

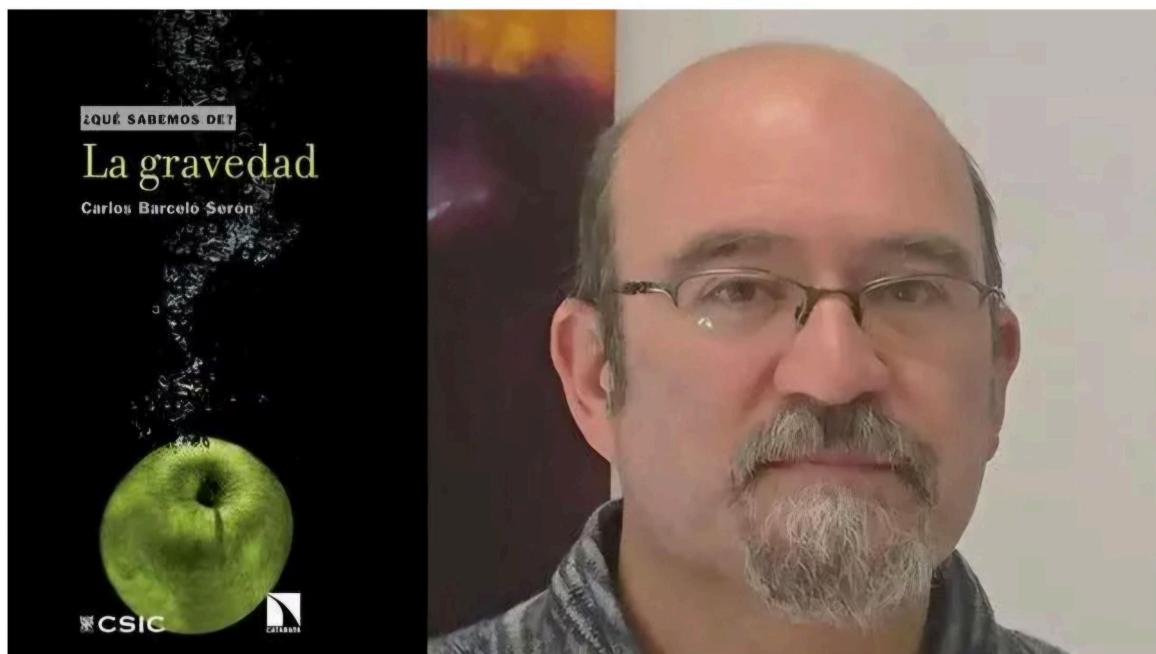
AVANCES DE CIENCIA

Seísmos en el espaciotiempo

Carlos Barceló Serón

29 MAR 2018

Extracto de “La gravedad. Desde el nacimiento de la relatividad general hasta la detección de ondas gravitacionales” de Carlos Barceló Serón (Editorial CSIC-La Catarata, 2018)



Selección a cargo de Michele Catanzaro

Washington D.C., jueves, 11 de febrero de 2016, el profesor David Reitze anuncia la primera detección directa de ondas gravitacionales. Los meses anteriores han sido frenéticos para todo el personal de la colaboración LIGO, siglas inglesas por las que se conoce al Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser, una gran infraestructura científico-tecnológica instalada en suelo estadounidense. Después de casi 40 años de desarrollos y de un enorme esfuerzo financiero y humano, el 14 de septiembre de 2015 los dos detectores de LIGO habían captado por fin una señal y había que

cerciorarse lo más rápido posible de si correspondía realmente a ondas gravitacionales. Tras extensos e intensos análisis, los responsables de LIGO concluyen que, dentro de las dudas razonables que siempre entrañan este tipo de descubrimientos, la señal corresponde ciertamente a ondas gravitacionales, siendo además de un tipo fácilmente reconocible por los especialistas del área: se ha detectado un seísmo en el espaciotiempo causado por la fusión de dos agujeros negros de 30 veces la masa del Sol cada uno para formar un único agujero negro (fenómeno conocido como “coalescencia”); el suceso ocurrió a más de 1.000 millones de años luz de nuestra galaxia, una distancia cosmológica. Con seguridad, estamos ante uno de los acontecimientos científicos más importantes en décadas.

Las ondas gravitacionales no son nada más que seísmos en la fábrica del propio espaciotiempo, causados por fenómenos en los que hay rápidos y violentos movimientos de grandes cantidades de materia; lo análogo a los desplazamientos de falla causantes de los terremotos terrestres.

Hemos usado las palabras “gravitacional”, “espaciotiempo”, “agujero negro”, “cosmológica”, todos ellos conceptos no fácilmente asimilables y todavía no completamente incorporados al acervo cultural popular. Una comprensión adecuada del concepto de “onda gravitacional” y del alcance y significación de su detección solo es posible en el marco del contexto mucho más amplio de la física gravitatoria. Este marco lo proporciona la teoría general de la relatividad, con la que entendemos actualmente el hecho gravitatorio o la gravedad.

El hecho gravitatorio es conocido desde la antigüedad. Fue sin embargo Isaac Newton quien, en el siglo XVII, le dio a la gravedad una primera identidad precisa, elevándola a la cúspide de las teorías físicas. Incluso en los diccionarios actuales se define gravedad como la fuerza de interacción universal a la que se ven sometidos todos los cuerpos por el mero hecho de ser corpóreos (de poseer masa). La conceptualización de la gravedad proporcionada por Newton permaneció inmutable durante más de 200 años, hasta que Albert Einstein se vio impelido a revisarla. La teoría general de la relatividad es la nueva teoría sobre la

gravedad que Einstein construyó entre 1907 y 1915, en un pulso intelectual como pocos en la historia. El 24 de noviembre de 1915, Einstein presentaba la versión final de su teoría a la Academia de Ciencias de Prusia. La nueva teoría de la gravedad ofrecía una nueva y revolucionaria forma de conceptualizar el hecho gravitatorio. El concepto newtoniano de fuerza perdía su preponderancia, pasando el testigo a unos novedosos conceptos de “espacio”, “tiempo”, “velocidad de la luz” y “curvatura”; la gravedad pasaba a ser la geometría del espaciotiempo, el escenario donde se desarrollaba la historia universal. Además, este escenario no era pasivo, sino que interaccionaba con la materia amoldándose a su distribución: el espaciotiempo mismo era parte fundamental de la historia.

La teoría general de la relatividad —a partir de ahora, la relatividad general— produjo una enorme revolución conceptual. Pronto se apreció su gran belleza y alcance; la teoría desprendía un aroma a realidad: no hablaba de un modelo de la realidad sino de la realidad misma. Inmediatamente, la teoría cobró vida propia, sorprendiendo incluso a su propio creador. En unos años, fue capaz de proporcionar una explicación espaciotemporal al recién descubierto alejamiento de las galaxias: el espacio entre las galaxias se expandía. Sin embargo, aunque revolucionaria en sus conceptos, no era obvio que fuese a ser posible someter la teoría a un escrutinio experimental exhaustivo. En el ámbito cosmológico, no era previsible que en mucho tiempo la teoría pudiera proporcionar información cuantitativa, más allá de su, por otra parte, espectacular explicación cualitativa de la expansión. En escenarios más cercanos, como el mismo sistema solar, la teoría se mostraba en lo cuantitativo tan solo como una sutilísima corrección a la teoría de Newton. Y no fue hasta 1960 cuando el especialista en relatividad general John Synge daba a entender en un famoso pasaje que los físicos relativistas vivían en una torre de marfil estudiando los pormenores de la teoría y aceptando e incluso disfrutando de su falta de aplicabilidad.

"Las ondas gravitacionales no son nada más que seísmos en la fábrica del propio espaciotiempo, causados por fenómenos en los que hay rápidos y violentos movimientos de grandes cantidades de materia; lo

análogo a los desplazamientos de falla causantes de los terremotos terrestres."

Toda la comunidad científica apreciaba la belleza de la teoría, pero solo unos pocos decidían dedicarse a esta disciplina en cuerpo y alma: avanzar en ella no era fácil y labrarse una carrera de éxito académico, tampoco. Así, la relatividad general quedó un tanto desatendida durante años.

La situación comenzó a cambiar en los sesenta y setenta del pasado siglo, probablemente debido al hecho combinado de la llegada de nuevas observaciones y novedosos métodos matemáticos para estudiarla. Desde entonces, su crecimiento ha sido espectacular e imparable, sin ningún signo de agotamiento, más bien al contrario. La relatividad general es en la actualidad fundamental para un gran número de áreas de investigación. Además, muchas de estas áreas se apoyan en observaciones de gran riqueza y precisión. La relatividad general ya no es una disciplina exclusivamente teórica, sino que conforma un rico entramado de teoría, observaciones y experimentos. La detección de ondas gravitacionales es su último gran hito. La intención primera de este libro es precisamente trasmitir cuán vasto es el territorio que hoy por hoy delimita la relatividad general o, en términos todavía más generales, la gravedad. Para ello proponemos una visita panorámica introductoria al territorio gravedad y a sus brumosas fronteras.

La visita guiada que propone este libro comenzará por los fundamentos de la gravedad y la relatividad general. Tras un breve repaso histórico del concepto de gravedad, pasaremos a proponer y describir cuatro conexiones mentales primarias que uno podría hacer al oír la palabra "gravedad". Es nuestro destilado particular de la relatividad general y la gravedad (inevitablemente aquí entra nuestro gusto subjetivo). Un segundo capítulo se acercará a la relatividad general describiendo experimentos que la desvelan en nuestro entorno terrestre más cercano. Veremos cómo la relatividad general está presente incluso en los cotidianos navegadores de nuestros móviles. Más allá del entorno terrestre, hay tres contextos donde la relatividad general deja su impronta con especial intensidad: en el comportamiento de los objetos

estelares muy compactos, en el comportamiento del universo como un todo —la cosmología— y en los procesos de emisión de ondas gravitacionales. Dedicaremos un capítulo a cada uno de estos contextos. Pero antes de entrar a describirlos, haremos una breve incursión por el mundo de las matemáticas de la relatividad general, ya que son los conceptos forjados aquí los que se utilizan para describir las distintas situaciones físicas. Una vez explorado el territorio gravedad mejor conocido, pasaremos en un último capítulo a reflexionar sobre lo que pudiera existir en las brumosas fronteras de la relatividad general. Aunque todavía un terreno repleto de arenas movedizas, haremos una pequeña incursión hacia la gravedad cuántica.

La historia de las ondas gravitacionales comenzó precisamente cien años antes de su detección. En 1916, Albert Einstein, armado con su recién cocinada teoría de la gravitación, predecía la existencia de ondas gravitacionales. También en 1916, el astrofísico germano Karl Schwarzschild encontraba la primera solución a las ecuaciones de Einstein; es lo que ahora se conoce como “agujero negro”. En 1917, una vez más, Einstein publicaba sus primeras reflexiones sobre el universo como un todo a la luz de su teoría; nos encontramos ante el primer modelo cosmológico moderno. En unos pocos años, la atracción universal de Newton se reinventa para volver a ser la reina de la física. Después de cien años de altibajos, en nuestra opinión, sigue manteniendo ese reinado.

"La relatividad cambia complementemente nuestra noción de presente ampliándola enormemente: dado un acontecimiento de referencia, es presente todo acontecimiento desconectado causalmente de él; además, dos acontecimientos de este presente no tienen un mismo pasado, ni presente ni futuro."

Un destilado de gravedad

¿Qué aspectos importantes deberíamos retener sobre la gravedad? En este apartado nos atrevemos a destacar cuatro aspectos de la relatividad general y la gravedad, cuatro aspectos primarios que creemos que deberían resonar en nuestras mentes siempre que

oigamos mencionar la relatividad general o la gravedad. Deseamos que este apartado sirva también como una introducción a los ingredientes principales de la relatividad general.

La gravedad es geometría espaciotemporal

Uno de los conceptos básicos de la física contemporánea es el concepto de “campo”. Un campo es el resultado de asociar a cada punto del espacio e instante del tiempo un valor o serie de valores numéricos. Un ejemplo habitual de campo es el campo de temperatura de los mapas del tiempo, en los que se ve cómo la temperatura varía de unos lugares a otros; en las previsiones para los días venideros vemos que este mapa de temperaturas varía con el tiempo. Otro mapa habitual es el de vientos, que nos indica la cantidad de viento y en qué dirección sopla en cada región (con dos números podemos especificar completamente cada flechita). Pues bien, la física fundamental moderna ha conseguido interpretar todo lo observado a nivel de sus constituyentes más elementales en términos de campos que describen la materia (lo que podríamos entender como objetos) y campos que describen cómo unos objetos son capaces de interaccionar con otros a distancia. Entre todos los campos de interacción, hay uno que juega un papel especial: el campo de la gravedad, que describe las características métricas del propio espaciotiempo, cómo de curvado está el espaciotiempo y en qué direcciones. Es como si todos los demás campos vivieran o tuvieran soporte en el campo de la gravedad. Un aspecto fundamental del campo de gravedad es que es capaz de absorber toda la información sobre el sistema de referencia que se está usando en la descripción del resto de campos. Einstein convirtió la gravedad en sinónimo de geometría espaciotemporal.

En general, el espaciotiempo está curvado solamente si hay algo que lo curve; ese algo es precisamente la materia (también los otros campos de interacción contribuyen a la curvatura). Las famosas ecuaciones de Einstein de 1915 determinan completamente el campo de curvatura preciso originado por una distribución concreta de materia. Los movimientos de los cuerpos materiales debidos a la gravedad también se derivan de estas ecuaciones: un cuerpo curva el espaciotiempo a su

alrededor y, de esta forma, afecta al movimiento de otro cuerpo, que se mueve en un espaciotiempo curvado; recíprocamente, ese cuerpo curva a su vez el espaciotiempo a su alrededor, afectando el movimiento del primero. Como resultado, los dos cuerpos se ven mutuamente atraídos. Esta es la forma geométrica con la que se describe en la actualidad la fuerza de atracción de Newton. Puntualizamos ya aquí que el espaciotiempo es curvado por los dos cuerpos de forma distinta a como lo hubiera hecho cada uno por separado —se dice que la gravedad es “no lineal”, pues los efectos no se suman directamente—.

Tiempo y espacio están conectados por la causalidad

¿Por qué los físicos relativistas solemos hablar habitualmente de espaciotiempo conjuntamente en lugar de espacio y tiempo? La respuesta tiene que ver con un ingrediente fundamental para comprender el universo: la causalidad. Observamos que las noticias sobre cualquier acontecimiento tardan en llegar, es decir, nunca llegan instantáneamente, y tardan más cuanto más lejos se producen.

Cuando intentamos aumentar la velocidad a la que transmitimos la información, resulta que nos encontramos con una barrera. La naturaleza solamente parece permitir enviar información si esta viaja a menor velocidad que una velocidad concreta y singular: la de la luz.

Extendiendo el principio de relatividad de Galileo (que las leyes físicas de la mecánica son iguales para sistemas de referencia en movimiento uniforme relativo) a la luz y, por tanto, postulando que el valor de la velocidad de la luz es independiente del observador que la mida, Einstein se dio cuenta de que esto implicaba que la duración de un proceso dependía de quién la midiera. El espacio y el tiempo son entidades que aparecen ligadas por la causalidad y la asignación directa de una distancia temporal o espacial a dos acontecimientos no es objetiva. El único hecho objetivable es la propia relación entre espacio y tiempo, la causalidad: el que un acontecimiento pudiera haber afectado causalmente a otro o no es una afirmación que no depende de quien la haga.

Uno de los hechos fundamentales de la nueva comprensión del espacio y el tiempo es que no existe un concepto universal de simultaneidad. La intuición primigenia que nos hacemos del mundo es que hay un tiempo igual para todos que va avanzando sin parar (el tiempo absoluto de Newton). Si lo paramos en un instante determinado, podemos separar todos los acontecimientos entre los que ya han sucedido (el pasado), los que todavía no han sucedido (el futuro) y una instantánea de acontecimientos simultáneos que representan el presente; todos los acontecimientos de un mismo presente tienen un mismo pasado y futuro. La relatividad cambia complementemente nuestra noción de presente ampliéndola enormemente: dado un acontecimiento de referencia, es presente todo acontecimiento desconectado causalmente de él; además, dos acontecimientos de este presente no tienen un mismo pasado, ni presente ni futuro.

"Solamente un medio suficientemente procesado por el nacimiento y muerte de generaciones de estrellas es un terreno abonado para la vida. Y la fuerza suprema responsable de la formación de estrellas es la gravedad. Es ella la que tiende a compactar la materia, aumentando su densidad hasta permitir las reacciones termonucleares responsables del enriquecimiento químico."

La imagen que acabamos de ofrecer de la causalidad es local (cada acontecimiento tiene su propia causalidad, su división entre pasado, futuro y presente). Fue desarrollada por Einstein en 1905 e interpretada en un marco espaciotemporal unificado por Minkowski en 1907; es lo que se conoce como teoría especial de la relatividad (o relatividad especial). La gravedad parte de esta causalidad y la modula o curva, esto es, curva el espacio y el tiempo simultáneamente, y es por esto que hablamos de espaciotiempo. Una curvatura del tiempo equivale a decir que el tiempo transcurre a ritmos diferentes en diferentes regiones del espacio y en momentos distintos. Un reloj podría ir rápido ahora y muy lento mañana: esto sería una curvatura del tiempo.

No hay un tiempo universal

No existe un reloj universal que marque el devenir del tiempo para todos los habitantes del universo. En un sentido no psicológico sino objetivo, cada persona o entidad, cada partícula elemental del universo, lleva un reloj consigo. Si varias personas con relojes perfectamente sincronizados se separasen durante un tiempo, moviéndose de formas distintas por el planeta (o por la galaxia, si de astronautas del futuro se tratase), cuando volviesen a reunirse sus relojes, marcarían genéricamente horas distintas. No es un efecto que suceda solo a los relojes, le sucede a una noción básica de tiempo propio de cada entidad localizada (persona, animal u objeto). Para entenderlo mejor, imaginemos que repartimos varias tabletas idénticas de fábrica a este grupo de personas y comienzan a la vez a ver la misma película. Sin embargo, uno la ve mientras hace un viaje de ida y vuelta en tren; otro, un viaje en avión y un tercero, mientras los espera en la estación. Cuando se reúnen de nuevo, unos han visto más película que otros. A sus relojes de pulsera les ha pasado lo mismo que al reloj o tiempo propio de cada tableta y lo mismo también que a sus relojes biológicos de envejecimiento, de forma que cada persona ha envejecido en distinta medida. A mayores velocidades de viaje o mayores campos gravitatorios que experimentemos, menos envejecemos. El extremo de este comportamiento lo experimentaríamos si nuestra velocidad se aproximara a la de la luz o visitásemos las cercanías del horizonte de un agujero negro. Este envejecimiento siempre es en comparación con otros; en términos de nuestro tiempo propio, viviremos lo que tengamos que vivir, no más o menos por viajar a mayores velocidades o experimentar fuertes campos gravitatorios. El tiempo es, por tanto, como un río de relojes diminutos, cada uno avanzando a su propio ritmo.

Motor último de evolución

Los tres aspectos que he destacado de la gravedad son claramente pertenecientes a la revolución relativista. El último aspecto fundamental de la gravedad que voy a destacar es un tanto independiente de su formulación relativista y, aunque todavía no se haya llegado a una formulación tan precisa como la de los anteriores, el que aquí escribe lo situaría en importancia por delante de los demás: la gravedad parece

estar detrás de la vitalidad que muestra el universo, de su capacidad para generar vida.

Por una parte, la vida tal como la conocemos parece requerir para su existencia de una gran variedad de elementos químicos. Para que esta complejidad química se haya producido, fue necesario primero formar un ecosistema de estrellas. Los elementos químicos, como el fundamental carbono, se formaron en los inmensos y potentes hornos que son las estrellas. Algunos elementos químicos pesados solamente se forman en explosiones de tipo nova, supernova o en las colisiones de estrellas de neutrones. Solamente un medio suficientemente procesado por el nacimiento y muerte de generaciones de estrellas es un terreno abonado para la vida. Y la fuerza suprema responsable de la formación de estrellas es la gravedad. Es ella la que tiende a compactar la materia, aumentando su densidad hasta permitir las reacciones termonucleares responsables del enriquecimiento químico.

Por otra parte, existe un aspecto todavía más fundamental: la gravedad, a través de la generación de estrellas, abre una puerta entrópica en el universo. La entropía es un concepto fundamental en física de sistemas complejos (gases, fluidos, etc., en general, sistemas con muchos componentes). En la descripción propuesta por Ludwig Boltzmann, la entropía de un sistema es una medida de cómo de ordinaria es la configuración en la que se encuentra —una configuración concreta es una tabla con las posiciones y velocidades de todos los componentes del sistema— entre todas las configuraciones posibles que el sistema podría adoptar. Todos los sistemas físicos conocidos satisfacen la segunda ley de la termodinámica, la cual nos dice que todo sistema evoluciona de lo singular a lo ordinario, que su entropía siempre aumenta. La evolución biológica parece, sin embargo, ir a primera vista en contra de esta ley: parece producir progresivamente estructuras más organizadas, más singulares. No obstante, esta violación es solo una apariencia y, de hecho, la segunda ley de la termodinámica no se viola aquí tampoco. Lo que sucede es que cada disminución en entropía de un sistema vivo se ve compensada con aumentos de entropía en otras partes del sistema total. Nosotros y todos los demás seres vivos consumimos energía empaquetada en forma singular para devolverla al

sistema en forma ordinaria. Al contrario de la visión popular, no funcionamos a base de consumir energía como si de hacerla desaparecer se tratara; nuestros procesos vitales conservan la cantidad de energía. Funcionamos a base de vulgarizar la energía. Para poder hacer esto, necesitamos que haya fuentes de energía susceptibles de ser vulgarizadas. Un foco caliente —una estrella— en un universo frío proporciona precisamente esta situación.

Todo apunta a que el universo comenzó su andadura a partir de un estado extremadamente singular y que este hecho ha permitido que en la actualidad contenga tal riqueza estructural. Aunque la conexión exacta todavía se nos escape, uno debería retener la idea de que la gravedad guarda la clave de lo que podría ser el más singular de todos los hechos: el nacimiento entrópico del universo.