciones. En una carta de mayo de 1905 a su buen amigo Conrad Habicht consideraba que ese artículo, “que trata de la radiación y las propiedades energéticas de la luz”, era “*muy revolucionario*”. De hecho, ese trabajo motivó la concesión del Nobel de 1921 a Einstein “por sus servicios a la física teórica y especialmente por el descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico”.

UNA CIMA DEL PENSAMIENTO CIENTÍFICO:
LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL
DE EINSTEIN

Sin embargo, la imaginación popular siempre ha vinculado a Einstein con la relatividad. En 1905 (su *Annus Mirabilis*¹) desarrolló la *Relatividad Especial*, que resulta

¹ En ese año maravilloso Einstein publicó también un estudio sobre el movimiento browniano para “encontrar hechos que garanticen lo más posible la existencia de átomos de tamaño definido”. La corpuscularidad de la materia, entonces no universalmente admitida pese a los estudios de los gases de Amadeo Avogadro de 1811 que condujeron a su famoso número, fue comprobada experimentalmente en 1908-09 por J.B. Perrin (1870-1942, Nobel 1926), quien concluyó que sus resultados “no dejaban duda alguna de la rigurosa exactitud de la fórmula de Einstein”. El ‘tercer’ trabajo de ese prodigioso 1905 fue el que estableció la relatividad *especial* que se mencionará enseguida, al que siguió el artículo que incluía la famosa expresión $E=mc^2$ (Einstein usó en él L para la energía E , de *Lebendige Kraft*, energía ‘viva’).

imprescindible cuando intervienen velocidades muy grandes, comparables a la de la luz, para las que la mecánica de Newton ya no es adecuada. Sus consecuencias ($E=mc^2$ aparte) son muy profundas, pues modifica el carácter absoluto y separado del espacio y del tiempo newtonianos; en la relatividad einsteiniana ambos se funden en un único *espaciotiempo* que, por eso, es conveniente escribir sin guion entre espacio y tiempo. Como señaló en 1908 Hermann Minkowski, antiguo profesor de Einstein en el Politécnico de Zúrich, “sólo esa unión retiene una entidad independiente”. Más aún: las *fuerzas*, base de la mecánica de Newton en la que actúan instantáneamente, ‘a distancia’, acabarán cediendo su protagonismo en favor de los *campos* que llenan el espaciotiempo y que pasarán a ser las entidades fundamentales. El nombre de ‘relatividad’, sin embargo, es poco feliz: al revés, la teoría resalta lo que es invariante bajo ciertas condiciones, las *leyes físicas*, que por tanto –y afortunadamente– no son ‘relativas’. Si lo fueran, el progreso de la física sería más difícil y quedaría reducido poco menos que a colecciones de resultados y tablas. José Ortega y Gasset (1883-1955) –quien acompañó a Einstein en su visita a Madrid en 1923– ya había apreciado este importante aspecto de la relatividad como comentó en *El tema de nuestro tiempo* (1923). Incluso el propio Einstein utilizó ocasionalmente *Invariantentheorie* para evitar el nombre de relatividad, pero ya era tarde para cambiar la terminología que él mismo había hecho popular. Pero, denominación aparte, es importante reseñar aquí que Einstein introdujo las consideraciones de simetría como guía en la búsqueda de teorías físicas, principio que ha sido extraordinariamente fértil. En su famoso artículo de la relatividad especial, Einstein deduce primero las transformaciones de Lorentz (que determinan la *relatividad einsteiniana*) y, *después*, estudia la invariancia de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo bajo ellas. Einstein tuvo, no obstante, un ilustre predecesor: Galileo (1564-1642) ya describió la invariancia de las leyes de la mecánica, en sus famosos *Gedankenexperimente* en la bodega de un barco, bajo las que actualmente se llaman transformaciones de Galileo. Lo hizo en el *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632), donde intuyó lo que –tras Einstein– se llama hoy *principio de relatividad galileano*, que es el adecuado para la mecánica que pronto establecería Isaac Newton (1643-1727).

La obra cumbre de Einstein es la *Relatividad General* (RG), cuyo centenario se enmarca en las celebraciones del *Año Internacional de la Luz* que acaba de concluir.

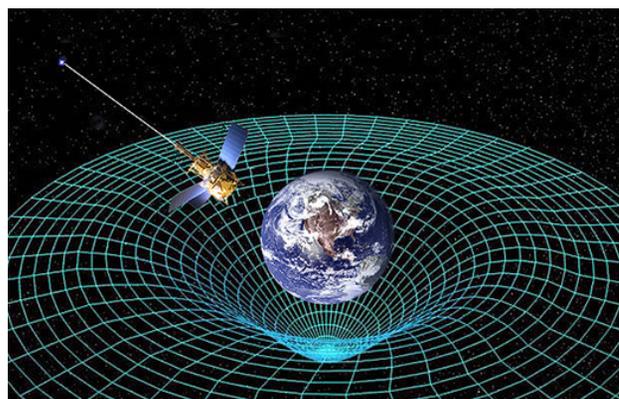


Figura 1. Curvatura (geometría) y masa (gravedad).

La RG es una teoría del campo gravitatorio cuyo origen está en la observación de que aceleración y gravedad son localmente equivalentes bajo un cambio de referencia (no inercial). La simetría de la relatividad *especial* es *rígida*; la de la relatividad *general* es *local*². La gravedad es una fuerza de largo alcance, como la electromagnética, aunque muchísimo más débil; los efectos de la gravedad sólo los percibimos gracias a las grandes masas que intervienen en ella. La atracción gravitatoria de dos protones, por ejemplo, es despreciable frente a su repulsión electrostática, que es unas 10^{36} veces mayor que aquélla; en el caso de dos electrones el factor es $\sim 10^{42}$. En muchas ocasiones, la teoría newtoniana resulta suficiente para dar cuenta de la gravedad, pero ya no sirve cuando la gravedad es intensa (o las velocidades muy altas). Eso sucede cuando intervienen objetos de alta densidad, como estrellas de neutrones o agujeros negros, o cuando las escalas son tan grandes que la masa contenida resulta igualmente muy grande.

La teoría einsteiniana del campo gravitatorio no sólo gobierna el comportamiento del cosmos en su conjunto, sino que ha transformado la cosmología, originalmente una rama de la filosofía o un aspecto más de las religiones, en un área de la ciencia basada en las *ecuaciones del*

² Los sistemas inerciales de la relatividad especial de Einstein están relacionados por las transformaciones del grupo de Poincaré, que son las mismas para todos los puntos del espaciotiempo y por eso son ‘rígidas’; en el caso de la mecánica de Newton, las correspondientes transformaciones forman el grupo de Galileo, que es el de la relatividad galileana o newtoniana (ambas relatividades, galileana y einsteiniana, son muy distintas: el tiempo, por ejemplo, es absoluto en la mecánica de Newton y no en la de Einstein). Por el contrario, en la RG son posibles cambios de referencia arbitrarios, diferentes para distintos puntos del espaciotiempo. Al depender del punto considerado, las transformaciones son ‘locales’ (y forman el grupo de difeomorfismos).

campo gravitatorio (i.e., de la RG). Einstein las presentó el 25 de noviembre de 1915 en un artículo de cuatro páginas en la *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1915, 2. Teil, 844–847. Las ecuaciones de la RG son matemáticamente difíciles de resolver, pero conceptualmente son muy sencillas: *geometría = materia-energía*, es decir, la geometría (curvatura) del espaciotiempo está determinada por la distribución de materia y energía (Einstein se refería a los dos miembros de la ecuación, respectivamente, como de ‘marfil’ y de ‘barro’). A mayor masa, mayor deformación; pero la masa no es indispensable, pues la energía produce gravedad y queda afectada por ella. Por eso la luz, que tiene energía pero no masa, también ‘cae’ en presencia de un campo gravitatorio. La famosa expedición de Arthur S. Eddington (1882–1944) comprobó este hecho al observar la desviación de la luz de una estrella por el Sol en el eclipse de 1919, confirmación que catapultó a Einstein a la fama (el eclipse sólo era importante para que la luz del Sol no impidiera hacer las fotos).

La RG predice que la gravedad se propaga a la velocidad de la luz, en contraste con la fuerza de la gravedad newtoniana que se ‘propaga’ con velocidad infinita y actúa instantáneamente, ‘a distancia’. Vale la pena reproducir las ecuaciones de la RG (las únicas que escribiré), cuya sencillez resulta asombrosa si apreciamos su generalidad, pues dan cuenta de todos los fenómenos gravitatorios:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

“La política es para el momento; una ecuación es para la eternidad” (Albert Einstein)

En el miembro geométrico (el de la izquierda) interviene el tensor de Ricci $R_{\mu\nu}$ y la curvatura escalar R . Uno y otra se expresan en términos de las variables fundamentales de la RG, las componentes del *tensor métrico* $g_{\mu\nu}$; Λ es la famosa constante cosmológica que se mencionará después. En el miembro de la derecha, la materia-energía está descrita por el ‘tensor energía-impulso’ $T_{\mu\nu}$. La RG es, pues, la dinámica del espaciotiempo: como decía el físico teórico John Archibald Wheeler (1911–2008), la materia indica al espaciotiempo cómo debe curvarse, y el espaciotiempo le dice a la materia cómo moverse. Las constantes que aparecen en las ecuaciones nos indican que la RG: 1) es una teoría de la gravitación, pues incluyen G , la constante de la gravitación universal de Newton; 2) es relativista, pues interviene c , la velocidad de la luz y, finalmente, 3) que la RG einsteiniana *no*

es una teoría cuántica (es ‘clásica’), pues no incorpora h , la constante de Planck que caracteriza los fenómenos cuánticos. Einstein estuvo muy satisfecho del logro de la RG, cuyo estudio había iniciado años atrás con el ‘principio de equivalencia de la gravitación y la inercia’ que introdujo en 1907, mucho antes de las ecuaciones de la RG. En una carta del 31-V-1915 en la que se refería a la “espléndida comprobación del desplazamiento de las líneas espectrales por un potencial gravitatorio” (para cuya predicción basta el principio de equivalencia) comentó que, frente a otros avances de la física que “podrían ser realizados por un quídam cualquiera, la RG es de otra clase. Haber alcanzado esa meta me proporciona la mayor satisfacción de mi vida, aunque hasta ahora ni un solo colega se ha dado cuenta de la profundidad y de la necesidad de esta vía”. Muy pronto aparecería uno: tras una visita de Einstein a Göttingen en el verano de 1915, el gran matemático de esa universidad David Hilbert (1862–1943) sí la apreció enseguida e incluso encontró una formulación de las ecuaciones de la RG –salvo matices– que motivó una pequeña discusión con Einstein sobre prioridad. El episodio concluyó con Hilbert reconociendo completamente la de Einstein y la reconciliación de ambos. Hilbert refunfuñaría más tarde: “cualquier chico de las calles de Göttingen sabe más geometría tetradimensional que Einstein. Sin embargo, y pese a todo, fue Einstein quien hizo el trabajo, no los matemáticos”.

La RG, como teoría del campo gravitatorio, es la base de cualquier consideración astronómica y cosmológica. Por ejemplo, la RG da cuenta de la parte *anómala* del movimiento de precesión del perihelio de Mercurio, inexplicable en su totalidad por la mecánica newtoniana como Urbain Le Verrier había puesto de manifiesto a mediados del s. XIX. Según comentó Einstein a su amigo Paul Ehrenfest (1880–1933), lo acertado del cálculo de esa precesión le hizo permanecer “en éxtasis durante varios días”. Pero la RG también tiene consecuencias inesperadas: desde filosóficas, pues invalida el apriorismo kantiano sobre la pretendida naturaleza euclídea del espacio (y de paso cuestiona *todo* conocimiento *a priori*), hasta otras bien mundanas: la precisión del GPS (*Global Positioning System*) sería imposible sin las correcciones de la RG que afectan a la sincronización de los relojes de los satélites. De hecho, si todos los aparatos que utilizamos despreocupadamente indicaran el nombre del científico cuyos descubrimientos permiten su funcionamiento, el de Einstein sería omnipresente.

Por supuesto, Einstein no acertó siempre y, a veces, juzgó erróneo lo que no lo era. Pero, como se verá repetidamente, incluso en esas ocasiones su resistencia a aceptar posiciones científicas distintas a la suya señaló siempre un problema fundamental. Su oposición inicial a la expansión del universo le movió a introducir en 1917 la constante cosmológica Λ en el lado geométrico de sus ecuaciones de la RG. Einstein buscaba soluciones de sus ecuaciones de la RG que permitieran describir un universo estático, pues Λ crea una fuerza repulsiva, una especie de anti-gravedad que contrarresta la atracción de la materia ordinaria. Einstein introdujo la constante cosmológica con el ánimo sobrecogido: en una carta (4-II-1917) a Ehrenfest le decía: “he perpetrado algo contra la teoría de la gravedad [la RG] que me pone en riesgo de ser recluido en un manicomio”. El universo estático era entonces la creencia más común hasta que su expansión, predicha por el ruso Alexander Friedmann³ (1888-1925) y el abate belga Georges Lemaître (1894-1966), fue observada por Vesto M. Slipher y cuantificada por la famosa ley de Edwin P. Hubble (1889-1953) de 1929. Ésta establece que la velocidad con la que se alejan las galaxias de nosotros es proporcional a la distancia a la que se encuentran, hallazgo que constituye uno de los grandes triunfos de la astronomía óptica. Según parece, Einstein manifestó a George Gamow (1904-68) que la adición de Λ fue “el mayor error de su vida”. Pero el verdadero error de Einstein no fue introducir la constante cosmológica, sino no apreciar que su solución estática no era válida por ser inestable. Sin embargo, la constante cosmológica ha resurgido en el lado no geométrico de las ecuaciones de la RG (el derecho, energía), reinterpretada como proporcional a la densidad de energía del vacío. Vacío físico que, pese a su nombre, no está nada ‘vacío’: en un universo cuántico, el vacío no lo está en absoluto, sino que ‘bulle’ con una infinidad de partículas

³ Cinco años después de que Einstein introdujera la constante cosmológica, el ruso Alexander Friedmann publicó el 29-VI-1922 en el *Zeitschrift für Physik* una solución de las ecuaciones de la RG que correspondía a un universo en expansión. Einstein reaccionó áspicamente el 18-IX-1922 con una nota en la misma revista rechazando el resultado, aunque finalmente reconoció su error ocho meses después (el 31-V-1923), también en el *Zeits. für Phys.*, aceptando que las ecuaciones de la RG permitían un universo en expansión. Hoy cabe considerar a Friedmann como el precursor del *Big Bang*, junto con Lemaître y su ‘átomo primordial’. Lemaître contó que en 1927, durante la famosa conferencia de Solvay de ese año, Einstein le comentó: “sus cálculos son correctos, pero su física es abominable”.

‘virtuales’ y, por ende, la densidad de esa energía no disminuye al expandirse el universo pues es una propiedad del propio espacio. Esa ‘energía oscura’ está distribuida uniformemente y constituye nada menos que alrededor de un 70% del total, interacciona muy débilmente con la materia y es la responsable de la actual *aceleración* de la expansión de universo. Ésta fue observada en 1998 por Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt y Adam G. Riess, quienes compartieron el Nobel de 2011. No se sabe qué es lo que determina la energía oscura⁴ aunque, como hemos mencionado, tiene las propiedades de una constante cosmológica (conceptualmente recolo-

⁴ La *materia normal* (incluyendo a esos efectos radiación y neutrinos) es sólo ~5% del total del universo, así que no es tan ‘normal’; la *materia oscura*, que constituye un ~25%, interacciona muy débilmente con la materia ‘normal’, por lo que no ha sido directamente observada por ahora. Una y otra son las responsables de la atracción de la gravedad a escala galáctica. La materia oscura no emite radiación; de ahí su nombre, aunque sea más ‘transparente’ que ‘oscura’. Su presencia fue postulada en 1933 en el *California Institute of Technology* por el astrónomo de origen suizo Fritz Zwicky, para explicar que se pudieran mantener unidos los conglomerados de galaxias, concretamente el de Coma. No se sabe de qué está compuesta la materia oscura; entre los candidatos se incluyen los ligeros y por ahora hipotéticos axiones y posibles partículas supersimétricas; en general, WIMPs (*weakly interacting massive particles*). La materia oscura está concentrada en galaxias y conglomerados de galaxias; así pues, la atracción gravitatoria de las materias ordinaria y oscura queda limitada a esas zonas ‘reducidas’ que ‘parcean’ el cosmos. Por el contrario, la gravedad *repulsiva* de la *energía oscura*, la energía del vacío, aunque es poco densa y por tanto superada por la atracción gravitatoria a ‘pequeñas’ escalas como la de nuestra galaxia (la Vía Láctea), puede dominar a escalas cósmicas al estar presente por doquier y ser su efecto acumulativo: los ‘trozos’ de vacío se repelen. Esta primacía de la energía oscura no se dio durante la mayor parte de los 13.800 millones de años de vida del universo aunque hay razones para creer que también dominó el universo primitivo, cuando la densidad de energía era extraordinariamente alta, produciendo una expansión velocísima –exponencial– durante un brevísimo lapso de tiempo (el *periodo inflacionario* que se mencionará luego). Con el paso del tiempo, sin embargo, la densidad de materia ordinaria, de radiación y materia oscura fue decreciendo al expandirse del universo y, desde hace algunos miles de millones de años, la repulsión de la omnipresente energía oscura, de densidad constante, ha pasado a superar la atracción gravitatoria produciendo la actual aceleración de su expansión (fig.10). Como consecuencia, cabe imaginar que en un futuro *muuy lejano* nuestra galaxia, unida a Andrómeda y quizá a algunas galaxias enanas próximas, quedará aislada en una soledad realmente cósmica, en la que un posible ser inteligente ya no podría desarrollar una cosmología como la que todavía es posible hacer hoy.

cada en el segundo miembro de las ecuaciones de la RG). Lo que está claro es que la observación astronómica del movimiento de la materia ordinaria *requiere* la existencia de la materia y energía oscuras. Vistos los desarrollos actuales, procede recordar lo que certeramente expresó Lemaître en un artículo de 1949: “la historia de la ciencia proporciona muchos ejemplos de descubrimientos que han tenido lugar por razones que ya no se consideran apropiadas. Es posible que la constante cosmológica sea uno de esos casos”.

Tampoco acertó Einstein en su manifiesta hostilidad a los agujeros negros. Resulta sorprendente la oposición de Einstein a su existencia, quizá porque éstos indicaban que su teoría de la RG no era definitiva. El caso es que publicó un trabajo en 1939 en *Annals of Mathematics*, ya en los Estados Unidos, argumentando equivocadamente que no podían existir. Los agujeros negros hicieron ya aparición en el marco newtoniano en la forma de ‘estrellas oscuras’, objetos con una velocidad de escape superior a la de la luz. Pero, al margen de esas premoniciones newtonianas, la historia de los agujeros negros (así bautizados en 1968 por Wheeler) comienza con la anticipación de Karl Schwarzschild (1873-1916), quien encontró enseguida (en 1915) la primera solución exacta de las ecuaciones de la RG y, especialmente, con el estudio del colapso estelar en 1939 por Robert Oppenheimer (1904-67, el futuro director científico del proyecto Manhattan) y Hartland Snyder. Hoy, los agujeros negros no lo son tanto por la radiación que describió Stephen Hawking (1942-). Éste encontró al considerar efectos cuánticos (los agujeros negros *clásicos* de la RG no radian) que emiten radiación con el espectro de un cuerpo negro⁵; un agujero negro muy pequeño podría ser hasta blanco debido a esa radiación. Hoy hay evidencia de numerosos agujeros negros, por ejemplo resultado de la explosión de supernovas; la mayoría de las galaxias contienen uno en su centro, con masas de millones de veces la del Sol. Hay uno supermasivo en el centro de nuestra Vía Láctea, Sagittarius A* (Sgr A*), con una masa de unos cuatro millones de soles. Y la *primera* observación ‘directa’ de dos agujeros negros de masa

⁵ Se llama radiación del *cuerpo negro* a la que emiten esos cuerpos, que se caracterizan por absorber la radiación completamente, de ahí su nombre. Al calentarse, los cuerpos negros emiten una radiación característica cuyo espectro depende exclusivamente de su temperatura (por eso se habla de temperatura de esa radiación), y la intensidad de su superficie.

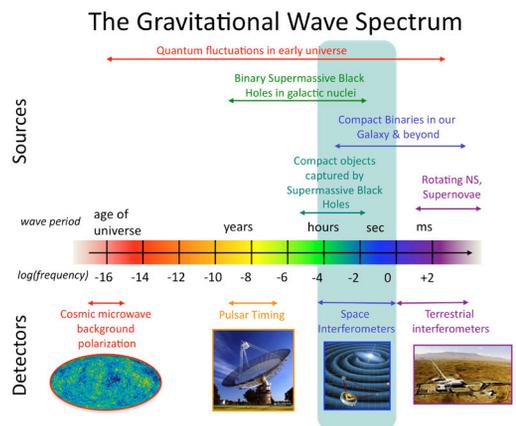


Figura 2. El espectro de ondas gravitatorias (NASA Goddard Space Flight Center).

estelar del mayor tamaño encontrado hasta ahora, formando además un sistema *binario* que acaba fusionándose en uno solo, jugará enseguida un papel esencial en esta narración.

ONDAS GRAVITATORIAS Y SU DETECCIÓN POR LIGO

Incitado –según parece– por Schwarzschild, Einstein observó en sendos artículos en la Academia Prusiana de 1916 y 1918 que, en primera aproximación, las ecuaciones de la RG daban lugar a ondas gravitatorias (el trabajo de 1918 corregía un error del anterior), ondulaciones del propio espaciotiempo. Era natural preguntarse por la existencia de estas ondas (que *no* son posibles en la gravedad newtoniana), pues las ecuaciones de Maxwell predicen la existencia de ondas electromagnéticas. Éstas se denominaron en su día ‘ondas hertzianas’ en honor de Heinrich Hertz⁶ (1857-1942), quien las detectó en Karlsruhe en 1885-89. Sin embargo, Einstein cuestionó después la existencia de ondas gravitatorias. Dada la importancia de éstas, vale la pena recordar este curioso episodio y, puesto que hace sólo una semana se ha anunciado la primera observación directa de esas ondas a su paso por la Tierra, daremos también cuenta de este extraordinario descubrimiento con alguna extensión. Pero empecemos por el inicial rechazo de Einstein. En una carta de 1936 a Max Born (Nobel en 1954 “por sus in-

⁶ Hertz también descubrió en 1887 el efecto fotoeléctrico en uno de esos curiosos giros de la historia de la ciencia: las ‘ondas hertzianas’ probaban el carácter ondulatorio de la luz, y el efecto fotoeléctrico sería el primer paso hacia la manifestación de su corpuscularidad (como se comentará en la segunda parte).

investigaciones fundamentales sobre la mecánica cuántica, especialmente por su interpretación estadística de la función de onda”), Einstein comentaba: “junto con un joven colaborador [Nathan Rosen, su asistente en Princeton] he concluido que las ondas gravitatorias no existen, aunque se daban por seguras en primera aproximación. Esto muestra que las ecuaciones de campo *no lineales* [mis cursivas] de la relatividad general... nos limitan más de lo que habíamos creído hasta ahora”.

El trabajo de Einstein y Rosen *¿Existen las ondas gravitatorias?* fue enviado a *The Physical Review*, la revista de física más importante. Cabe suponer que el artículo detallaría las razones de la oposición a su existencia que Einstein había mencionado a Born. Einstein, con todo su prestigio a sus espaldas, no esperaba que el artículo se remitiera a un *referee* antes de publicarse. Pero así fue; su trabajo fue tratado como cualquier otro y dos meses después recibió el correspondiente informe junto con una carta del editor del *Physical Review* en la que le solicitaba que “considerara los distintos comentarios y críticas que el *referee* del trabajo había efectuado”. Einstein, airado y ofendido, retiró el artículo: “[el Sr. Rosen y yo] le enviamos el manuscrito para que se publicara y no le habíamos autorizado a que lo remitiera a ningún experto... No veo ninguna razón para discutir los comentarios –en cualquier caso erróneos– de su anónimo especialista. Como consecuencia de este incidente prefiero publicar el trabajo en otra revista”. El editor respondió lamentándolo, pero insistiendo en que no podía “aceptar un artículo en el *Physical Review* cuyo autor no permitiera mostrarlo al consejo editorial antes de publicarlo”. Sin embargo, Einstein y Rosen debieron reconsiderar después sus conclusiones: cuando su trabajo apareció publicado en 1937 (en el *Journal of the Franklin Institute*) habían corregido un serio error aprovechando las galeradas (una sutileza del sistema de coordenadas para la que hoy se llama ‘métrica de Einstein-Rosen’) y le habían dado un nuevo título, *Sobre las ondas gravitatorias* (el mismo que tenía el artículo de 1918), estudiando las ondas gravitatorias cilíndricas. Cabe preguntarse por la identidad del concienzudo *referee* que corrigió a Einstein. *The Physical Review* desclasificó hace años el libro de registros de esa época, ya fallecidos todos los protagonistas, y todo indica que fue el gran relativista Howard P. Robertson (1903-61). Einstein, pese a no tener razón en el ‘incidente’ que le evitó publicar una afirmación errónea, se mantuvo en sus trece y no volvió a someter ningún artículo más al *Physical Review* (el último suyo

en esa revista había sido el famoso trabajo ‘EPR’ de 1935, sobre el que volveremos en la segunda parte de este artículo).

Pero no hay nada como la verificación experimental. Aunque hubo que esperar más de medio siglo y Einstein no llegó a verlo, la emisión de ondas gravitatorias fue observada *indirectamente* estudiando el púlsar binario PSR B1913+16, descubierto por Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor Jr. en 1974 con el gran radiotelescopio de 300 m de diámetro de Arecibo (Puerto Rico), lo que les valió el Nobel de 1993. Un púlsar es una estrella de neutrones que gira sobre sí misma cientos de veces por segundo, producto de la explosión de una estrella como una supernova. Es un objeto densísimo (una cucharilla de púlsar pesaría 100 millones de toneladas; sólo los agujeros negros son más densos), que emite un haz de partículas y radiación por sus polos magnéticos produciendo el efecto de un faro cuando ‘ilumina’ periódicamente a un observador. El púlsar y la estrella de neutrones del sistema PSR B1913+16, de un radio de pocos kilómetros y masa comparable a la del sol, giran con creciente velocidad uno en torno a otro en una órbita de unas cuantas órbitas lunares, cada vez menor; la pérdida de energía se corresponde exactamente, con una precisión de 2 partes en mil, con la emitida en forma de ondas gravitatorias. Éstas se producen porque, de la misma forma que una carga acelerada emite ondas electromagnéticas, una masa acelerada emite ondas gravitatorias. Por ello, el sistema binario pierde energía y el radio de la órbita va disminuyendo en una espiral recorrida hacia el centro, una ‘inspiral’. Hasta nosotros mismos emitimos ondas gravitatorias –absolutamente imperceptibles, por supuesto– cuando movemos los brazos. Pero no hay simetría en cuanto a la intensidad del electromagnetismo y la gravedad: como se ha dicho, el primero es muchísimo más fuerte. Por eso es fácil producir ondas electromagnéticas detectables, como comprobamos cada vez que oímos la radio o nos llega un SMS y, sin embargo, la observación de ondas gravitatorias requiere emisores excepcionalmente potentes y receptores increíblemente sensibles.

Pero el 11-II-2016, hace una semana cuando escribo estas líneas, se ha hecho pública la detección *directa* –por fin, un siglo después– de ondas gravitatorias (ver fig. 3); el hecho es tan trascendental para la física que merece que nos detengamos en él. Éstas proceden de un sistema binario, esta vez ¡de agujeros negros!, de nuevo en un movimiento ‘inspiral’ debido a la pérdida

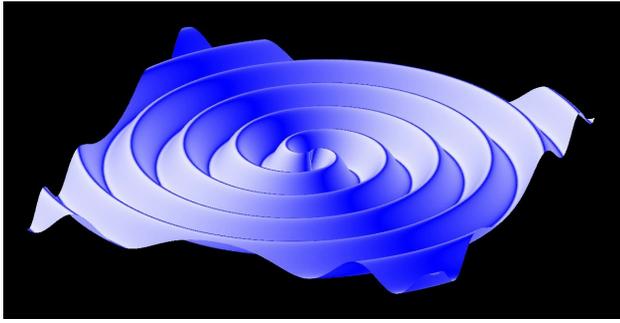


Figura 3. Ondas gravitatorias.

de energía por la emisión de ondas gravitatorias de frecuencia creciente de unos 35 Hz a 250 Hz. La aproximación fue gradual durante miles de millones de años y velocísima en los últimos minutos, para acabar en la última fracción de segundo a 75 vueltas/s, en órbitas de pocos centenares kilómetros, hasta colisionar ¡a más de la mitad de la velocidad de la luz! (0,6 c) y fundirse en un solo agujero negro (giratorio, ‘de Kerr’). Este auténtico cataclismo cósmico, el ‘acontecimiento GW150914’ (= *Gravitational Waves 14-sep-15*) de 0,2 s de duración, fue detectado el 14-IX-2015 primero por el observatorio LIGO-Livingston (Louisiana) y, 7 milisegundos después, por su homólogo LIGO-Hanford (Washington) a 3.000 km de distancia, con completo acuerdo entre las mediciones de uno y otro (fig. 4). Teniendo en cuenta que según la RG las ondas gravitatorias viajan a la velocidad de la luz, la diferencia temporal ha permitido mediante una triangulación establecer que la fuente de GW150914 estaba en la bóveda celeste del hemisferio Sur, a unos $1,34 \times 10^9$ años luz, vagamente en la dirección de la gran nube de Magallanes. Más aún, la señal observada coincide con la calculada numéricamente a partir de las ecuaciones de la RG de Einstein: *todo* en GW150914 concuerda con la RG. Einstein, aunque sorprendido, hubiera entrado de nuevo en éxtasis, esta vez más prolongado: como dijo en el anuncio de la gran noticia France A. Córdova, directora de la *National Science Foundation* (NSF), “Einstein estaría radiante”.

La sigla LIGO corresponde a *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*. La avanzadísima y exquisita tecnología de los dos interferómetros (tipo Michelson modificado), cada uno con brazos perpendiculares de ¡cuatro kilómetros! (fig. 6), permite que detecten el paso de las ondas gravitatorias ya que la tracción y compresión que éstas producen deforman los dos brazos de forma levisima, pero desigual. Los interferómetros pueden llegar a ser sensibles a variaciones de longitud increíblemente pequeñas, hasta 1/10.000 del diámetro de

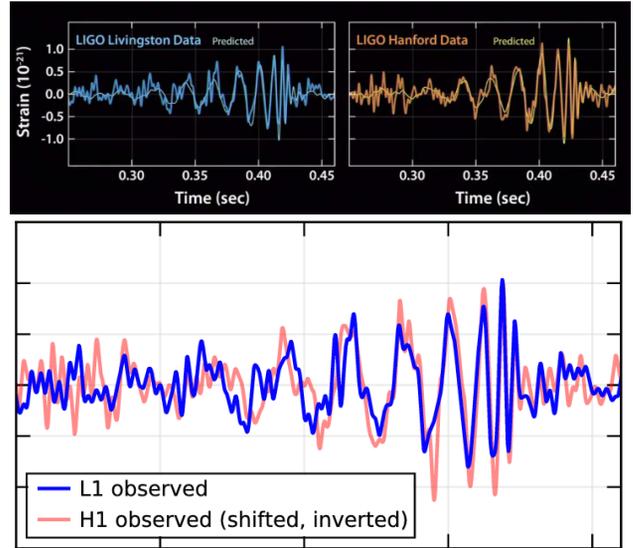


Figura 4. Las observaciones en Livingston (izquierda) y Hanford (derecha) y su coincidencia.

un protón, que es del orden de 10^{-15} m. La fusión de los dos agujeros negros, de masas en torno a 35 y 29 veces la del Sol en números redondos, dio lugar a un único agujero negro de unas 62 masas solares. Éste, inicialmente deformado, acabó oscilando como una campana golpeada por un martillo, emitiendo más ondas gravitatorias en un ‘ringdown’ final que atenuó las vibraciones de su superficie (horizonte), ‘desexcitándolo’ casi instantáneamente hasta la estabilidad (el ‘silencio’, fig. 5). Así pues, la fusión representó la súbita liberación en una fracción de segundo de una enorme energía en forma de ondas gravitatorias igual a unas 3 veces la masa del Sol⁷ ($E=mc^2$), con un pico de potencia de esas ondas radiadas por GW150914 de ¡unas 50 veces la de la luz de todo el universo visible! El paso de las distorsiones espaciotemporales originadas por las ondas gravitatorias creadas por el completo colapso de ese sistema binario, gigantesca y espectacular tormenta del (*del*, no ‘en el’) espacio-tiempo (fig. 5), es lo que se ha observado 1.300 millones de años después pese a la extrema debilidad de esas ondas al alcanzar la Tierra (también las olas de una gran tormenta lejana pueden ser casi imperceptibles al llegar a la playa).

⁷ Los resultados de las simulaciones numéricas son compatibles con el teorema del área de Hawking, pionero de la ‘termodinámica’ de los agujeros negros. Éste establece que la suma de las superficies de los ‘horizontes’ de los dos agujeros negros iniciales ha de ser menor que la del agujero negro que resulta de su fusión (el área se comporta como una entropía y, por tanto, no puede decrecer), lo que pone una cota superior a la energía total radiada en forma de ondas gravitatorias.

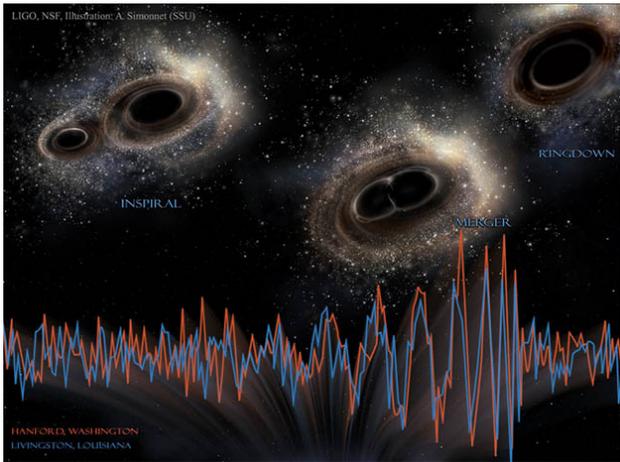


Figura 5. Cálculo numérico de la colisión y fusión de dos agujeros negros: 'inspiral', fusión, y 'ringdown' (= 'desexcitación' y estabilización del agujero negro final). Figuras: SXS (Simulating eXtreme Spacetimes Project).

El acontecimiento GW150914 observado por LIGO es de excepcional importancia para la física, pues incluye tres descubrimientos espectaculares: la primera detección directa de ondas gravitatorias y en el régimen fuerte de las ecuaciones de la RG, no en primera aproximación (campo débil); la primera observación de la existencia de agujeros negros de esas masas, en un sistema binario y, finalmente, su fusión en uno solo. Recordemos que el análisis del movimiento espiral convergente del púlsar binario PSR B1913+16 sólo había permitido concluir que se emitían ondas gravitatorias *indirectamente*, aunque con gran precisión, y que hasta ahora no se habían observado directamente agujeros negros, ni en parejas, ni mucho menos su fusión. No es extraño que David H. Reitze, director ejecutivo de la colaboración LIGO que involucra a Estados Unidos, 14 países más y a un millar de personas (cinco de ellas, coautoras del artículo del *Physical Review Letters* que anunció el descubrimiento, pertenecen a la Univ. de las Islas Baleares e incluyen a Alicia M. Sintes y Sascha Husa, miembros de la RSEF), iniciara la rueda de prensa⁸ de la NSF recreándose en sus palabras: *We have detected gravitational waves. We did it!* Es bien posible que hayan hecho más: entre los datos de LIGO que quedan por estudiar, es muy

⁸ En la que, por supuesto, no olvidó expresar su sincero agradecimiento a los *tax-payers*. El proyecto LIGO, iniciado en 1994, ha sido financiado por la NSF y concebido y realizado por el MIT y Caltech. La detección se produjo enseguida, en las pruebas preliminares; era tan clara que hubo que descartar que fuera una 'trampa', una señal falsa de las que se introducen adrede y secretamente para mantener alerta a los investigadores.

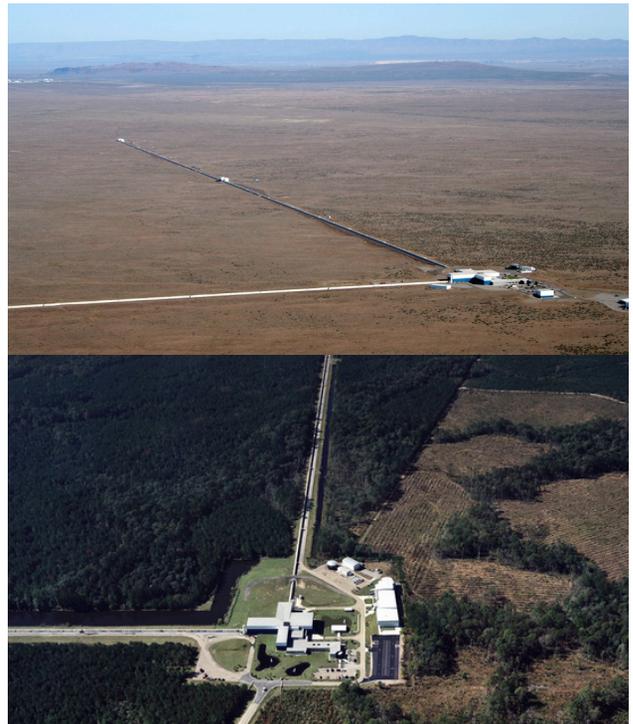


Figura 6. Advanced LIGO Hanford (arriba) y Advanced LIGO Livingston (abajo).

probable –es un secreto a voces– que haya alguna otra detección esperando ser analizada. Y en breve habrá más LIGOs formando una red global en Italia, India, Japón y GEO600 en Alemania, lo que mejorará la precisión (y la localización de las fuentes de las ondas gravitatorias).

Desde el s. XVII con Galileo, la astronomía progresó viendo –literalmente– planetas y estrellas utilizando telescopios ópticos ordinarios, refractores o reflectores (*astronomía óptica*). Hoy, el mayor observatorio óptico del mundo se encuentra en Cerro Paranal, en el desierto de Atacama en Chile: el *Very Large Telescope [VLT]* del European Southern Observatory tiene cuatro grandes reflectores principales móviles de 8,2 m de diámetro. Durante el pasado siglo, la capacidad de observación se aceleró gracias a la utilización de radiotelescopios (*radioastro-*

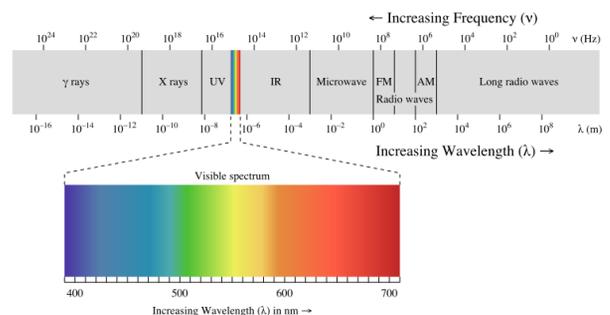


Figura 7. El espectro electromagnético.

nomía), a situar instrumentos en el espacio (*astronomía de rayos X*), o incluso gracias a la astronomía de rayos gamma, la radiación electromagnética de mayor energía (o frecuencia; ver fig. 7). No obstante, todas estas distintas ‘astronomías’ tienen una característica común: todas observan radiación electromagnética. Sólo una pequeña parte de ese espectro es visible para nuestros ojos, pues somos ciegos más allá del violeta (‘ultravioleta’) y por debajo del rojo (‘infrarrojo’), aunque ninguna característica especial separa el resto del espectro electromagnético de la zona visible; la astronomía óptica cubre esa zona (o algo más).

Del mismo modo, la radiación cósmica de fondo en la zona de microondas que llena el universo, la *Cosmic Microwave Background* (CMB, fig. 8), una de las bases del *Big Bang* o *modelo cosmológico estándar* del origen del universo, es también radiación electromagnética y es detectada por radiotelescopios. Así la encontraron –accidentalmente– Arno Penzias y Robert W. Wilson en 1965 cuando calibraban la *horn antenna* (por su forma de cuerno) de los *Bell Labs.* en Holmdel (New Jersey), recibiendo el premio Nobel de 1978 “por su descubrimiento de la CMB”. La existencia de la CMB ya había sido predicha por Ralph A. Alpher (que fue doctorando de Gamow) y Robert C. Herman en 1948, aunque su trabajo permaneció ignorado.

La CMB inició su viaje cuando el universo se hizo transparente para la luz, unos 380.000 años tras el *Big Bang*; se trata, por tanto, de la ‘luz’ más antigua del universo. Antes, éste estaba formado por un plasma densísimo y muy caliente de fotones, protones y electrones, opaco para la radiación electromagnética. Sólo tras su parcial enfriamiento durante esos primeros 380.000 años los electrones y protones pudieron unirse para formar un gas de átomos neutros, *desacoplándose* la radiación y dando lugar a un universo transparente en el que la luz

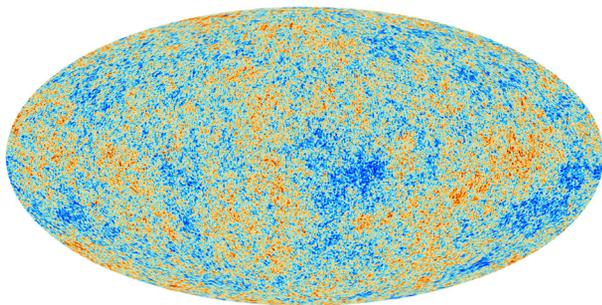


Figura 8. La luz más antigua del universo: la CMB y sus leves anisotropías (satélite Planck de la Agencia Espacial Europea, 2013). La figura se obtiene cortando la esfera celeste por un ‘meridiano’ y abriéndola por ambos lados.

ya pudo viajar libremente (fig. 10). Esta radiación de fondo, cuyo espectro coincide con extraordinaria exactitud con la curva de la radiación térmica que cabría esperar de un caliente universo primitivo, es la que hoy nos llega correspondiendo casi uniformemente⁹ a la temperatura absoluta de 2,7 K (~ -270°C), la misma en todas las direcciones. Sin embargo, la información sobre el universo anterior a esos primeros 380.000 años, el universo primitivo o *primordial*, es muy difícil de obtener. No obstante, se ha tratado de hallar el rastro de las ondas gravitatorias primordiales que prevé la teoría de la *inflación* (nota 11) buscando su huella en la CMB (los ‘modos B’ de polarización). El observatorio BICEP2 (*Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2*) en el polo Sur (fig. 9), pareció detectar en 2014 la ‘señal’ dejada por esas ondas primordiales en la radiación de fondo y por tanto su existencia, aunque ésta habría sido una detección menos directa que la observada por LIGO. Sin embargo, un posterior análisis conjunto de los datos de BICEP2/KEK *array* y del satélite europeo Planck (que ha producido hasta ahora el mapa más detallado de la CMB, fig. 8), mostró que dichos efectos eran consecuencia de contaminación debida al polvo cósmico en nuestra galaxia indicando, de paso, la dificultad de observar ondas gravitatorias por esa vía. LIGO, por su parte, probablemente no sería capaz de detectar esas ondas primordiales. Paralelamente a estos esfuerzos, la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó el 3-XII-15 el satélite *LISA (Laser Interferometer Space Antenna) Pathfinder*. Éste ya ha llegado al ‘punto de Lagrange 1’, un lugar de estabilidad a millón y medio de kilómetros de la Tierra y en direc-

⁹ Las pequeñas fluctuaciones (de 1 parte en 10^5) de temperatura, huella de la expansión súbita tras el *Big Bang*, corresponden a regiones de densidades levemente diferentes y son las semillas de las futuras estructuras, las estrellas y galaxias de hoy. Estas pequeñas variaciones, reflejo de las fluctuaciones cuánticas del universo primitivo, apoyan la idea de la *inflación*. Ésta da cuenta de la *hinchazón* súbita que sufrió el universo en sus orígenes: describe su evolución inmediatamente después del *Bang* del *Big Bang* (ver nota 11), pero no el propio *Bang*, del que no dice absolutamente nada. Durante el brevísimo período inflacionario ($\sim 10^{-35}$ s) un universo increíblemente diminuto (más pequeño que un protón) se expandió exponencialmente, al menos $\sim 10^{30}$ veces. Cabe imaginar que el universo ‘inicial’ era tan pequeño que ya tenía una temperatura uniforme y la inflación preservó esa propiedad. La expansión de las ondas de la radiación liberada 380.000 años después ha reducido su temperatura a los actuales 2,7 K de la CMB. Ésta presenta, además, la pequeñísima falta de uniformidad ya mencionada que prevé la inflación.

ción al Sol, donde pondrá a prueba los instrumentos para un futuro observatorio espacial de ondas gravitatorias. Éste tendrá tres satélites en los vértices de un gigantesco triángulo, con lados de un millón de kilómetros, para detectar las vibraciones del espaciotiempo. También otras grandes instalaciones, como el *IceCube*, el mayor detector de neutrinos del mundo (el *South Pole Neutrino Observatory* es un cubo de 1 km de lado) y ANTARES (éste en el fondo del Mediterráneo, a 40 km de Tolón en Francia), han tratado de observar neutrinos de alta energía atribuibles a GW150914. Su detección permitiría fijar mejor la situación del violentísimo acontecimiento, pero un artículo muy reciente de la colaboración ANTARES-IceCube-LIGO-Virgo informa de que no se han observado neutrinos que puedan ser asociados a GW150914. De hecho, el resultado se ha utilizado para establecer cotas para la emisión de neutrinos en ese tipo de sucesos que, aunque posible, no parece probable (fotones y neutrinos serían abundantes si, por ejemplo, la fusión fuera de un agujero negro con una estrella de neutrones).

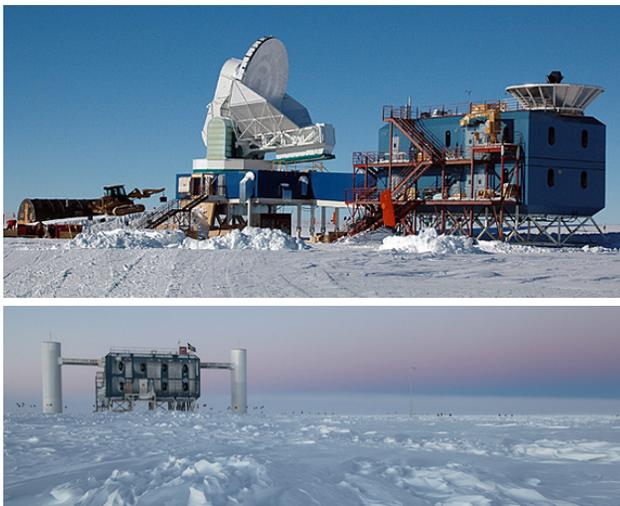


Figura 9. El radiotelescopio BICEP2 y la instalación exterior del detector de neutrinos IceCube cerca del Polo Sur.

Es conveniente insistir en que las ondas gravitatorias tienen una naturaleza completamente distinta a la radiación electromagnética; genéricamente, cabe referirse a esta última como ‘luz’, sea visible o no. Por el contrario, la radiación gravitatoria no es consecuencia de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, sino de las ecuaciones del campo gravitatorio de la RG de Einstein: no corresponde a ondas propagándose *por* el espacio como las electromagnéticas, sino que son perturbaciones *del propio* espaciotiempo. Se trata de ondas producidas por el movimiento de masas aceleradas que no pueden ser apantalladas, absorbidas ni desviadas. Por ello, aun-

que no se puede ver la luz de regiones enteras de la Vía Láctea debido al polvo que encuentra en el camino y tampoco se puede observar directamente la primera parte del *Big Bang* porque el Universo era opaco hasta que cumplió 380.000 años, la situación para las ondas gravitatorias es completamente distinta. Como prácticamente no interactúan, pueden propagarse a la velocidad de la luz a distancias cosmológicas sin corromperse –sin distorsión– y la información que transportan sigue siendo la misma que cuando se crearon en un tiempo muy lejano. Además, como un instante después del *Big Bang* el universo ya era ‘transparente’ para las ondas gravitatorias, éstas han abierto una ventana a una astronomía completamente nueva que permitirá observar el universo en sus comienzos, sin las limitaciones de la astronomía electromagnética. Kip Thorne, promotor de LIGO (junto con R. Weiss, R. Drever y otros), gran experto en el campo y coautor de un libro clásico sobre gravitación –el ‘de la manzana’– dijo en una ocasión que “la gravitación es el paraíso de los teóricos y el infierno de los experimentales”. Hace meses se cruzó la puerta de ese infierno experimental pero, al contrario que en el infierno de Dante, hacia la esperanza de una nueva forma de observación. Se ha abierto un nuevo campo de investigación, la *astronomía de ondas gravitatorias*, que dará acceso a los aspectos literalmente más retorcidos del universo, antes inaccesibles, y que permitirá también explorar sus inicios (el *Bang* del *Big Bang*), donde los aspectos cuánticos de la gravedad no pueden ignorarse.

En efecto, al analizar el universo primitivo se podrá ir más allá de la teoría de la RG de Einstein que, al no ser cuántica, ha de aceptarse como una aproximación de una teoría más completa cuya formulación no coincidirá con las ecuaciones de la RG¹⁰. Pero aún no se conoce

¹⁰Por ejemplo, se pueden estudiar los cambios en las ecuaciones de la RG einsteiniana que se obtienen cuando se modifica la ‘acción’ de Hilbert-Einstein que conduce a ellas (el *principio de acción* suele usarse para establecer las ecuaciones de las teorías fundamentales y la RG no es una excepción). La acción de la RG viene dada en términos de la curvatura escalar R ; la modificación más sencilla es el modelo de A. Starobinsky (1980) que se obtiene añadiendo un término en R^2 . El resultado es equivalente a la RG con la adición de un campo escalar (el *escalárón* en la terminología original). El modelo de Starobinsky es un modelo inflacionario (nota 11) y está de acuerdo con los datos del satélite Planck para la CMB. Otros modelos se obtienen utilizando distintas potencias de tensores R relacionados con la curvatura (son, por tanto, ‘*higher curvature theories*’); el modelo de Starobinsky también se puede englobar en teorías de supergravedad, etc.

la teoría cuántica de la gravedad, el Santo Cáliz de la física teórica. El origen de la dificultad de esa cuantización es fácil de comprender: en las demás teorías, se cuantizan campos (el de Dirac o el electromagnético, por ejemplo) que están definidos *sobre* el espaciotiempo; en la gravedad, se intenta cuantizar la geometría espaciotemporal misma. Como teoría cuántica de campos, se dice que la gravedad no es *renormalizable*, lo que expresa que no se pueden eliminar consistentemente los infinitos sin sentido (las divergencias ‘ultravioleta’) que inevitablemente genera la teoría, algo que ya sospechaba Richard P. Feynman (1918-88, Nobel 1965) en sus lecturas sobre gravedad de Caltech, impartidas en el curso 1962-63. Una posibilidad de evitar divergencias es introducir *más simetría*; la *supergravedad* y la teoría de cuerdas están en esa línea, que no está exenta de otros problemas.

La actual ausencia de una teoría cuántica de la gravedad hace difícil, en particular, dar cuenta de los inicios del universo, hoy descritos por medio de la *inflación*¹¹.

¹¹La(s) teoría(s) de la inflación fueron iniciada(s) a principios de los años ochenta por A. Starobinsky (*avant la lettre*), A. Guth (quien acuñó el término *inflación* en 1981), A. Linde, P. Steinhardt (y otros). La inflación es un brevísimo período de expansión acelerada en el origen del universo. La teoría del *universo inflacionario* permite explicar algunas de sus sorprendentes propiedades, de las que aquí se mencionarán dos. La primera es que, muy aproximadamente, el universo actual es crítico o geoméricamente plano. Esto corresponde a que una cierta constante Ω , que recibe contribuciones tanto de la materia ordinaria y la radiación ($\Omega_m \sim 0,05$), como de la materia oscura (*cold dark matter*, $\Omega_{\text{CDM}} \sim 0,25$) y de la energía oscura ($\Omega_\Lambda \sim 0,7$), vale la unidad: $\Omega \sim 1$. Como $\Omega = 1$ es un punto de equilibrio inestable para una expansión decelerada, para que hoy sea $\Omega = \Omega_m + \Omega_{\text{CDM}} + \Omega_\Lambda \sim 1$ –incluso permitiendo un generoso margen– en los inicios del universo debería ser exactamente $\Omega = 1$ con una precisión tan gigantesca como absurda (lo que constituye el problema del ajuste fino o *fine tuning*); un *Bang* cualquiera no explicaría por qué $\Omega \sim 1$ hoy. Pero el *Bang* inflacionario, sin embargo, consigue que Ω acabe siendo uno aunque inicialmente no lo fuera, de la misma forma que una parte de la superficie de una esfera se parece cada vez más a un plano cuanto más se hincha ésta; de hecho, para la expansión acelerada, $\Omega = 1$ es lo que se llama un ‘atractor’.

Otra característica del universo que requiere explicación es que es homogéneo e isótropo a gran escala (*principio cosmológico*), pese a estar repleto de regiones causalmente desconectadas *i.e.*, que no podrían ‘ponerse de acuerdo’ por medio de señales luminosas. Éste es el *problema del horizonte* pues, ¿cómo podrían ‘ajustar’ sus propiedades dos horizontes (límites observables) opuestos del universo, separados por 13.800 millones de años luz en ambas direcciones, para conseguir parecerse? (se habla de *superhorizonte* cuando hay desco-

Volviendo a la radiación gravitatoria, es importante conocer si el cuanto asociado, el *gravitón*, tiene exactamente masa cero (y *helicidad* dos) al igual que el *fonón* (éste de *helicidad* uno), que es el cuanto de la radiación electromagnética. La masa cero corresponde a propagación con la velocidad de la luz c ; si el gravitón tuviera masa m_g no nula, tendría más ‘polarizaciones’ y la fuerza gravitatoria disminuiría más rápidamente con la distancia, lo que tendría consecuencias a la hora de atribuir la expansión acelerada del universo a la energía oscura.

nexión causal, y de *subhorizonte* en caso contrario). El modelo inflacionario del universo resuelve el problema porque las regiones que hoy están causalmente desconectadas formaron parte inicialmente de una diminuta región del *Bang* inflacionario no muchísimo mayor que la longitud de Planck ($1,6 \times 10^{-35}$ m).

La mecánica cuántica y más precisamente la teoría cuántica de campos en un universo en expansión (iniciada por Leonard Parker en los 1960) es responsable de las fluctuaciones que, junto con la hipótesis inflacionaria, permiten explicar las estructuras actuales del universo. Pensando en la nucleosíntesis, Carl Sagan decía que somos materia de estrellas (*star stuff*), pero igualmente podríamos decir yendo más atrás en el tiempo que somos resultado de ‘fluctuaciones cuánticas’, tanto nosotros como las estructuras del universo: planetas, estrellas, galaxias... Como se ha mencionado, esas fluctuaciones también dejaron su huella en la CMB y su observación es una prueba en favor de la inflación. Por supuesto, una cuestión importante es el estudio del mecanismo cuántico que la desencadena; éste requiere la presencia de un campo escalar (como el bosón de Higgs descubierto en 2012 en el LHC del CERN), genérica y apropiadamente llamado *inflatón*, que sería el responsable de la enorme densidad del universo inicial.

La inflación plantea, además, una cuestión muy interesante: ¿se necesita energía para iniciar el *Bang* inflacionario? La energía del campo gravitatorio newtoniano es *negativa*, lo que sigue siendo cierto en la RG. La masa tiene por supuesto energía positiva; si se tiene en cuenta la negativa del campo gravitatorio, se puede mantener el principio de conservación de la energía, que no pone límites al crecimiento inflacionario de una y otra con tal que su suma, la energía total, sea constante e incluso cero. El brillantísimo Feynman ya había considerado, en las lecturas de Caltech citadas de 1962-63, que la energía total del universo bien podía ser cero y que la creación de materia era posible porque su energía podía cancelarse por la energía potencial gravitatoria. En ese caso, el universo parecería de la nada, o casi, para hincharse después. Como dijo Alan Guth, “*the universe is the ultimate free lunch*”. La física cuántica y la inflación, juntas, permitirían que el universo haya surgido de la nada, *gratis*, una idea cuyos antecedentes se remontan a Richard C. Tolman (1932) y que expuso (para un universo oscilante) en su clásico texto *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology* (1934); la idea de que el universo es una fluctuación cuántica fue considerada por Edward P. Tryon en un artículo de dos páginas (*Nature*, 1973).

Los resultados de LIGO establecen una cota superior insignificante, $m_g < 1,2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$ (otras cotas son aún menores), así que es casi seguro que el gravitón tiene masa cero.

La visión de Einstein de la mecánica cuántica (el *realismo local*) y las consecuencias de la violación de las desigualdades de Bell se discutirán en la segunda parte de este artículo, que se publicará en el siguiente número de 100cias@uned.

BIBLIOGRAFÍA

Existen ya varias recopilaciones de todos los trabajos y de muchos escritos de Einstein, con traducción al inglés en su caso, en:

- Univ. de Princeton: *The Collected Papers of Albert Einstein* (CPAE), <http://einsteinpapers.press.princeton.edu/>;
- CalTech: *The Einstein Papers Project*, <http://www.einstein.caltech.edu/>;
- Universidad Hebrea de Jerusalén: *Los archivos de Albert Einstein*¹², <http://www.albert-einstein.org/archives5.html>

Hay un sinnúmero de biografías y libros sobre Einstein, entre los que destaca la biografía científica de Abraham Pais, *Subtle is the Lord: The science and the life of Albert Einstein*, Oxford Univ. Press (1982; trad.

¹²Tras la muerte de Einstein, sus documentos y cartas fueron recogidos por sus albaceas, su secretaria Helen Dukas y el Dr. Otto Nathan y, tras recorrer varios lugares, pasaron a la *Librería Judía de Jerusalén*. Hoy, La *Universidad Hebrea de Jerusalén* es la depositaria de la mayor parte del importante legado documental de Einstein. Durante algún tiempo, ese legado no fue accesible en su totalidad; el profesor emérito de esa universidad Hanoch Gutfreund, a cuyo cargo están los documentos de Einstein, me aseguró recientemente que ya no hay partes reservadas.

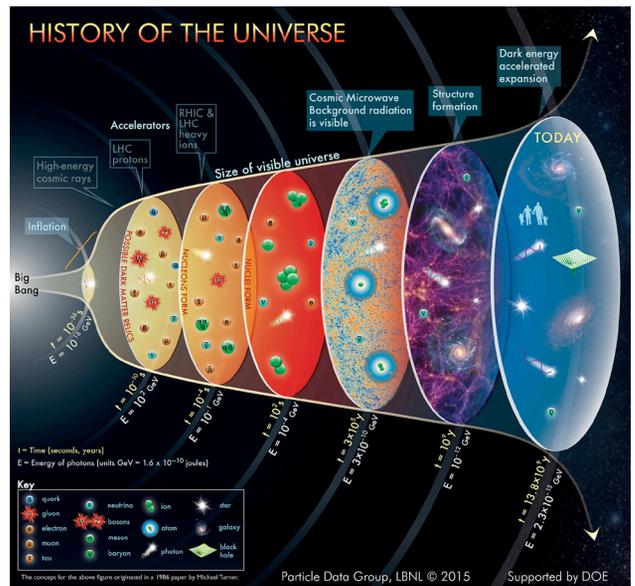


Figura 10. La historia del Universo (Particle Data Group, LBNL 2015).

española *El señor es sutil*, Ariel, 1984) y *Einstein Lived Here*, también de A. Pais (Oxford Univ. Press, 1994).

Un recorrido por la vida, la ciencia y la época de Einstein se puede encontrar en mi libro *En torno a Albert Einstein, su ciencia y su tiempo*, Servicio de Publicaciones de la Univ. de Valencia, 2ª ed. (2006) 328 págs., ISBN: 84-370-6599-2.

El libro *Einstein* (de la colección *Grandes Pensadores* de Planeta-Agostini, 2008) tiene una contribución de José M. Sánchez Ron (*Vida y obra*) y otra de Luis Navarro Veguillas (*Los comienzos de la física cuántica*) así como escritos de Einstein; en particular, incluye un largo extracto de *Mein Weltbild* (*Mi visión del mundo*) que recoge reflexiones de Einstein originalmente publicadas en 1934.

J. Adolfo de Azcárraga
 Profesor emérito de la Universidad de Valencia
 y miembro del IFIC (CSIC-UV)
<http://www.uv.es/~azcarrag/articulos.htm>