



Jorge Gamboa
Departamento de Física
Facultad de Ciencia
Universidad de Santiago de Chile
jorge.gamboa@usach.cl

Sobre Ondas Gravitacionales

About gravitational waves

Jorge Gamboa y Fernando Méndez
Departamento de Física
Universidad de Santiago de Chile

Resumen

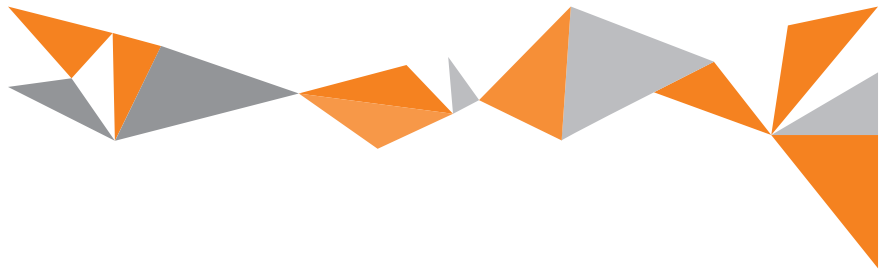
Realizamos un resumen histórico y anecdótico del desarrollo y posterior descubrimiento de las ondas gravitacionales. Primero, explicamos el contexto histórico del desarrollo de la teoría de la relatividad general y como se entendía en la época que fue formulada, segundo, enfatizamos las ideas desarrolladas por Einstein y Rosen y las dificultades conceptuales que ellos enfrentaron. La radiación gravitacional no se podía entender siguiendo el conocimiento que Einstein tenía en su época. Explicamos con anécdotas cómo se llegó al actual estado de conocimiento pasando por varios aspectos que, aunque muy técnicos, se explican de manera accesible al público general. Explicamos el origen de la clasificación de soluciones de onda plana de la teoría de Einstein y el posterior descubrimiento de las soluciones de Bondi y Pirani para terminar con el descubrimiento final de la colaboración LIGO y su premio Nobel en 2017.

Palabras claves: Einstein; Ondas gravitacionales; Relatividad general; Bondi y Pirani; Premio Nobel

Abstract

We carry out a historical and anecdotal summary of the development and subsequent discovery of gravitational waves. First, we explain the historical context of the development of the theory of general relativity and how it was understood at the time it was formulated, second, we emphasize the ideas developed by Einstein and Rosen and the conceptual difficulties they faced. Gravitational radiation could not be understood following the knowledge that Einstein had in his day. We explain with anecdotes how the current state of knowledge was reached through various aspects that, although very technical, are explained in a manner accessible to the general public. We explain the origin of the classification of planar wave solutions from Einstein's theory and the subsequent discovery of the Bondi and Pirani solutions to end with the final discovery of the LIGO collaboration and its Nobel Prize in 2017.

Keywords: Gravitational waves; General relativity; Bondi and Pirani; Nobel Prize



Introducción

La teoría de la relatividad general es una descripción dinámica del espacio-tiempo que explica como la gravitación se entiende como geometría de Riemann. La curvatura del espacio-tiempo -la cual es un concepto vital en tal geometría- es la que explica la caída de los cuerpos.

Es muy interesante observar que cuando la teoría de la relatividad general fue publicada, muchas de las nociones y varios conceptos básicos de la geometría de Riemann, o no se conocían o solo estaban a nivel de conjetura. Es por esta razón que el tensor de Riemann, una cantidad geométrica fundamental en la relatividad general, era visto como una medida de la curvatura del espacio-tiempo que entregaba información sobre la distribución de materia en el espacio-tiempo. Sin embargo, esta conclusión fue al inicio, un concepto que se justificaba a posteriori físicamente, es decir, solo después que las ecuaciones de Einstein fueron escritas.

En ausencia de materia se podía concluir -por la estructura de las ecuaciones de movimiento- que el espacio-tiempo no se curvaba, es decir que era plano. Dos años des-

pués de la aparición de la teoría general de la relatividad, el matemático Hermann Weyl descubrió que existía otro tensor, llamado ahora tensor de Weyl, que aportaba curvatura incluso en ausencia de materia.

Durante toda la década de los años veinte hubo importantes desarrollos matemáticos que permitieron clarificar y enriquecer no solo la geometría de Riemann, sino que también la propia teoría de la relatividad general.

La teoría de la relatividad general resume el trabajo de 10 años que Albert Einstein desarrolló entre 1905 y 1916 y que después de publicar varios esbozos de lo que sería su resultado final, apareció en *Annalen der Physik* con el título "Sobre la Teoría de la Relatividad General". En esta investigación Einstein no solo demostró como la ley de gravitación de Newton estaba contenida en su teoría, sino que también explicaba el corrimiento del perihelio de mercurio y también la predicción de las ondas gravitacionales.

Sin embargo, la idea de las ondas gravitacionales es mucho más sutil y difícil de ver. En efecto, cuando

en 1916 Albert Einstein publicó su trabajo fundamental no explicó en detalle bajo qué condiciones las ecuaciones de movimiento de la teoría (hoy conocidas como las ecuaciones de Einstein) predecían la existencia de ondas gravitacionales, es decir, cómo, en completa analogía con la electrodinámica, los cuerpos con masas muy grandes podían emitir radiación gravitacional cuando se aceleraban de la misma manera que las cargas aceleradas emiten o absorben radiación electromagnética.

En la descripción original de Einstein, la sola idea de propagación de ondas era difícil de digerir porque, si se procedía en analogía con la electrodinámica donde las ondas electromagnéticas se propagan en un medio que es el vacío, el análogo del medio en que estas ondas gravitacionales se propagaban no se conocía.

Un par de años más tarde del descubrimiento de la teoría general, en 1918, Einstein introdujo la aproximación de campo débil y el famoso tensor h , pero realmente él no tomó en serio la posibilidad que las ondas gravitacionales pudieran existir.



El problema de la emisión de ondas gravitacionales era, naturalmente, muy difícil de creer porque al ser la fuerza gravitacional extraordinariamente débil frente a la fuerza electromagnética (¡la razón entre la fuerza electromagnética y la fuerza gravitacional que se ejercen dos electrones es 1042!), la posibilidad de detectar efectos tan minúsculos era imposible.

Aun cuando las ondas gravitacionales, como predicción, fueron reconocidas por algunos científicos de renombre de la época como una idea nueva e interesante, su existencia y su desarrollo teórico fue escasamente conocido por casi veinte años (una excepción fue el trabajo de Guido Beck publicado en 1927 y redescubierto en los años 50 gracias a un antiguo estudiante de Beck, Peter Havas).

Es interesante hacer notar que siendo, desde el principio, la teoría general de la relatividad una descripción muy exitosa y ampliamente aceptada por la comunidad científica, mucho del trabajo científico relevante de la teoría tomó años en desarrollarse. Por ejemplo, el problema del estudio sistemático de las ecuaciones de movimiento lo desarrolló el propio Einstein en colaboración con Bannesh Hoffman y Leopold Infeld en 1938, la aproximación post-Newtoniana (es decir, las correcciones relativistas de la ley de gravitación de Newton que juegan un rol relevante en el desarrollo de comunicaciones, el GPS, por ejemplo), fueron sistematizadas por Chandrasekhar recién a mediados de los años 60.

El tema de las ondas gravitacionales fue puesto en tela de juicio por Albert Einstein y Nathan Rosen en 1936 cuando ambos enviaron para publicación a Physical Review el artículo titulado, “¿Existen las ondas gravitacionales?”.

En este trabajo se discutía en detalle la aproximación de campo débil y la imposibilidad que se propagaran ondas gravitacionales libremente en el espacio-tiempo. El argumento técnico que Einstein y Rosen presentaban para descartar la existencia de ondas gravitacionales era que su propagación necesariamente involucraba la presencia de singularidades lo que era físicamente inaceptable.

El editor del Physical Review de entonces John Tate, respondió a Einstein un mes y medio más tarde mencionándole que su artículo necesitaba ser corregido pues, tenía dos errores tipográficos y un error conceptual asociado a un tratamiento inadecuado de las singularidades de coordenadas y que un referee anónimo establecía claramente en un informe de 10 páginas que le adjuntaba. El informe del referee, además, les sugería como remediar el problema invocando una publicación de los mismos autores de unos meses antes.

Como un comentario incidental, el artículo al cual se refería el referee es actualmente un muy conocido y es aquel donde Einstein y Rosen discuten el “Einstein-Rosen Bridge” y que es la primera solución agujero de gusano conocida.

La carta de Tate sorprendió a Einstein quién no estaba acostumbrado a que le rechazaran un artículo ni menos que otro científico le revisara su trabajo y esto se refleja en la siguiente repuesta que Einstein le envió al editor del Physical Review:

Estimado Sr.

Nosotros (Rosen y yo) le enviamos nuestro manuscrito para publicación y Usted sin autorización se lo mostró a un especialista antes que esté publicado. No veo ninguna razón para responder (los comentarios erróneos) de un experto anónimo.

Teniendo en cuenta lo anterior, prefiero publicar el artículo en otra revista.

**Atentamente,
Albert Einstein**

En nuestros días la carta de Einstein sorprende porque todos los artículos enviados para publicación a revistas científicas de primer nivel son revisadas por un referee experto en el campo y solo después de un informe positivo el artículo es publicado.

No hay en la actualidad ningún documento fidedigno que permita saber quién fue el referee del artículo de Einstein y Rosen, pero si hay indicaciones que sugieren que habría sido H. P. Robertson entonces profesor en la Universidad de Princeton.

Esta hipótesis se confirma por una conversación que tuvo lugar en Princeton entre Leopold Infeld -en ese momento el nuevo asistente de Einstein que llegaba en reemplazo de Nathan Rosen- y H. P. Robertson quién le habría comentado a Infeld que el artículo de Einstein y Rosen no lo convencía. Robertson no se convencía porque la definición de frente de ondas, como en la teoría electromagnética, requería de un medio para su propagación y la aproximación de campo débil no simplificaba adecuadamente el carácter altamente no-lineal de las ecuaciones de Einstein y aparecían singularidades espurias.

El mismo día que Infeld y Robertson discutieron el artículo de Einstein y Rosen descubrieron que el error de Einstein-Rosen era usar un sistema de coordenadas incorrecto y que el argumento que daban no era suficiente para excluir la existencia de ondas gravitacionales.

Infeld le transmitió la conversación con Robertson a Einstein unas horas más tarde. Al escuchar el relato,



Einstein sonriendo le comentó a Infeld “qué curioso, anoche casualmente también me di cuenta del error y ya lo corregí”. Albert Einstein diseminó su investigación en una serie de conferencias en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton sabiendo que las conclusiones de su trabajo con Rosen no eran correctas y en el curso de sus seminarios cambió el punto de vista original para concluir que la investigación de las ondas gravitacionales era un tema “interesante de investigar cuidadosamente”.

Paralelamente a estos hechos Einstein reescribió el artículo y lo envió al Journal Franklin Institute donde fue publicado en 1937 con un ligero cambio en el título, en vez de “¿Existen las ondas gravitacionales?” lo tituló “Sobre las ondas gravitacionales” (Einstein y Rosen, 1937).

Einstein nunca más volvió a publicar un artículo sobre ondas gravitacionales en su vida, si lo hizo Nathan Rosen desde la Unión Soviética donde se afincó un tiempo para luego regresar y trabajar por el resto de su vida en Haifa (Israel). Rosen no estuvo de acuerdo con el giro del artículo con Einstein y publicó su propia versión en Phys. Z Sowjetunion en 1937 sosteniendo que las ondas gravitacionales no existían (Rosen, 1937).

El resto de la vida de Rosen estuvo profundamente influida por la aproximación de campo débil de la gravitación y fue el punto de partida para introducir la idea de gravitación bimétrica -nombre que él acuñó- y que ha llegado a ser una interesante idea explorada en la física de nuestros días pero que -injustamente- Rosen no fue reconocido en vida como merecía. A propósito de esto mismo, Nathan Rosen también fue uno de los autores del famoso artículo EPR (Einstein-Rosen-Podolsky) que originó la idea del entrelazamiento en mecánica cuántica y que

es uno de los conceptos más importantes en la mecánica cuántica.

El desarrollo e implementación física de las ondas gravitacionales requirió de un andamiaje teórico mucho más elaborado y la clasificación de todas las simetrías algebraicas del tensor de Weyl y las simetrías conforme del espacio tiempo (esto se suele llamar clasificación de Petrov). Esta clasificación es un trabajo algebraico no trivial que lleva a seis tipos de simetrías donde encajan todos los tipos de soluciones de las ecuaciones de Einstein.

La llamada simetría N es la que contiene las soluciones de frente de onda plana (y simetría cilíndrica) necesaria para estudiar las ondas y radiación gravitacional. Esta simetría fue redescubierta por Felix Pirani en 1957 sin conocer el método de clasificación de Petrov (quién lo había propuesto de manera independiente en 1954). De hecho, es esta clasificación la que permite excluir el trabajo original de Einstein y Rosen, como así también, el resultado publicado por Rosen mientras trabajaba en la Unión Soviética (Pirani, 1956).

A partir de este momento las ecuaciones de Einstein se pudieron escribir de una manera sorprendentemente simple debido al parecido con las ecuaciones de Maxwell de la teoría electromagnética.

Con los resultados establecidos por un lado por Hermann Bondi y Felix Pirani (Bondi, 1957; Bondi *et al.*, 1959; Bondi *et al.*, 1962), se pudo elaborar la teoría de la radiación gravitacional muy rápidamente y, aparte de los dos autores referidos arriba, Ivor Robinson y Andrzej Trautman jugaron un rol fundamental (Robinson y Trauman, 1960). Si revisamos la literatura sobre radiación gravitacional de los años 50 y 60 los cuatro nombres de arriba siempre

aparecen como los más importantes, algunas veces aparece también Rainer Sachs (que a propósito llegó a ser muy conocido por haber predicho el efecto Sachs-Wolfe, cuando Arthur Wolfe era su estudiante en Austin y al mismo tiempo Director de tesis de un físico chileno que muchos conocimos, Jorge Krause quién enseñó en la Universidad de Chile, Universidad Simón Bolívar y la Pontificia Universidad Católica de Chile y desgraciadamente fallecido hace algunos años atrás).

El desarrollo del formalismo de la radiación gravitacional es heroico -en muchos sentidos- por todos los esfuerzos que se tuvieron que hacer desde el punto de vista matemático para llegar finalmente a fórmulas simples. Quedaba para más adelante el problema de discriminar cómo en una medición concreta se determinaban claramente las fuentes que producían la radiación.

El desarrollo de detectores que se comenzó después -gracias al esfuerzo de Joseph Weber, Charles Misner, Brice de Witt y John Wheeler- entre los años 1958-1965 también tiene una gran cuota de heroísmo y perseverancia por la convicción y la discusión para conseguir el financiamiento y demostrar, al mismo tiempo, la viabilidad del proyecto. Se tuvo que demostrar antes las personas que administraban la ciencia que la idea tendría un fin real.

Durante estos años científicos de distintos lugares se agruparon con expertos en experimentación óptica, relatividad numérica y otras talentosas personas y conformaron en Estados Unidos principalmente el grupo LIGO y en Europa el grupo gemelo Virgo (Kennefick, 2005).

El esquema del detector LIGO que se muestra abajo tiene una estructura muy simple. Primero desde (1) se emite un haz de laser que golpea donde hay un espejo (2) semitrans-

parente que refleja la luz desde (2) y viaja (4) km hasta el espejo de la izquierda reflejándose nuevamente hasta (2). El otro haz se refracta hasta llegar al segundo brazo del espejo (3) y regresa otra vez (2). En (5) se analizan los haces reflejados y si hay alguna perturbación debida a una onda gravitacional habrá una diferencia de caminos ópticos que se detectará en (5) (Kennefick, 2005).

Teóricamente el experimento es muy simple, pero medir las perturbaciones debidas a ondas gravitacionales es un problema muy complejo por ser muy pequeños los efectos y porque el montaje del experimento requiere aislar una región muy grande y eliminar al máximo el ruido molesto para el experimento (sísmico, térmico, acústico, etc.) (Kennefick, 2005).

El detalle altamente complejo de diseñar el interferómetro y la aislación del ruido fue desarrollado principalmente por Rainer Weiss. Es curioso esto último porque a pesar que el trabajo experimental de Joseph Weber fue conocido durante largo tiempo, cayó en el olvido por lo difícil que resultaba la sola idea de detectar ondas gravitacionales, varias de las ideas que desarrolló Weiss fueron –como es reconocido ahora por todos- un redescubrimiento del trabajo hecho previamente por Weber (Kennefick, 2005).

El análisis de la física y de mediciones fue hecho por Kip. Thorne y Barry C. Barish quienes fueron además los que comandaron la colaboración LIGO que involucró a miles de científicos, técnicos y estudiantes de doctorado (Kennefick, 2005).

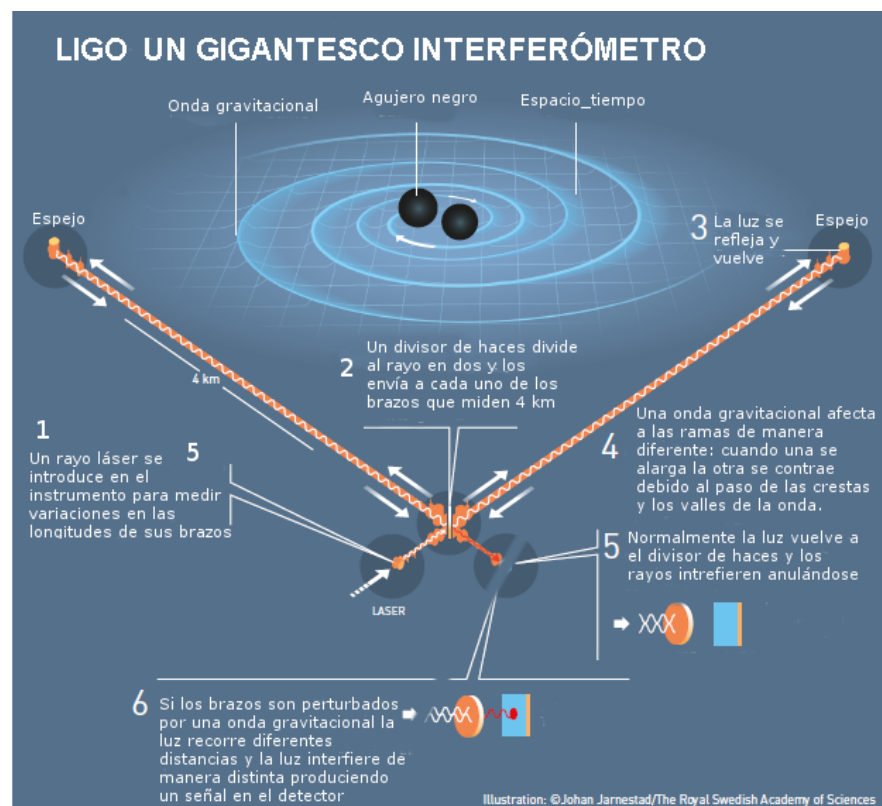
Las ondas gravitacionales las descubrió el grupo LIGO (y verificada por la colaboración VIRGO) en septiembre del 2015 y en octubre del

2017, Rainer Weiss, Barry C. Barish y Kip S. Thorne recibieron el Premio Nobel. A Rainer Weiss se le otorgó la mitad del premio en tanto que Barish y Thorne recibieron un cuarto del premio cada uno (Kennefick, 2005).

Como un comentario anecdótico, uno de nosotros (J.G.) tuvo la oportunidad de conocer a Kip Thorne en el invierno de 1984 durante una Escuela Latinoamericana de Física y conversar con él sobre ondas gravitacionales y, en particular, sobre uno de los tópicos que explicó en sus clases ese año, a saber, la aproximación de alta frecuencia como una manera de simplificar las ecuaciones de Einstein. En aquella ocasión fue la primera vez que él escuchó de los dos artículos que escribió –como parte de su tesis doctoral- Richard A. Isaacson (Isaacson, 1969a; Isaacson, 1969b).

El trabajo de Isaacson fue en parte de naturaleza técnica porque sistematizó el tratamiento de la radiación de radiación gravitacional usando lo que los físicos llaman teoría de perturbaciones, pero, por otro lado, también fue una contribución al entendimiento de lo que se mediría posteriormente porque introdujo ordenes de magnitud y escalas que sugerían como se debían interpretar los experimentos. Isaacson también puso empuje y creatividad para inaugurar un campo nuevo en la física, la relatividad numérica. Muchas de las predicciones interesantes de los años sesenta y setenta de la teoría de la relatividad general asociadas a sistemas gravitatorios binarios fue elaborada gracias a programas numéricos.

En la ceremonia de entrega del Premio Nobel en diciembre del 2017, Kip Thorne reconoció en su discurso





so, el rol fundamental que jugó Richard Isaacson en el descubrimiento de las ondas gravitacionales.

La última vez que uno de nosotros (J.G.) tuvo la ocasión de conversar con Kip Thorne fue en el año 1999 en el Centro de Estudios Científicos de Santiago, pero esta vez, fue una larga discusión filosófica en la que

estuvieron Curtis G. Callan y Stanley Deser y se habló de un tema apasionante, la evolución de estados en gravedad cuántica y teoría de cuerdas. Ambos son temas que aún no tienen una solución y se reducen a responder una aparentemente inocente pregunta, ¿Qué es tiempo en gravedad cuántica y en teoría de cuerdas?

En gravedad cuántica este problema ha sido abordado por mucha gente, en teoría de cuerdas en cambio no y recuerdo, que Stanley Deser comentó aquella tarde, “la gente ni siquiera se lo ha preguntado y es un tema tan interesante”.

Referencias

- Bondi H. 1957. Plane gravitational waves in general relativity. *Nature* 179: 1072-1073. <https://doi.org/10.1038/1791072a0>
- Bondi H, Pirani F, Robinson I. 1959. Gravitational waves in general relativity III. Exact plane waves. *Proc Roy Soc Lond A* 251: 519. <https://doi.org/10.1098/rspa.1959.0124>
- Bondi H, van der Burg MGJ, Metzner AWK. 1962. Gravitational waves in general relativity. VII. Waves from axi-symmetric isolated system. *Proc Roy Soc Lond A* 269: 21-52.
- Einstein A, Rosen N. 1937. On gravitational waves, *J Franklin Inst* 223: 43-54. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(37\)90583-0](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(37)90583-0)
- Isaacson RA. 1968. Gravitational radiation in the limit of high frequency. I. The linear approximation and geometrical optics. *Physical Review* 166: 1263.
- Isaacson RA. 1968. Gravitational radiation in the limit of high frequency. II. Nonlinear terms and the effective stress tensor. *Physical Review* 166: 1272.
- Kennefick D. 2005. Einstein versus the Physical Review. *Physics Today* 58: 43. <https://doi.org/10.1063/1.2117822>
- Pirani FAE. 1956. On the Physical significance of the Riemann tensor. *Acta Phys Polon* 15: 389-405.
- Robinson I, Trautman A. 1960. Spherical gravitational waves. *Phys Rev Lett* 4: 431.
- Rosen N. 1937. Plane polarized waves in the general theory of relativity. *Phys Z Soviet Union* 12: 366.