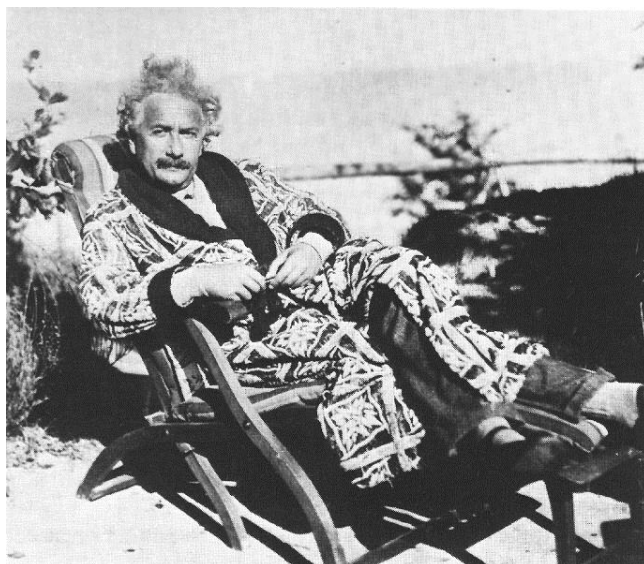


La venganza de Einstein: ondas de espacio y tiempo

Por Gustavo E. Romero



Albert Einstein (1879 -1955). Fotografiado en Argentina, abril de 1925.

El 24 de noviembre de 1915, mientras el Barón Colmar von der Goltz se hacía cargo del mando del VIº Ejército Otomano, el Mayor General británico Townshend, luego de sopesar las terribles pérdidas sufridas, consideró que sus fuerzas eran insuficientes para ocupar Bagdad y ordenó la retirada. Cuando finalmente tomó conciencia real de la situación, el Coronel otomano y subordinado de von der Goltz, Nureddin Bey, ordenó dar media vuelta a sus fuerzas, que también se retiraban, e inició la persecución de los anglo-hindúes.

Finalmente para el 25 de noviembre, y ante el cansancio de sus propias fuerzas, el mando otomano decidió frenar la persecución, por lo que la batalla llegó a su final. Bagdad permanecía en manos turcas y las Potencias Centrales triunfaban en la batalla de Ctesiphon. En esos mismos momentos, en la lejana y fría Berlín, Albert Einstein culminaba la búsqueda de las ecuaciones de campo de la Teoría General de la Relatividad, y enviaba un artículo comunicándolas a la Academia Prusiana de Ciencias¹. La forma de estas ecuaciones, hoy famosas, es:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

No se trata de una única ecuación, sino de un sistema de 10 ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas parciales. La expresión aparentemente simple, se debe a la notación compacta, llamada tensorial, utilizada por Einstein. El lado derecho de la

¹ Einstein, Albert (November 25, 1915). "Die Feldgleichungen der Gravitation". Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin: 844–847.

igualdad contiene una expresión matemática del contenido de energía e impulso de cualquier sistema material cuyos efectos gravitacionales se quieran conocer. El lado izquierdo contiene la representación de la gravedad como un campo, el campo “métrico” g , y complejas relaciones entre las variaciones de ese campo codificadas en el llamado “tensor de Ricci”, R . Básicamente, Einstein explicaba la gravitación como la distorsión de una entidad llamada “espacio-tiempo”, introducida por Hermann Minkowski en 1907. Esa distorsión es causada por cualquier sistema físico con energía. En la teoría especial de la relatividad, Einstein y otros, habían ya mostrado que el espacio y el tiempo cambian de acuerdo al estado de movimiento del sistema físico al que se refieren. En su nueva teoría, Einstein proponía que no sólo el movimiento afectan al espacio y al tiempo, sino el mero hecho que un sistema exista (tenga energía). Cuanto más energía, mayor la distorsión. Einstein había concebido la gravitación como un campo que modifica la geometría misma con que se distribuyen los eventos del mundo, lo que llamamos “espacio-tiempo”.

La búsqueda de una teoría de campo para la gravitación, esto es una teoría donde la gravitación no sea concebida *a lá Newton* como una “acción a distancia”, mágica y sin mediadores, la había iniciado Einstein en 1907. Fueron años de búsqueda, hallazgos, frustraciones, extravíos, trabajo intenso, y al final, extraordinario y frenético. La historia de esa búsqueda la he narrado en otra parte, y no la repetiré aquí².

² <http://www.iar.unlp.edu.ar/boletin/bolet-15/Un%20siglo%20de%20Relatividad%20General.pdf>

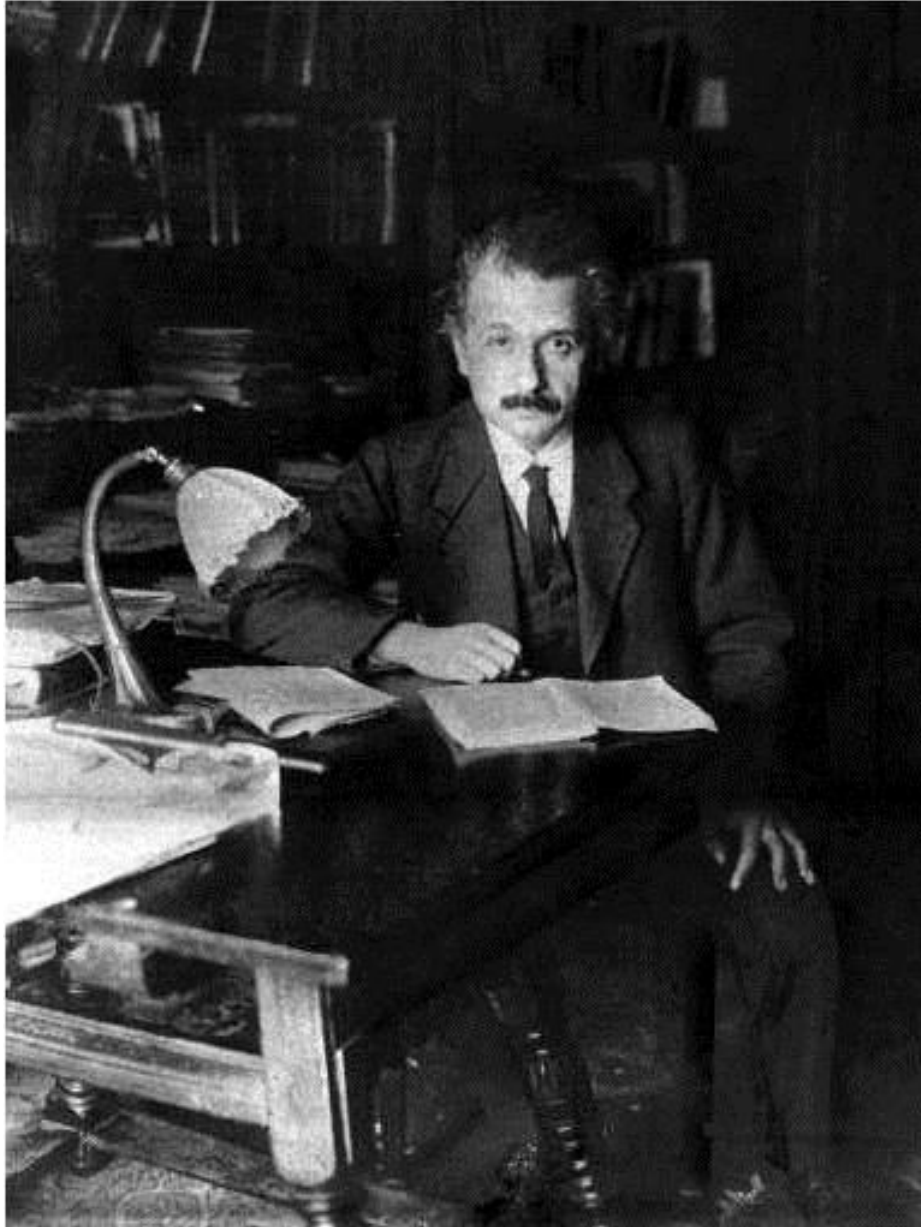


Figura: Albert Einstein en la época en que formuló la Teoría General de la Relatividad y predijo la existencia de las ondas gravitacionales.

Einstein mismo se había encargado de mostrar que su teoría podía explicar el corrimiento anómalo del perihelio de Mercurio, algo que era incomprensible en el contexto de la teoría de Newton. Sin embargo, ese no dejaba de ser un efecto extremadamente pequeño. Durante varios años, poca atención se prestó a la teoría. La guerra mundial continuaba, y las noticias sobre la relatividad apenas llegaban al mundo anglosajón. Lo poco que se sabía provenía de los artículos y cartas del astrónomo holandés Willem de Sitter, que mantenía correspondencia con Arthur S. Eddington, Secretario en ese entonces de la Royal Astronomical Society. Eddington era de las pocas personas fuera de Alemania con los conocimientos suficientes de matemáticas como para entender en ese tiempo el trabajo de Einstein. Luego de la guerra, él y el Astronomer Royal, Sir Frank Watson Dyson, organizaron expediciones para medir la deflexión de los rayos de luz de estrellas distantes debida al campo

gravitacional del sol, un efecto predicho por el propio Einstein con gran exactitud. Las observaciones se hicieron durante el eclipse del 29 de mayo de 1919, en la Isla Príncipe (África), y en Sobral (Brasil). Los resultados (luego cuestionados) apoyaron la teoría de Einstein e hicieron de éste una celebridad. Observaciones de eclipses posteriores terminaron por confirmar plenamente la predicción basada en la Relatividad General.

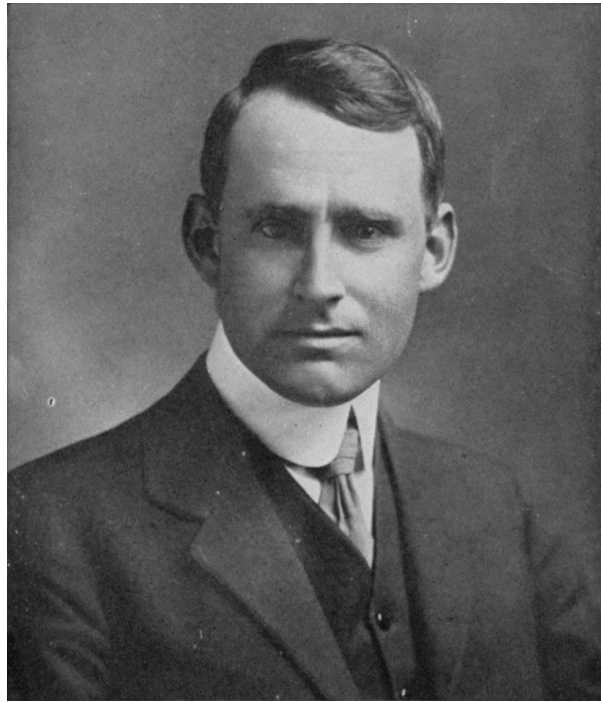


Figura: Arthur Stanley Eddington (1882-1944).

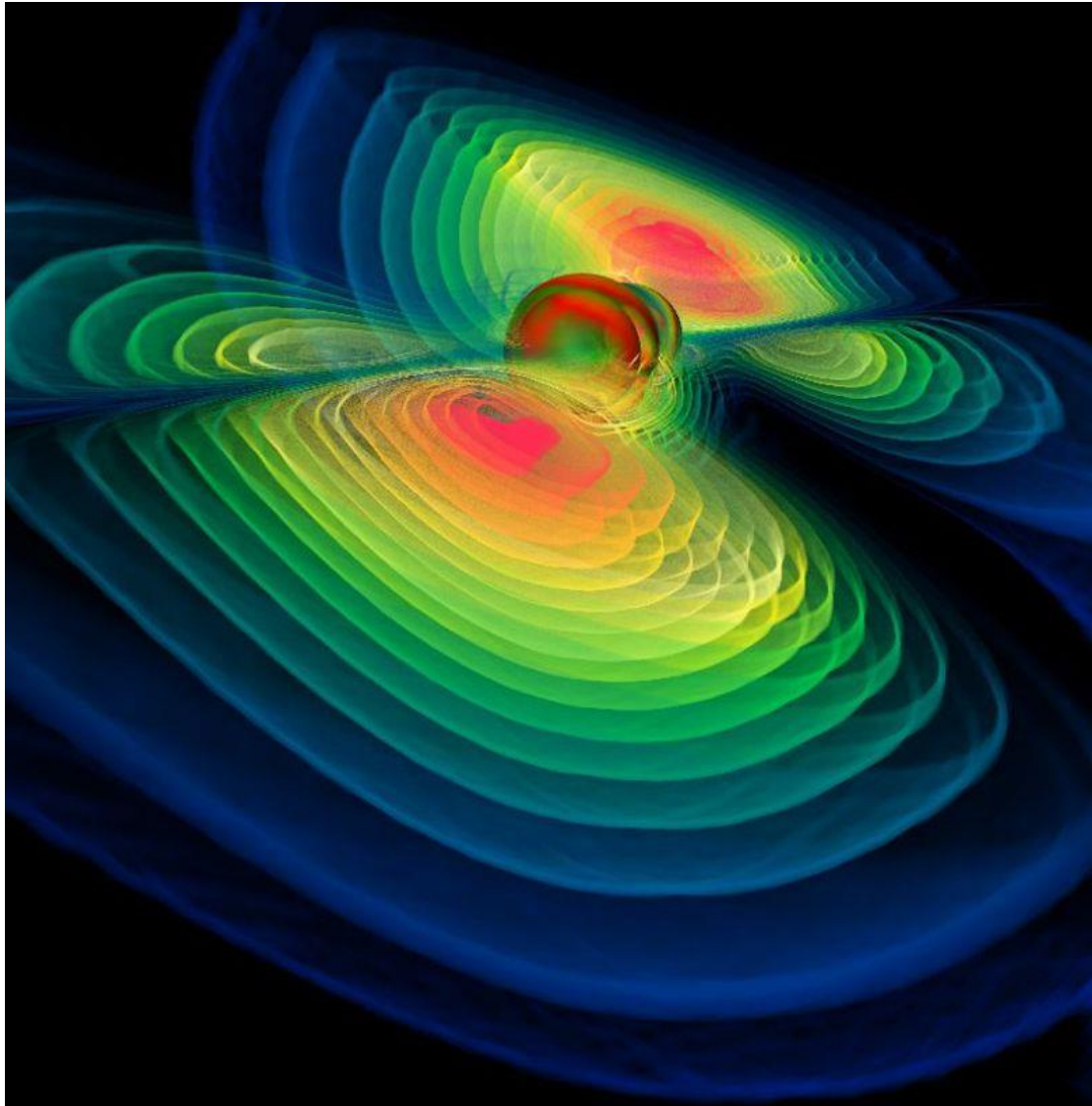


Figura: Simulación teórica de la producción de ondas gravitacionales en la fusión de dos objetos compactos, de acuerdo a la Relatividad General. Los colores indican intensidad de las ondas (más claro, más intenso).

Las confirmaciones de la teoría de Einstein, sin embargo, se limitaban a efectos minúsculos en el sistema solar, donde la gravedad está en un régimen muy débil ¿Era concebible una contrastación con objetos masivos y extremadamente densos, donde los efectos de la nueva teoría fuesen realmente notables? Einstein, pocos meses luego de publicar las ecuaciones básicas, mostró que si el campo gravitacional se perturba, la perturbación se propaga a la velocidad de la luz, en forma de una onda³. Como la gravitación es el campo métrico que determina la separación de eventos o sucesos en el espacio-tiempo, la onda es una onda de espacio y tiempo, que contrae y dilata longitudes e intervalos a su paso. Poco después, en 1918, Einstein pudo calcular la

³ Einstein, A (June 1916). "Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation". *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin*. part 1: 688–696.

cantidad de energía que pierde un sistema gravitacional por la emisión de ondas⁴. Cuando una masa se acelera, perturba el espacio-tiempo, y esa perturbación se propaga, llevándose energía. Para que la cantidad de energía sea significativa, una masa enorme (del orden de la del sol o mayor) debe acelerarse en un tiempo muy corto. Eso sólo es posible si el objeto es muy compacto. La emisión de ondas gravitacionales pareció, pues, indetectable en principio.

Con el surgimiento de la mecánica cuántica en 1925, la mayoría de los físicos comenzó a trabajar en esa área, donde la experimentación era relativamente fácil. La teoría de Einstein pasó a ser considerada como un hermoso palacio matemático de cristal, con poca o ninguna posibilidad de que alguna vez pudiesen corroborarse sus efectos más extremos. La Relatividad General, que había sido saludada por Paul Dirac como “el más grande logro de la mente humana en la comprensión de la naturaleza”, se transformó en una pieza de museo, y Einstein mismo, junto con el puñado de físicos relativistas que trabajaban en el tema, como una especie de fósil viviente.

Cuando Einstein murió en 1955, el gran público lo lloró, pero la mayoría de los científicos lo consideraban terminado desde hacía mucho tiempo. Sin embargo, a poco de su muerte, la Relatividad General renació, debido a nuevas contribuciones matemáticas y a increíbles descubrimientos astrofísicos. Para 1960, se había demostrado ya que ciertas anomalías matemáticas en las soluciones de las ecuaciones de Einstein que describen a un objeto compacto, el llamado radio de Schwarzschild, en realidad son el efecto de una mala elección del sistema de coordenadas matemático utilizado para describir la situación física. Eso mostró que los objetos compactos hoy llamados agujeros negros, eran una consecuencia posible de la teoría, y que ésta podía describirlos correctamente, al menos sobre distancias donde los efectos cuánticos no fuesen importantes. En 1963, con el descubrimiento de los llamados *quásares*, finalmente los astrónomos comenzaron a percatarse de que en el universo los agujeros negros podían estar produciendo una variadísima cantidad de fenómenos extremos. A fines de los años 1960 y durante los años 1970 gran cantidad de posibles agujeros negros fueron descubiertos en nuestra galaxia debido a la emisión de rayos X del gas caliente que cae en ellos. La edad de oro de la “astrofísica relativista” había comenzado.

Pronto resultó claro que en el universo debían existir números sistemas binarios formados por dos agujeros negros. Pero...¿dónde estaban las ondas gravitacionales que ellos necesariamente debían producir? Todos los intentos por detectarlas, por ejemplo usando masas muy grandes en laboratorios, que debían vibrar a ciertas frecuencias cuando pasase una onda gravitacional, fracasaron. La eliminación de las vibraciones no gravitacionales resultó imposible. El “ruido” producido incluso por una persona que caminaba a kilómetros de distancia es millones de veces mayor que el efecto de las ondas. ¿Cómo detectarlas, entonces?

En 1992, Kip Thorne y Ronald Drever de Caltech, junto a Rainer Weiss del MIT, fundaron un nuevo experimento destinado a detectar y medir ondas gravitacionales. Se llamó LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Se trataba de un nuevo concepto: un instrumento en forma de “L”, con dos brazos perpendiculares

⁴ Einstein, A (1918). "Über Gravitationswellen". Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin. part 1: 154–167.

de unos 4 km de extensión cada uno. En esos brazos, circulan rayos laser, perfectamente calibrados para que reboten en el otro extremo del brazo y vuelvan al punto de partida con un desfase tal que las ondas de luz se cancelen completamente (ver gráfico). Si una onda gravitacional pasa por el detector, modifica las distancias y los intervalos, en forma diferente en cada brazo. Eso hace que la interferencia, antes perfectamente destructiva, ya no lo sea por un breve lapso, y algo de luz pase. Esa luz puede ser detectada y medida. La modificación en la longitud del brazo de 4 km del interferómetro que se debe medir es de menos de un milésimo (0.001) veces el radio de un protón. ¿Cómo es posible detectar semejante movimiento con la inmensa cantidad de efectos locales que producen cambios mucho mayores, desde micro-temblores hasta cambios de temperatura?

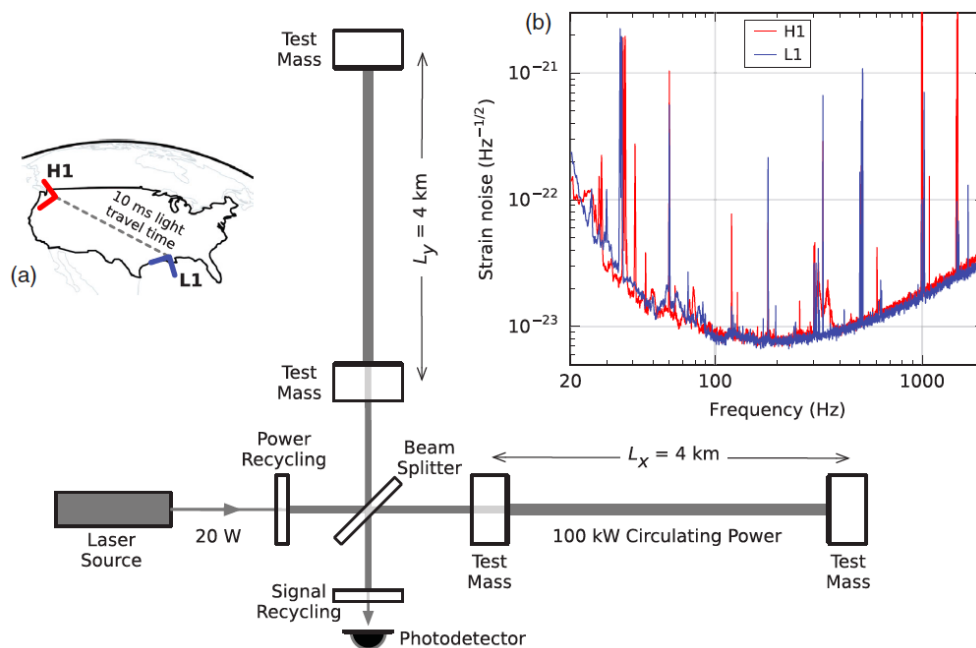


Figura: Los dos detectores de Advanced LIGO (H1 y L1) en EEUU, y un esquema de cómo es el interferómetro, con sus dos brazos.

Los errores se eliminan por un proceso de protección múltiple y duplicación y filtrado de los datos. Los conductos por los que se propagan los haces de los láseres tienen un vacío casi perfecto, menor que el que existe en la luna. Los ductos están congelados apenas por sobre el cero absoluto, lo cual minimiza los efectos térmicos. La construcción es antisísmica y cada micro-temblor es registrado con una sensibilidad exquisita. Finalmente, y lo más importante, no hay sólo un instrumento. Hay dos, uno en el noroeste de EEUU: LIGO Hanford Observatory, on the DOE Hanford Site ($46^{\circ} 27' 18.52''$ N $119^{\circ} 24' 27.56''$ W), ubicado cerca de Richland, Washington, y el otro en el sureste: el LIGO Livingston Observatory ($30^{\circ} 33' 46.42''$ N $90^{\circ} 46' 27.27''$ W) Livingston, Louisiana. Es imposible que los errores y el ruido sean iguales en los dos detectores. Por tanto, si una misma señal es registrada en ambos detectores simultáneamente, se tiene un posible candidato a onda gravitacional. Esa señal, entonces, es cotejada con la forma que tendrían las señales resultantes de la fusión de un sistema binario de dos agujeros negros de algunas decenas de masas solares. Las señales artificiales de comparación han sido generadas con supercomputadoras basándose estrictamente en

la Teoría General de la Relatividad. Sólo en el caso de que la señal sea extremadamente similar a lo predicho por la teoría es considerada como un potencial candidato a onda gravitacional.

LIGO es un experimento que costó unos 650 millones de dólares y en el que trabajan más de 900 científicos. Durante años operó sin éxito. Entonces se decidió reciclarlo con nuevos detectores, 10 veces más sensibles que los viejos. Al nuevo instrumento se le llamó Advanced LIGO. Este instrumento comenzó a funcionar en septiembre de 2015. Casi inmediatamente detectó, por primera vez, en forma directa, una onda gravitacional.

¿Qué detectó Advanced LIGO?

Las ondas gravitacionales se detectaron el 14 de septiembre de 2015 a las 5:51 am hora del este (09:51 GMT por tanto), en los detectores de los dos Observatorios de ondas gravitacionales. El descubrimiento fue comunicado, luego de todo tipo de test y revisiones para descartar errores sistemáticos y aleatorios, el 11 febrero de 2016⁵.

Las ondas detectadas corresponden a la fusión de un sistema binarios de agujeros negros (ver figuras). Uno de ellos tenía aproximadamente 36 veces la masa del sol. El otro, unas 29 veces su masa. Luego de fundirse en un único agujero negro, el producto tuvo 62 masas solares, y no $36+29=65$. Las tres masas solares de diferencia escaparon en forma de ondas gravitacionales, transportando la energía equivalente (de acuerdo a la fórmula de Einstein de equivalencia entre masa y energía $E=mc^2$) por todo el universo. Sólo una cantidad extremadamente pequeña de esa energía llegó a la tierra. La onda fue cambiando de frecuencia, a medida que los agujeros negros se acercaban, desde 35 MHz hasta 250 MHz (un Hz es una revolución por segundo, y un “mega” – M- un millón de ellas). Las señales detectadas, junto a las predicciones de la Relatividad General, se muestran en la figura adjunta. La coincidencia es asombrosa: Einstein, luego de 100 años había sido vindicado.

⁵ B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), Phys. Rev. Lett 116, 061102 (2016).

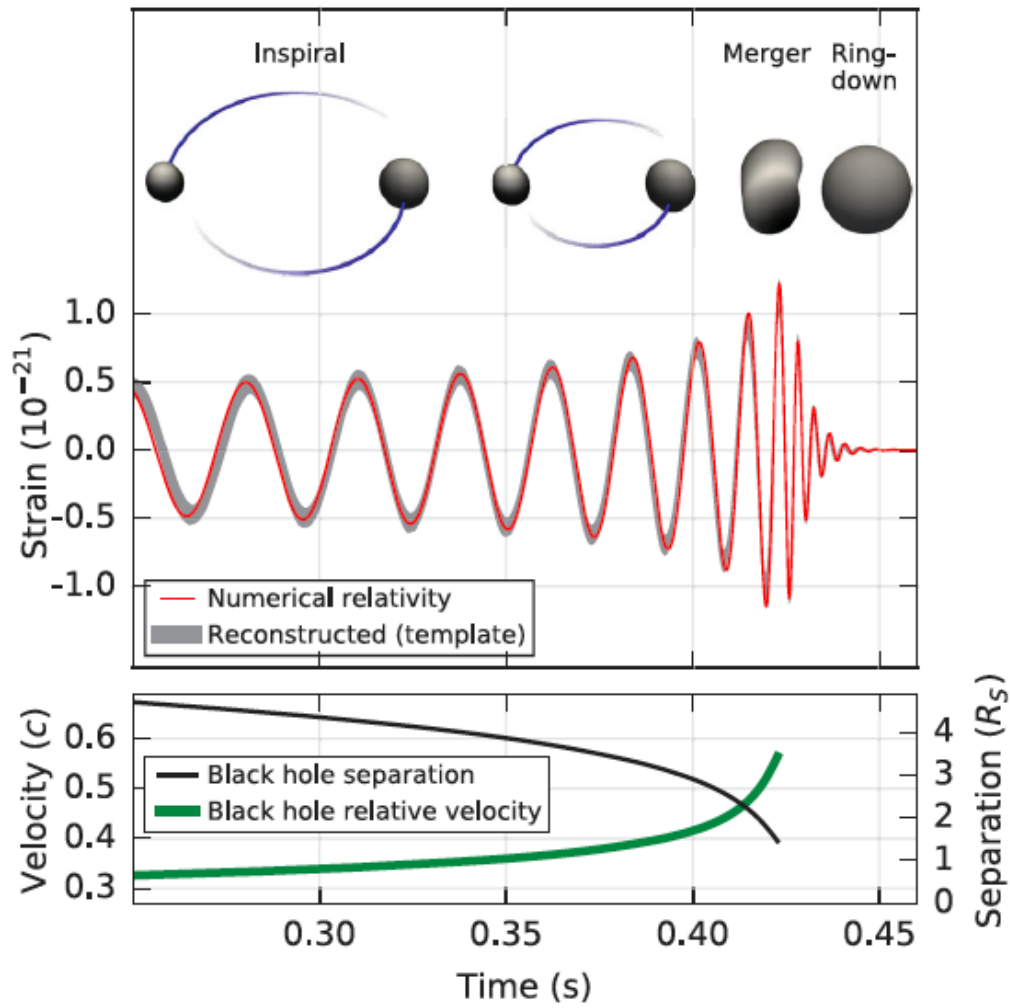


Figura: Estas imágenes muestran como evolucionó el sistema de agujeros negros hasta fundirse. Arriba: un diagrama de lo que sucedió en función del tiempo. En el medio: las ondas producidas. Abajo: como evolucionó el separación entre los agujeros y como la velocidad de ellos en su órbita. Todo el fenómeno duro menos de medio segundo.

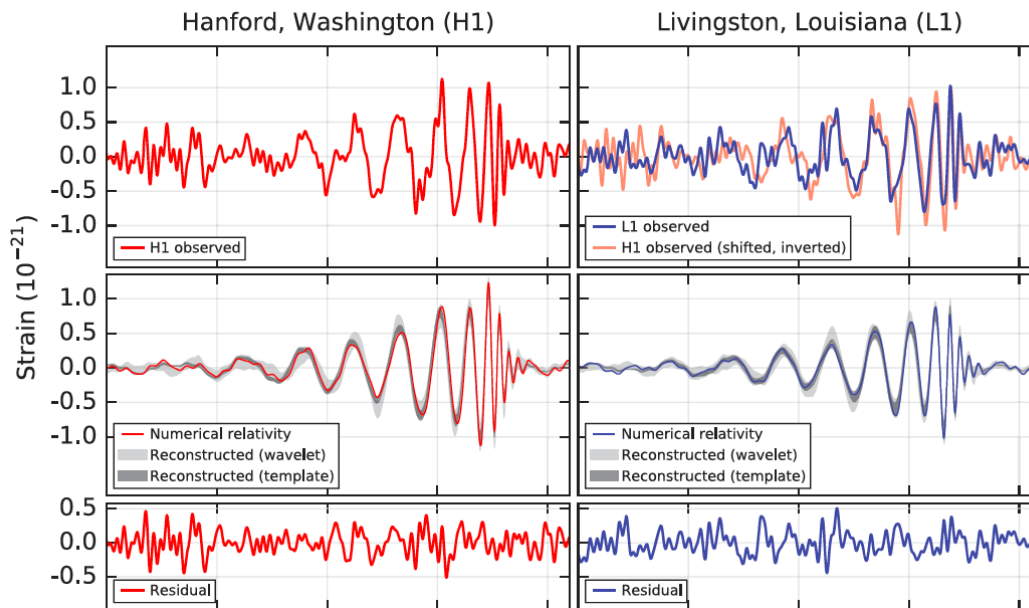


Figura: Señales detectadas por los dos instrumentos de Advanced LIGO. Se muestra tanto las señales como las predicciones de la Relatividad General.

¿Qué implica el descubrimiento de Advanced LIGO?

El descubrimiento tiene profundas implicaciones científicas y filosóficas. En particular:

- Es la primera contrastación de la Teoría General de la Relatividad en régimen de campo fuerte.
- Prueba la existencia de las ondas gravitacionales.
- Prueba que la gravitación es un campo.
- Prueba que el espacio vacío puede contener energía del campo gravitacional en ausencia de materia (las ondas viajaron durante 1200 millones de años por el espacio hasta nosotros).
- El punto anterior prueba que el espacio-tiempo tiene al menos 4 dimensiones, ya que la gravitación no puede viajar por el vacío si sólo existieran 3 dimensiones.
- Prueba que la doctrina filosófica llamada “presentismo” es falsa (ver el argumento en mi artículo técnico *On the Ontology of Spacetime*⁶).
- Prueba la existencia de sistemas binarios de agujeros negros u objetos extremadamente similares a ellos.
- Da nacimiento a una nueva rama de la astronomía, la astronomía de ondas gravitacionales, que se suma a la astronomía óptica, la de radio, la ultravioleta, la de rayos X, la de rayos gamma, y la astronomía de neutrinos.

⁶ G.E. Romero, *On the Ontology of Spacetime: Substantivalism, Relationism, Eternalism, and Emergence*, Foundations of Science, 19 pp, (2016). DOI 10.1007/s10699-015-9476-1. <http://arxiv.org/abs/1509.08981>.

- Muestra, una vez más, que Einstein tuvo una de las mentes más lúcidas que el mundo ha conocido jamás.

Las ondas de gravedad son ondas que distorsionan espacio y tiempo. Nos revelan un mundo asombroso, lejano a nuestras intuiciones y al sentido común. Esos ritmos que modulan instantes y distancias, que doblan lo inimaginable, nos traen noticias de catástrofes cósmicas frente a las cuales nuestras penas, luchas, miserias, esperanzas, tienen la irremediable pequeñez condenada de lo efímero y vano.

Gustavo E. Romero
Investigador Superior del CONICET
Profesor Titular de Astrofísica Relativista, UNLP
Director grupo GARRA
romero@iar-conicet-gov.ar
<http://garra.iar.unlp.edu.ar/>

Primera publicación:

www.factorrelblog.com

Buenos Aires, 15 de febrero de 2016