

Matteo Barsuglia

# Las olas del espacio-tiempo

La revolución de las ondas gravitatorias



**Alianza** editorial  
El libro de bolsillo

Título original: *Les vagues de l'espace-temps. La révolution des ondes gravitationnelles*

Traducción: Miguel Paredes Larrucea

Revisión científica de la traducción: Isabel Cordero-Carrión

Diseño de colección: Estrada Design

Diseño de cubierta: Manuel Estrada

Ilustración de cubierta: Ilustración de dos agujeros negros orbitando entre sí.

© Mark Garlick / Science Photo Library / Getty Images

Selección de imagen: Carlos Caranci Sáez

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeren, plagiaran, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.

© Dunod 2019, Malakoff

© de la traducción: Miguel Paredes Larrucea, 2023

© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 2023

Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 15

28027 Madrid

[www.alianzaeditorial.es](http://www.alianzaeditorial.es)



PAPEL DE FIBRA  
CERTIFICADA

ISBN: 978-84-1148-095-6

Depósito legal: M. 26.306-2022

Printed in Spain

Si quiere recibir información periódica sobre las novedades de Alianza Editorial, envíe un correo electrónico a la dirección: [alianzaeditorial@anaya.es](mailto:alianzaeditorial@anaya.es)

# Índice

11	Prólogo
19	1. Migajas cósmicas
31	2. Abordar la gravedad con ligereza
45	3. De las ondas en la materia a las ondas del espacio-tiempo
58	4. Los pioneros del attómetro
79	5. Monstruos que gorjean
93	6. La primera onda no se olvida jamás
110	7. Virgo funciona
120	8. Telescopios de todos los países, ¡uníos!
133	9. Nuevas normalidades y más sorpresas
144	10. Einstein, puesto a prueba
154	11. Medir el universo
169	12. Cuando los extremos se tocan
176	13. ¿Y ahora qué?
192	Epílogo

194	Notas y referencias
211	Para ampliar y profundizar
213	Créditos de las imágenes
214	Agradecimientos
215	Índice analítico

*A Caterina y Santiago*



# Prólogo

El 12 de febrero de 2016, tras varios meses de filtraciones y rumores, la noticia es oficial: las ondas gravitatorias se han detectado por primera vez. El acontecimiento se produjo cinco meses antes, el 14 de septiembre de 2015 a las 10:50, hora de París. Pequeñas ondulaciones de la geometría del espacio-tiempo atravesaron la Tierra tras un viaje de más de mil millones de años. Su paso fue registrado por LIGO, un detector situado en los Estados Unidos<sup>1</sup>.

El encargado de anunciarlo, en una rueda de prensa en la National Science Foundation norteamericana, es Dave Reitze, director del proyecto LIGO, con un tono de voz directo y teñido de emoción: *We did it! We have detected gravitational waves.* (‘¡Lo conseguimos! ¡Hemos detectado ondas gravitatorias!’)<sup>2</sup>.

Es el principio de una revolución. De ahora en adelante la astronomía utilizará también las vibraciones de la gravedad, y la potencia de este nuevo mensajero se hace

de inmediato evidente e incontestable: por primera vez se detectan agujeros negros de características jamás observadas hasta entonces. Por primera vez se demuestra la existencia de sistemas binarios de agujeros negros que orbitan uno alrededor del otro y que pueden fusionarse. Y es la primera vez que la teoría de la relatividad general de Einstein, la gran infraestructura teórica de la astrofísica y de la cosmología, se contrasta en un contexto completamente nuevo: el de los campos gravitatorios extremos de los agujeros negros.

En medio de la algarabía del planeta, los dos detectores LIGO en los Estados Unidos registraron una variación de una trillonésima de metro en la distancia entre dos espejos situados a cuatro kilómetros uno de otro. Un gorjeo\* que es prueba inequívoca de los últimos instantes anteriores a la fusión de dos agujeros negros que giran a mitad de la velocidad de la luz.

Después de este memorable 14 de septiembre hay otras detecciones de ondas gravitatorias: se trata de más parejas de agujeros negros que se fusionan, algunos de ellos más grandes, otros más pequeños. Cada señal es un triunfo de la teoría de Einstein y la demostración de que a partir de ahora el cielo no se compone solamente de puntitos luminosos, sino también de puntos negros que emiten solamente ondas gravitatorias.

\* El término «gorjeo» (que también se ha traducido por ‘trino’ o ‘chirrido’; en inglés *chirp*) hace referencia, como se explica más adelante, al sonido, parecido al gorjeo de un pájaro, producido por las ondas gravitatorias (convertidas a ondas sonoras) durante la fusión de dos agujeros negros. [N. del T.]



Mientras los dos detectores LIGO prosiguen sus observaciones, el detector europeo Virgo<sup>3</sup> entra en funcionamiento en agosto de 2017. El 17 de agosto se detectan ondas gravitatorias coincidiendo con radiación electromagnética. Se trata de la fusión de dos estrellas de neutrones, la primera jamás «observada» por telescopios y «oída» por los detectores de vibraciones de la gravedad. Ese día se desvelaron viejos enigmas de la astronomía, como el origen de una parte de los elementos químicos pesados, por ejemplo, el oro y el platino. Es también el banco de pruebas de una nueva manera de hacer de la cosmología: la expansión del universo se mide de un modo completamente nuevo. Ese día la astronomía entra de lleno en la era «multimensajero». La revolución está consumada y no es posible dar ya marcha atrás.

Estoy escribiendo en la sala de control del detector Virgo en Pisa, rodeado de grandes pantallas murales que muestran los haces láser que recorren los dos brazos en L de tres kilómetros de longitud del dispositivo. Las pantallas de ordenador me confirman que todo funciona y que podemos observar fuentes de ondas gravitatorias situadas hasta 75 millones de años luz de distancia, es decir, cinco billones de veces la distancia Tierra-Sol<sup>4</sup>. Afuera, la campiña toscana despliega sus colores otoñales. Los campos se mecen con el viento. En la explanada ondean con orgullo, además de la bandera europea, la francesa y la italiana, principales países financiadores del proyecto.

En esta sala he pasado cientos de horas observando en los monitores las señales de control de esta máquina ultrasensible que es fruto, igual que los dos detectores LIGO, de cincuenta años de tesón de centenares de físicos e in-

genieros. Una epopeya científica llena de incertidumbres. Un símbolo de audacia y de perseverancia.

Hace más de veinte años que trabajo en el campo de las ondas gravitatorias, desde el día en que me crucé con el anuncio de unas prácticas en el proyecto Virgo. Desde entonces he consagrado más de la mitad de mi vida y toda mi carrera de investigador en el CNRS francés (Centro Nacional de Investigación Científica) a la detección de esas imperceptibles ondas gravitatorias cuya existencia fue predicha por Albert Einstein en 1916.

Después del 14 de septiembre de 2015 hubo decenas de diarios que publicaron en portada: «Einstein tenía razón: las ondas gravitatorias existen». Pero en cierto modo Einstein estaba también equivocado, porque en su artículo de 1916 escribía que en todos los casos imaginables la intensidad de las ondas gravitatorias debía tener un valor prácticamente nulo<sup>5</sup>.

A pesar de esta predicción del padre de la relatividad, hemos aquí convertidos en los nuevos astrónomos de las estrellas oscuras, capaces de ver cosas que son invisibles para los demás y capaces también de indicar a los telescopios de todo el planeta dónde apuntar: «Atención, en esta región del universo se está produciendo algo formidable, ¡apuntad inmediatamente allí vuestros instrumentos!».

Eso fue lo que ocurrió el 17 de agosto de 2017 con la fusión de dos estrellas de neutrones, y lo que volverá a suceder cuando se produzca algo extremadamente violento que sacuda otra vez las profundidades del universo.

En efecto, al contrario que los telescopios ópticos, que solo observan una pequeña porción del cielo y únicamente funcionan de noche y con cielo despejado, LIGO y Vir-

go pueden observar todo el cielo al mismo tiempo y sin interrupción. Las ondas gravitatorias no son bloqueadas por las nubes y atraviesan la Tierra tranquilamente, como si fuese transparente.

En esta misma sala de control de Virgo he pasado días y noches enteras junto a mis colegas, luchando con los ruidos<sup>6</sup> del instrumento y tratando de identificarlos y reducirlos. Son kilómetros y kilómetros los que hemos recorrido por los túneles de Virgo, estudiando la mejor manera de aumentar la sensibilidad del instrumento. Son decenas de pizzas y cientos de cafés los que hemos tomado mientras mirábamos cómo oscilaban los espejos una millonésima de grado y alineábamos los enormes rayos láser. Hemos atrapado la luz en cavidades ópticas de tres kilómetros y hemos visto emocionados cómo la sensibilidad del instrumento aumentaba día a día.

Hubo veces que se me ocurría de pronto una nueva idea y me iba a toda prisa con mi Twingo al observatorio para probarla. En esa sala me sorprendió más de una vez el nuevo día, y hubo una ocasión en que después de una noche rica en avances subí a la torre de Pisa en homenaje a Galileo Galilei, padre de todos los exploradores de la gravitación.

A lo largo de todos estos años he conocido a personas extraordinarias, investigadores visionarios y geniales, dotados de una confianza inquebrantable en la misión en la que estábamos embarcados. Yo, por mi parte, tuve dudas. Tras años sin detectar ninguna onda gravitatoria, pensé en cambiar de camino, sin llegar a hacerlo.

Finalmente vi la primera señal de LIGO. Compartí las dudas, el escepticismo y en última instancia la emoción

de una comunidad de un millar de personas y me obligué a mantener la prudencia antes de dejarme invadir por el entusiasmo. Y así, una tarde, después de confirmarse la detección, me atravesé París en bicicleta dando gritos de emoción, y luego, cuando Dave Reitze pronunció la frase: «¡Lo conseguimos!», no pude contener algunas lágrimas.

Esta primera señal me deparó una gran alegría y al mismo tiempo también cierto sufrimiento, porque Virgo, mi detector, no funcionaba todavía y por tanto se nos había escapado para siempre el honor de «ser los primeros».

Finalmente mi alegría fue absoluta el 14 de agosto de 2017, sentado bajo un sol cegador en la pequeña plaza de un pueblo italiano. Virgo acababa de detectar su primera onda gravitatoria. Mi historia con estas perturbaciones del espacio-tiempo, iniciada veinte años atrás, terminaba con la onda que acababa de atravesar el instrumento que yo había contribuido a construir. Con ello pasaba finalmente una página.

En octubre de 2017 vi cómo tres de los padres del proyecto LIGO recibían el Premio Nobel de Física<sup>7</sup>, merecido, sí, pero también fruto de una inmensa aventura colectiva: instrumentos desarrollados y resultados obtenidos por más de mil personas trabajando juntas durante decenas de años.

Este libro es el relato de esa aventura, desde la pluma de Einstein a la sala de control del detector Virgo. De una simple ecuación, a los descubrimientos astronómicos a los que dio lugar. Voy a narrar sobre todo la aventura científica y técnica, pero también la humana, utilizando a veces mis propias vivencias. Describiré la naturaleza de es-

tas vibraciones del espacio-tiempo y explicaré por qué las ondas gravitatorias no se descubrieron sino un siglo después de ser predichas, tras no pocas vacilaciones y dudas «existenciales», incluso del propio Einstein.

Voy a hablar de espacios curvos y de objetos monstruosos: los agujeros negros y las estrellas de neutrones. Relataré cómo el ingenio humano se ha traducido en la construcción de instrumentos capaces de medir lo infinitamente pequeño, rozando los límites de las leyes de la física, con el fin de comprender lo infinitamente grande.

Explicaré por qué las ondas gravitatorias están revolucionando nuestra visión del universo, dibujando un nuevo cielo y nuevas cartas geográficas del cosmos. Finalmente, explicaré por qué los próximos años serán apasionantes, cuando, gracias a instrumentos cada vez más sensibles, las fuentes de ondas gravitatorias sean cada vez más numerosas y sus señales gravitatorias cada vez más claras.

Pisa, octubre de 2018



# 1. Migajas cósmicas

*Ogni anno luce vale cento anni d'ombra.*  
(‘Cada año luz vale cien años de sombra’.)

Alda Merini (1931-2009)

La astronomía cabría definirla como una tentativa heroica y desesperada de recoger cualquier pequeña migaja de información que nos llega del cielo para extraer la mayor cantidad posible de conocimientos sobre el universo.

Los primeros astrónomos recogían migajas de luz –la luz de la Luna, la del Sol y la de las estrellas más brillantes–, al principio con los ojos solamente y después, a partir del siglo XVII, con instrumentos ópticos cada vez más potentes que permitían ver cada vez más lejos y distinguir más detalles. Después, en el siglo XIX, se descubrió que había también una luz invisible para el ojo humano: la radiación infrarroja. Finalmente, en el siglo XX, se empezó a hacer astronomía con todas las longitudes de onda del espectro electromagnético y se comprendió que el cielo nos podía enviar migajas de naturaleza completamente diferente: los rayos cósmicos, los neutrinos y las ondas gravitatorias.

Cada vez que llega una nueva migaja a la Tierra, se enriquece y evoluciona nuestra comprensión del universo.

## Seres microscópicos y efímeros

El 20 de julio de 1969 un hombre pisó la Luna. En 2003 dos escritores italianos<sup>1</sup> confesaron que, aparte de admiración por este logro de la especie humana, habían sentido ese día una enorme tristeza. Esta primera conquista de un cuerpo celeste representaba en realidad el fin de una época: la del entusiasmo por los viajes espaciales, porque ese primer viaje nos obligó a tomar conciencia de su dificultad. En efecto, desde entonces no hemos ido mucho más lejos, y a menos que surja una idea genial, harán falta generaciones y generaciones antes de que un ser humano pueda salir del sistema solar.

El problema es que el universo es inmenso, mientras que nosotros somos seres infinitamente pequeños y efímeros. Es verdad que con la imaginación podemos viajar a todas partes, pero cuando se trata de desplazarse físicamente (y por tanto transportar materia o energía de un punto del espacio a otro) las cosas se complican. En el mejor de los casos solo podríamos viajar a la velocidad de la luz, un límite cósmico insuperable, a lo cual se añade un pequeño y embarazoso detalle: al cabo de unos cien años, como mucho, morimos.

Tras cuarenta años de viaje, la sonda Voyager, el objeto de fabricación humana más alejado de la Tierra, ha alcanzado «solamente» los confines del sistema solar. Alpha Cen-



tauri, la estrella más próxima a nosotros, se halla a 40 billones de kilómetros de la Tierra.

El kilómetro, unidad de medida perfecta para las autovías terrestres, no se adapta demasiado bien al universo. La distancia de las estrellas y las galaxias se mide por tanto en «años luz», unidad de longitud de nombre un poco engañoso, porque podría parecer que se trata de una duración, cuando en realidad es la distancia recorrida por la luz en un año, es decir, alrededor de 9 billones de kilómetros<sup>2</sup>.

La luz de Alpha Centauri que vemos hoy fue emitida hace cuatro años. Mirar lejos es por tanto mirar hacia el pasado.

Estas distancias siguen siendo sin embargo muy pequeñas en comparación con el tamaño de nuestra galaxia, la Vía Láctea, que tiene un diámetro de cien mil años luz, o en comparación con la distancia del cúmulo de galaxias de Virgo, que está a 60 millones de años luz. Incluso utilizando unidades de medida astronómicas, estos números siguen siendo... astronómicos.

Con las estrellas no podemos ser demasiado arrogantes y estudiarlas como estudiamos las plantas, las partículas elementales, los organismos microscópicos o los minerales. Las estrellas no podemos acelerarlas ni romperlas, ni oír-las, ni tocarlas ni escrutarlas al microscopio. Con ellas no podemos repetir una y otra vez experimentos en el laboratorio, variando la temperatura o la presión. Solo podemos mirar sin tocar. Mirar desde muy lejos.

Aunque prisioneros de nuestro planeta y de sus alrededores, siempre hemos sentido una necesidad innata de formularnos preguntas. Nuestra curiosidad no conoce límites, y los niños son maestros en la materia.

Todos los años doy un curso de astronomía en una escuela elemental, y siempre salgo como si volviera de un largo paseo por la montaña: agotado, pero con los pulmones llenos de aire y los ojos llenos de grandes paisajes. Los niños me hacen sentir ignorante e indispensable al mismo tiempo. Sus preguntas ponen a prueba los fundamentos de mi motivación de investigador. Su entusiasmo es contagioso y refrescante.

Estas ganas de hacer preguntas se pierden a menudo al hacerse uno mayor. Cesan esas sucesiones interminables de «porqués» formulados con impaciencia infantil. Una mañana nos despertamos y todo parece evidente, banal. A nuestro alrededor ya no hay cosas extrañas ni maravillosas.

Para contrarrestar ese proceso establecí la regla de la «pregunta del día»: una pregunta diaria sobre cualquier tema, siendo lo único importante la regularidad.

¿Qué es una estrella?, ¿cuál es el tamaño del universo?, ¿es finito o infinito?, ¿hay vida en las otras galaxias?, ¿por qué hace calor en esta habitación?, ¿cuándo morirá el Sol?, ¿quién inventó las palabras?, ¿por qué tengo el pelo rizado? Brazos levantados y ojos abiertos de par en par, miradas concentradas o soñadoras, y preguntas por decenas –algunas «universales», otras más personales o de carácter más práctico–. Las mismas que se hicieron sin duda los primeros seres humanos, que durante milenios no tenían otra cosa que sus ojos para buscar la respuesta.

Después un hombre descubrió que se podía hacer algo más: Galileo Galilei.

## De Galileo al telescopio espacial Hubble

Galileo juega un papel fundamental en este libro por al menos tres razones. En primer lugar, fue uno de los inventores de la ciencia moderna, compuesta de experimentos (y no solamente de observaciones y razonamientos), del análisis cuantitativo de los hechos y de modelos matemáticos con los que comparar esos hechos. Es decir, una disciplina experimental y matemática completamente diferente de los demás modos de observación y comprensión del mundo, como la filosofía o el arte.

Después, sobre la base de sus observaciones y experiencias, Galileo estableció la ley de la «universalidad de la caída libre de los cuerpos», que será muy importante en la formulación de la teoría de la relatividad general de Einstein.

Por último, fue el primero en utilizar un instrumento óptico para escrutar los cielos.

Por curiosa coincidencia, Galileo nació en Pisa, no lejos del emplazamiento del detector Virgo. El hombre y la máquina, separados por cuatro siglos de historia, se unen en un proyecto común y visionario: ampliar las posibilidades de observación del cielo con instrumentos de factura humana.

A principios del siglo XVII, incluso con lentes mal pulidas que nada tienen que ver con las que se pueden comprar hoy en una tienda de astronomía, Galileo descubre los satélites de Júpiter y los relieves de la Luna. Las lentes aumentan la imagen y recogen más luz. El ojo, detrás del instrumento, ve mejor y más lejos. Es un ojo más potente, capaz de ver nuevos objetos que a su vez plantean nuevas preguntas. Por ejemplo: ¿por qué la Luna no es perfectamente lisa?

Desde Galileo, la comunidad astronómica ha ido construyendo telescopios cada vez más grandes, de mejor calidad y en emplazamientos mejor adaptados a las observaciones.

El telescopio de Galileo tenía lentes de solo cinco centímetros de diámetro, mientras que uno de los telescopios del observatorio de la Alta Provenza tiene un espejo de dos metros. Con este instrumento se observó en 1985 el primer planeta extrasolar –o exoplaneta– orbitando alrededor de una estrella como nuestro Sol<sup>3</sup>. El telescopio japonés Subaru<sup>4</sup> (nombre de las Pléyades en japonés) tiene un espejo de ocho metros de diámetro. Está construido sobre una montaña a más de cuatro mil metros sobre el nivel del mar en la isla de Hawái. El *Very Large Telescope* (VLT) es un sistema de cuatro telescopios en el desierto chileno de Cerro Paranal<sup>5</sup>: a esa altitud, la agitación atmosférica es menor, lo que hace que las imágenes sean más nítidas; el aire es más seco y por lo tanto hay muy pocas nubes. Además, en lugares como estos, alejados de las ciudades, la contaminación lumínica es mucho menor. Los cuatro telescopios se pueden utilizar individual o conjuntamente; en este segundo caso, la combinación de sus imágenes aumenta el poder de resolución del telescopio gracias a la técnica de la interferometría.

En las últimas décadas, la tecnología de los telescopios ha mejorado enormemente en lo que concierne a la calidad de la óptica, las monturas mecánicas, los sensores y la electrónica de control. Hoy en día hay telescopios robotizados que funcionan de manera autónoma. Los dos TAROT<sup>6</sup> (Telescopios de acción rápida para objetos transitorios) del observatorio de la Alta Provenza pueden



Figura 1. El campo extremadamente profundo del telescopio espacial Hubble.

apuntar en menos de diez segundos en la dirección deseada sin ninguna otra intervención humana, tras recibir una orden enviada por ordenador.

También hemos colocado telescopios en el espacio. El más conocido es el HST (*Hubble Space Telescope*), lanzado en 1980, que al no estar limitado por la atmósfera permite captar imágenes mucho más precisas que las de los telescopios terrestres del mismo tamaño; un ejemplo es la extraordinaria *Hubble Ultra Deep Field* (campo extremadamente profundo de Hubble), que muestra la región más