

## Introducción

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 sismos 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 interactuaba 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.

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 transmitir 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 estructura del libro puede hacer que en algunos momentos se mencione algún concepto sin venir acompañado de mayor explicación. Invitamos al lector a seguir avanzando aunque no tenga claro algún punto, pues una mención más explicativa llegará en otro apartado, o por lo menos esa ha sido nuestra intención. El libro es conciso por naturaleza, dada su longitud en relación a lo extenso de su temática. Para saciar al lector que quiera profundizar en algún aspecto, hemos añadido una bibliografía complementaria. Cabe mencionar que el libro se ha gestado a partir de un proyecto paralelo en el que la panorámica a la gravedad se hace desde el lenguaje audiovisual, en particular en formato de serie documental de divulgación científica<sup>1</sup>. Esta gestación ha dejado su impronta en la estructura del libro.

---

1. Aquellos interesados pueden seguir el desarrollo del proyecto audiovisual en [www.territoriogravedad.com](http://www.territoriogravedad.com)

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.

## **Agradecimientos**

Los ingredientes de este libro son el resultado del trabajo de muchísimos investigadores. Son ellos los que nos han hecho avanzar en nuestro conocimiento de la gravedad. Mi papel ha sido simplemente el de seleccionar y orquestar estos ingredientes de una forma que he creído interesante. Quiero agradecer a Pilar Tígeras y Carmen Guerrero por pedirme que escribiera este libro, lo cual ha sido muy gratificante. También quiero agradecer a Andrea Barceló, Mariam Bouhmadi, Luis Garay y José Luis Jaramillo por comentarios y correcciones sobre versiones parciales del libro, que han ayudado a mejorarlo. En especial, a Raúl Carballo Rubio y Guillermo A. Mena Marugán por su inestimable ayuda a la hora de depurar la última versión del libro. Cualquier fallo de transcripción de las ideas involucradas es, sin embargo, solamente mi responsabilidad. Por

último, quiero agradecer a Nacho Chueca, realizador del proyecto audiovisual hermanado con este libro, por haber acogido a la gravedad con tanto entusiasmo y buen hacer. Sin su empuje, es probable que no existiera este libro.