

# la misión del universo

qué son las **ondas gravitacionales** y por qué  
cambiaron nuestra forma de entender el cosmos

lidia  
díaz

mario  
díaz

gabriela  
gonzález

jorge  
pullin

# Índice

[Cubierta](#)

[Índice](#)

[Portada](#)

[Copyright](#)

[Este libro \(y esta colección\)](#)

[Introducción](#)

## [1. La gravedad de acuerdo con Einstein](#)

[De Aristóteles a Newton](#)

[Relatividad especial](#)

[Relatividad general: una nueva teoría de la gravedad](#)

[El éxito de la teoría de Einstein](#)

[Einstein en la Argentina](#)

[La teoría del Big Bang](#)

## [2. La larga y difícil historia de las ondas gravitacionales](#)

[Las ondas en la relatividad general](#)

[Las ondas en la física](#)

[Las ondas en la gravedad](#)

[Cómo se producen las ondas gravitacionales](#)

[Einstein cuestiona las ondas gravitacionales](#)

[La marea baja de la relatividad general](#)

### **3. El origen astrofísico de las ondas gravitacionales**

[La vida y la muerte de las estrellas](#)

[Masas pequeñas: enanas blancas](#)

[Masas medianas: estrellas de neutrones](#)

[Masas extremas: agujeros negros](#)

[Agujeros negros y púlsares: el renacimiento de la relatividad](#)

[Las fuentes astrofísicas de ondas gravitacionales](#)

### **4. La construcción de detectores de ondas gravitacionales**

[Las minúsculas ondas gravitacionales](#)

[Detectores de barras](#)

[Detectores interferométricos](#)

[Historia de los detectores interferométricos de ondas gravitacionales](#)

[El enemigo: ruido en los detectores](#)

[Detecciones ¡por fin!](#)

### **5. Las primeras detecciones**

[La primera detección](#)

[La segunda detección: GW151226](#)

Más detecciones

¿Qué aprendimos con las detecciones?

## **6. La astrofísica del día después**

La red de detectores

La astronomía con mensajeros múltiples

El misterio de los rayos gamma venidos del espacio

Todo lo que reluce... ¿viene del choque de dos estrellas de neutrones?

La velocidad de expansión del universo

La astronomía a partir de O3

## **7. El futuro**

Detectores terrestres

Detectores de frecuencias más bajas

## **Epílogo**

## **Agradecimientos**

Lidia Díaz  
Mario Díaz  
Gabriela González  
Jorge Pullin

# LA MÚSICA DEL UNIVERSO

Qué son las ondas gravitacionales y por  
qué cambiaron nuestra forma de entender  
el cosmos

 **siglo veintiuno**  
editores

---

La música del universo / Lidia Díaz... [et al.].- 1ª ed.- Buenos Aires:  
Siglo Veintiuno Editores, 2021.

Libro digital, EPUB.- (Ciencia que ladra, serie Mayor // dirigida por  
Diego Golombek)

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-987-801-054-0

1. Astrofísica. 2. Astronomía. 3. Agujeros Negros. I. Díaz, Lidia.

CDD 520.1

---

© 2021, Siglo Veintiuno Editores Argentina S.A.

[www.sigloxxieditores.com.ar](http://www.sigloxxieditores.com.ar)

Diseño de portada: Pablo Font

Digitalización: Departamento de Producción Editorial de Siglo XXI  
Editores Argentina

Primera edición en formato digital: febrero de 2021

Hecho el depósito que marca la ley 11.723

ISBN edición digital (ePub): 978-987-801-054-0

## Este libro (y esta colección)

Haced como ellos:  
llenaos de infinito,  
abrid las ventanas al espacio.

**David Jou i Mirabent**, “Einstein y las ondas gravitatorias”

Más cerca de la tierra se te exige  
que corras más, y no queda otra fuga  
que ir a parar donde el destino fije.

**Miguel de Unamuno**, “La ley de la gravedad”

El récord del experimento más largo del mundo lo tiene el de la gota de brea: en 1927, el profesor Thomas Parnell calentó una muestra de esta sustancia y la colocó dentro de un embudo de vidrio con el extremo tapado. Tres años más tarde, una vez que la brea llegó a temperatura ambiente, el embudo fue destapado y... de nuevo, a esperar un buen rato. Para sorpresa de todos, esta brea con toda la apariencia de ser un sólido es en realidad un fluido extremadamente viscoso (cien mil millones de veces más viscoso que el agua). La primera gota tardó unos ocho años en caer y, en los noventa años que lleva el experimento, cayeron solo otras ocho más: sí, un total de nueve gotas de brea. Lo curioso es que el profesor Parnell ya no está para verlas, tampoco el segundo “guardián del experimento” y la cuestión ya está en manos de una tercera generación de pacientes breólogos.

En 1794, el joven físico John Dalton presentó su primer trabajo científico, en el que comentaba sus “anomalías visuales”, esas que le impedían identificar los colores. Con el tiempo se fue convenciendo de que dentro de su ojo debía de haber una tintura azul, que absorbía de forma selectiva algunos colores. Tan seguro estaba de esta idea que, con el propósito de comprobarla, dejó instrucciones para que a su muerte le sacaran los ojos. Obediente, en 1844 su médico estudió los ojos del amigo recién fallecido, pero no encontró ningún rasgo azul que confirmara esa teoría. Incluso hubo quienes miraron (muy literalmente) a través de los ojos de Dalton: nada de nada, el mundo parecía perfectamente normal. Entonces llegaron a la conclusión de que lo que ahora conocemos como “daltonismo” no se debía a cambios en las tinturas ópticas, sino a lo que en la época denominaron “alguna anomalía en el cerebro”. Pero el buen Dalton ya no estaba para enterarse y asimilarlo.

En 1915, pizarrón y tiza mediante, Albert Einstein predijo que algunos procesos masivos del universo deberían causar ondulaciones en el espacio-tiempo, como si fueran arrugas en una enorme sábana que cubre el cosmos. De alguna manera, esta predicción se deriva de su teoría general de la relatividad: los objetos muy masivos distorsionan este espacio-tiempo, lo cual es percibido por nosotros, los mortales, como gravedad. Entonces, los grandes choques que ocurren en algún lugar del universo dejarían huellas que viajan y, eventualmente, llegan hasta la Tierra. El problema, razonó *mister* o *Herr* Albert, es que esas huellas son muy pero muy pequeñas; tanto que no pueden ser percibidas ni por los más sensibles instrumentos terrestres. [1] Pero lo predicho predicho estaba, esperando paciente en los pizarrones de los físicos hasta que se inventaran los ojos y oídos que permitieran comprobar o refutar el vaticinio. Solo que Einstein ya no estaría para disfrutarlo (o para retorcerse si el resultado no sonriese tanto a su hipótesis).



Estas tres historias son ejemplos de lo maravillosa que puede ser la aventura de la ciencia. Debemos saber, y lo demás no importa nada. Ni que estemos muertos, ni que pasen cien años hasta que la tecnología esté madura para retomar nuestras ideas: lo importante es comprender el universo. La empresa que se narra en estas páginas es quizá una de las epopeyas más fascinantes de la física moderna: allí hay una hipótesis, y nos toca ser pacientes hasta inventar la forma de demostrarla. En palabras de Marcel Proust, “la auténtica travesía de descubrimiento no consiste en buscar paisajes nuevos, sino en tener ojos nuevos”, y fueron esos ojos nuevos, los de los interferómetros de LIGO, los que permitieron encontrar lo que se sospechaba debía estar allí. Eso no es todo: tenemos el privilegio de escuchar esta aventura relatada por sus protagonistas, científicos y científicas que estuvieron allí cuando se construyó el laberinto que sería los oídos del experimento, y también alguien gritó “¡tierra!” o “¡eureka!” (o lo que hayan gritado cuando vieron esas agujas moverse al compás de la música del universo).

Sí: con paciencia, cálculos y el equipamiento más avanzado que alguna vez se haya construido, nuestros héroes pudieron escuchar los ecos de lo que Einstein había predicho un siglo antes. Un choque de agujeros negros que llegaba hasta nosotros desde los límites del tiempo. Una aguja en un universo. Después vendrían las noticias, las misteriosas conferencias de prensa, el Premio Nobel y todo lo demás, pero, sobre todo, la emoción de escuchar el cosmos... y entenderlo. Y en estos años que pasaron desde el descubrimiento de la primera arruga cósmica (confirmación de las ondulaciones en el espacio-tiempo que preveía el gran Albert), aparecieron muchas otras: un nuevo universo desplegado frente a nuestras narices (o bien, frente a los instrumentos de detección).

Claro que esta historia no comenzó en 2016, con el anuncio de las ondas gravitacionales. Mario Díaz, Gabriela

González, Jorge Pullin y Lidia Díaz, con corazón argentino y ciencia de excelencia internacional, hacen desfilar a todo el elenco que nos llevó hasta allí: Aristóteles, Newton, Galileo, Einstein y, por supuesto, los propios autores de este hermoso texto que, quizá sin saberlo, nos están contando su vida, el amor y la amistad que los hicieron estar en el lugar adecuado, en el momento justo. Descubramos su historia juntos.

Esta colección de divulgación científica está escrita por científicos que creen que ya es hora de asomar la cabeza por fuera del laboratorio y contar las maravillas, grandezas y miserias de la profesión. Porque de eso se trata: de contar, de compartir un saber que, si sigue encerrado, puede volverse inútil.

Ciencia que ladra... no muerde, solo da señales de que cabalga.

## **Diego Golombek**

---

[1] Y, como se cuenta en este libro, el propio Einstein fue el primero en dudar sobre la existencia de estas ondas, lo que generó una comedia de enredos, *papers* y *contrapapers*.

# Introducción

El 11 de febrero de 2016, se anunció un descubrimiento que sacudió al mundo: se habían detectado por primera vez ondas gravitacionales. La noticia se hizo pública en el Club Nacional de Prensa de Washington, DC, donde la colaboración científica LIGO comunicó el descubrimiento. Esas ondas habían sido predichas por Albert Einstein en 1916 y constituyen una nueva manera de estudiar el universo. Desde distintos roles, Gabriela, Jorge, Lidia y Mario -l@s autor@s de este libro- participamos con emoción en el anuncio oficial de este descubrimiento.

Se podría decir que esta historia empezó hace más de mil millones de años, cuando dos agujeros negros chocaron; o hace cuatrocientos años, cuando Galileo miró los cielos con un telescopio; o hace cien años, cuando Einstein publicó que su teoría del espacio-tiempo predecía ondas gravitacionales; o hace cincuenta años, cuando se empezaron a imaginar detectores que pudieran medir esas ondas; o... No importa cuándo empezó la historia, lo importante es que ese día comenzó una nueva manera de hacer astronomía: no solo recibimos luz desde las estrellas, sino que ahora se le agregaba un “sonido”. A las imágenes que obtenemos del universo con nuestros telescopios ahora se les puede sumar otra dimensión sensorial, como cuando al cine mudo se le agregó la banda sonora. ¡Ahora podemos escuchar la música del universo!

Contaremos la historia de cómo fue posible que descubriéramos y entendiéramos las ondas gravitacionales,

y compartiremos con ustedes anécdotas y experiencias de la gente que hizo posible este logro.

Pero antes de empezar con temas sesudos como la teoría de Einstein, queremos que nos conozcan un poco.

Mario y Lidia Díaz se habían mudado de Buenos Aires a la ciudad de Córdoba. Ambos trabajaban en la fábrica de automóviles Renault, Lidia en las oficinas y Mario era mecánico de mantenimiento en las líneas de ensamblaje primero, y luego -cuando comenzó en 1978 a estudiar la carrera de Física- en el turno de la noche, en el mantenimiento de la matricería de forja. Ambos estudiaron en la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), donde Lidia se licenció en Ciencias de la Educación. Mario hizo su investigación con el grupo que estudiaba la teoría de Einstein en la Facultad de Matemática, Astronomía y Física, y recibió el primer doctorado de Física Teórica otorgado en la UNC. En esos trabajos incluyó a un estudiante de doctorado del Instituto Balseiro de Bariloche, Jorge Pullin, y a una estudiante de licenciatura de Córdoba, Gabriela González. Jorge y Gaby se enamoraron (probando que -contrariamente a lo que dijo Einstein- su teoría de la gravedad sí tiene la culpa de que alguna gente caiga en los brazos del amor). Estas dos parejas continuaron la amistad de por vida.

Gaby y Jorge se casaron en 1988, y un año después se mudaron a los Estados Unidos, ella a empezar un doctorado y Jorge con una beca posdoctoral, ambos en física. En la Universidad de Syracuse, Gaby hizo sus estudios con Peter Saulson -un profesor dedicado al proyecto LIGO, cuyo financiamiento recién empezaba- y a ella le encantó la idea de medir lo que hasta entonces solo se había calculado. En 1995 terminó su tesis y trabajó un par de años en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) con el futuro Premio Nobel Rainier Weiss, mientras Jorge calculaba, entre otras cosas, las ondas gravitacionales que producían dos agujeros negros después de fusionarse.

Como es tristemente común en la vida académica en los Estados Unidos -y en muchos otros lugares-, Jorge y Gaby pasaron varios años (¡seis!) viviendo por trabajo en lugares distintos. Durante parte de ese período compraron una casa rodante y la estacionaron a mitad de camino entre State College, Pensilvania -donde estaba Jorge- y Boston -donde estaba Gaby- (si no, eran diez horas de auto). Finalmente siguieron una vida juntos como profesor@s primero en la Universidad Estatal de Pensilvania y luego en la de Luisiana, cerca de uno de los observatorios LIGO que describiremos luego en detalle. Como profesora e investigadora en Luisiana, Gaby y su grupo colaboraron con cientos de colegas para disminuir el ruido instrumental en los observatorios para poder detectar ondas gravitacionales, que se consiguió el 14 de septiembre de 2015. En ese momento, Gaby era la líder y vocera de la colaboración científica de LIGO, y le tocó organizar la validación del descubrimiento y ser parte del anuncio, aquel 11 de febrero de 2016.

Mario y Lidia también se habían mudado a los Estados Unidos, un año antes que Gaby y Jorge. Mario obtuvo una beca posdoctoral para trabajar en la Universidad de Pittsburgh con el grupo dirigido por Ted Newman, un físico reconocido mundialmente por sus contribuciones a la teoría de la relatividad general y de agujeros negros. Cuando su beca se terminó, dado que Lidia estaba cursando un doctorado en literatura latinoamericana, Mario buscó un puesto académico en los Estados Unidos. En 1996 fue contratado por la Universidad de Tejas en Brownsville (hoy Universidad de Texas de El Valle del Río Grande). Se trataba de una institución nueva en un área de los Estados Unidos con mayoría de población hispana y bilingüe. Inspirado por los trabajos de Gaby en LIGO y de Jorge con sus estudios de las fuentes de radiación gravitacional, Mario decidió formar un grupo asociado a la colaboración científica LIGO. Su trabajo fue financiado por la NASA primero y luego por la

Fundación Nacional de Ciencia (NSF) –el equivalente al Conicet en los Estados Unidos–, permitiendo la creación del Centro de Astronomía de Ondas Gravitacionales en Tejas en 2003. Estas eran épocas en las que muy poca gente en el ambiente científico veía la detección de las ondas gravitacionales como una posibilidad cercana en el tiempo.

Lo que sigue es la historia del arduo y difícil camino hacia esa detección, el descubrimiento de un fenómeno de la naturaleza, resultado de la evolución y muerte de las estrellas, y medido por instrumentos superprecisos contruidos gracias a la creatividad, el ingenio y el trabajo en equipo de muchos seres humanos.

# 1. La gravedad de acuerdo con Einstein

Las ondas gravitacionales, o la música del universo que describimos en este libro, son una consecuencia de la teoría de la relatividad general de Einstein. La teoría suena complicada (y lo es), pero esencialmente es una teoría que explica la gravedad. En la escuela aprendemos una ley universal de la gravedad de acuerdo con Newton (¿se acuerdan?). La llamamos universal -y lo es también la teoría de Einstein- porque explica el movimiento de objetos en la Tierra, de planetas, de estrellas y aun de galaxias.

La gravedad como fuerza universal no comenzó a ser entendida sino hasta que Isaac Newton la estudió seriamente en el siglo XVII. Y no porque no se hubiera tratado de entender antes, sino porque su desarrollo requirió muchos años y mucha dedicación de grandes pensadores. Vale la pena dedicar unas páginas a esta historia para comprender mejor sus alcances y los desafíos que encaró la física de los siglos XX y XXI.

## De Aristóteles a Newton

Desde que empezó a deambular por la Tierra, el ser humano buscó regularidades y patrones predecibles en la naturaleza que lo rodeaba. Pero fue Aristóteles el primer pensador que

inventó una teoría para explicar el universo, hace dos mil cuatrocientos años.

Según la física de Aristóteles, los fenómenos que sucedían en la Tierra eran muy distintos a los que acontecían en el cielo: este último -que era el ámbito donde habitaban los planetas y el Sol moviéndose alrededor de la Tierra- era inmutable y eterno. Uno de los propósitos fundamentales de la física de Aristóteles era explicar el movimiento de los objetos terrestres.

Cualquier objeto o cuerpo terrestre se consideraba conformado por la combinación de cuatro elementos básicos: aire, fuego, agua y tierra. Dependiendo de su elemento predominante, el objeto se movería de manera diferente; por ejemplo, los cuerpos más pesados, como una piedra -que tiene un componente mucho mayor de tierra que de agua, fuego o aire-, caen más rápido que los más livianos, como una hoja -que debía estar compuesta mayormente por agua-.

Aristóteles no explicaba cuantitativamente el fenómeno mismo de la caída, pero afirmaba que el movimiento se debía a la tendencia de los objetos a permanecer en su lugar "natural". Si se apartaba un objeto del suelo, este "querría" regresar allí, dado que su estado normal era estar quieto en él; según Aristóteles, el reposo era el estado natural de todos los cuerpos. Este es un concepto intuitivo, pero veremos que no es cierto.

En el caso de los objetos celestes -los cinco planetas que se observan a simple vista: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, además de la Luna y el Sol-, los modelos aristotélicos de movimiento eran muy complicados y de muy limitada utilidad.

La física de Aristóteles no permitía hacer predicciones: por ejemplo, si se arrojaba una piedra al aire, no se podía predecir con exactitud donde caería o cuál sería su trayectoria en el aire. Predecir -y poder luego verificar- el resultado de un experimento es el método de la ciencia