

LAS ONDAS GRAVITACIONALES DETECTADAS 100 AÑOS DESPUÉS DE LA PREDICCIÓN DE EINSTEIN

LIGO abre una nueva ventana al universo con la observación de las ondas gravitacionales procedentes de la colisión de agujeros negros – Contribuciones clave de los científicos de la Sociedad Max Planck y de la Universidad Leibniz de Hanóver

Por primera vez, los científicos han observado ondulaciones en el tejido del espacio-tiempo, llamadas ondas gravitacionales, llegando a la Tierra procedentes de un evento catastrófico en el universo distante. Esto confirma una importante predicción de la teoría de la relatividad general de Albert Einstein de 1915 y abre una nueva ventana sin precedentes en el cosmos.

Las ondas gravitacionales llevan consigo información acerca de sus dramáticos orígenes y sobre la naturaleza de la gravedad que no puede obtenerse de otra manera. Los físicos han llegado a la conclusión de que las ondas gravitacionales detectadas fueron producidas durante la última fracción de segundo de la fusión de dos agujeros negros para producir un solo agujero negro más masivo y en rotación. Esta colisión de dos agujeros negros había sido predicha pero nunca antes había sido observada.

Las ondas gravitacionales fueron detectadas el 14 de septiembre de 2015 a las 5:51 a.m. hora de verano del este de Estados Unidos (09:51 UTC) por los dos detectores gemelos del Observatorio por Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO, por sus siglas en inglés), ubicados en Livingston, Louisiana, y Hanford, Washington, EE.UU. Los observatorios LIGO están financiados por la National Science Foundation (NSF), y fueron concebidos y construidos, y son operados por Caltech y MIT. El descubrimiento, aceptado para su publicación en la revista *Physical Review Letters*, fue realizado por la Colaboración Científica LIGO (que incluye la Colaboración GEO600 y el Australian Consortium for Interferometric Gravitational Astronomy) y la colaboración Virgo usando datos de los dos detectores LIGO.

Investigadores del Instituto Max Planck de Física Gravitacional (Instituto Albert Einstein; AEI) en Hanóver y en Potsdam, Alemania, y del Instituto de Física Gravitacional de la Universidad Leibniz de Hanóver (LUH) han realizado contribuciones cruciales para el descubrimiento en diversas áreas clave: el desarrollo y el funcionamiento de detectores extremadamente sensitivos que empujó los límites de la física, métodos eficientes para el análisis de datos ejecutados en poderosos clústers de ordenadores y modelos de onda altamente precisos para detectar la señal e inferir de ella información astronómica.

Técnicas avanzadas para el detector de GEO600

La colaboración GEO incluye investigadores del Max Planck y de la Universidad Leibniz junto con investigadores del Reino Unido. Dicha colaboración diseñó y maneja el detector de ondas gravitacionales GEO600 cerca de Hanóver, Alemania. Este detector se utiliza como un laboratorio de ideas y como banco de pruebas para técnicas avanzadas para los detectores. La mayoría de las tecnologías clave que contribuyeron a la sensibilidad sin precedentes de Advanced LIGO (aLIGO) y que permitieron el descubrimiento fueron desarrolladas y probadas en la colaboración GEO. Ejemplos de estas tecnologías son el reciclaje de señal, la extracción de la banda lateral resonante y suspensiones de los espejos monolíticas. Investigadores del AEI junto con el Centro del Láser de Hanóver, asociación registrada, también desarrollaron e instalaron los sistemas de láseres de alta potencia de aLIGO, los cuales son cruciales para las mediciones de gran precisión.

“Los científicos han estado buscando ondas gravitacionales durante décadas, pero sólo ahora hemos sido capaces de alcanzar las tecnologías increíblemente precisas que son necesarias para captar estos ecos extremadamente débiles del universo”, dice el profesor Karsten Danzmann, director del Instituto Max Planck de Física Gravitacional en Hanóver y director del Instituto de Física Gravitacional de la Universidad Leibniz de Hanóver. “Este descubrimiento no habría sido posible sin los esfuerzos y las tecnologías desarrolladas por el Max Planck, la Universidad Leibniz y los científicos del Reino Unido trabajando en la colaboración GEO.”

Recursos informáticos y métodos analíticos para el descubrimiento

Científicos del Max Planck han desarrollado e implementado métodos de análisis de datos avanzados y eficientes para la búsqueda de tenues señales de ondas gravitacionales en el flujo de datos de los detectores aLIGO y han llevado a cabo la mayor parte del análisis. Además, la mayoría de los recursos informáticos para el descubrimiento y para el análisis de los datos de Advanced LIGO provienen de Atlas, el clúster de ordenadores diseñado para el análisis de datos de ondas gravitacionales más poderoso del mundo, mantenido en funcionamiento por el AEI. Atlas ha suministrado más de 24 millones de horas por núcleo de CPU para el análisis de los datos de Advanced LIGO.

“Estoy orgulloso de que los dos primeros científicos que observaron la señal fueran del Instituto Max Planck de Física Gravitacional y de que nuestro instituto representara un papel destacado en este emocionante descubrimiento”, dice el profesor Bruce Allen, director del Instituto Max Planck de Física Gravitacional en Hanóver. “Einstein mismo pensó que las ondas gravitacionales eran demasiado débiles para ser detectadas y no creía en agujeros negros. ¡Pero no creo que le hubiera importado estar equivocado!”

Modelos precisos de las ondas gravitacionales allanan el camino para observar la fusión de agujeros negros

Investigadores del Max Planck han desarrollado modelos precisos de las ondas gravitacionales que los agujeros negros generarían en los procesos finales de la órbita y la colisión entre ellos. Estos modelos fueron implementados y utilizados en la continua búsqueda de coalescencias de binarias en los datos de LIGO. Es esta búsqueda la que observó la fusión de agujeros negros conocida como GW150914 con una significación estadística mayor que 5-sigma. Científicos del Max Planck también utilizaron los mismos modelos de onda para inferir los parámetros astrofísicos de la fuente, tal como las masas y los momentos angulares (spin) de los dos agujeros negros, la orientación y la distancia a la Tierra, y la masa y el spin del enorme agujero negro que la fusión produjo. Los modelos de onda también fueron utilizados para comprobar si GW150914 es consistente con las predicciones de la relatividad general.

“Llevamos años modelando la emisión de ondas gravitacionales de uno de los eventos más extremos del universo: parejas de agujeros negros masivos orbitando el uno alrededor del otro y luego fusionándose. ¡Y ésta es exactamente el tipo de señal que hemos detectado!” dice la profesora Alessandra Buonanno, directora del Instituto Max Planck de Física Gravitacional en Potsdam. “Es abrumador ver con cuánta exactitud la teoría de la relatividad de Einstein describe la realidad. GW150914 nos da una oportunidad extraordinaria para ver cómo la gravedad funciona bajo algunas de las condiciones más extremas posibles.”

La investigación en LIGO la lleva a cabo la Colaboración Científica LIGO (LSC), un grupo de más de 1000 científicos de universidades de todo Estados Unidos y de otros 14 países. Más de 90 universidades e institutos de investigación de la LSC desarrollan la tecnología para el detector y analizan los datos; alrededor de unos 250 estudiantes contribuyen de forma relevante a la colaboración. La red de detectores LSC incluye los interferómetros de LIGO y el detector GEO600. El equipo de GEO incluye científicos del Instituto Max Planck de Física Gravitacional (Albert Einstein Institute, AEI), Leibniz Universität Hannover, junto a socios de la Universidad de Glasgow, Universidad de Cardiff, la Universidad de Birmingham, otras universidades en el Reino Unido, y la Universidad de las Islas Baleares en España.

LIGO fue originalmente propuesto como un medio para detectar estas ondas gravitacionales en los años 1980 por Rainer Weiss, profesor de física, emérito, del MIT; Kip Thorne, que ocupa la cátedra del profesor Richard P. Feynman de física teórica de Caltech, emérito; y Ronald Drever, profesor de física, emérito, también de Caltech.

La investigación en Virgo se lleva a cabo por la Colaboración Científica Virgo, un grupo de más de 250 físicos e ingenieros pertenecientes a 19 laboratorios europeos diferentes: 6 del Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS) de Francia; 8 del Instituto Nacional de Física Nuclear (INFN) en Italia; 2 del Nikhef en los Países Bajos; el Instituto Wigner en Hungría; el grupo POLGRAW en Polonia; y el Observatorio Gravitacional Europeo (EGO), el laboratorio que alberga el interferómetro Virgo cerca de Pisa, Italia.

El descubrimiento fue posible gracias a las capacidades mejoradas de Advanced LIGO, una importante actualización que aumenta la sensibilidad de los instrumentos en comparación con los detectores LIGO de primera generación, lo que permite un gran aumento del volumen del universo explorado - y el descubrimiento de las ondas gravitacionales durante su primer periodo de observación. La National Science Foundation de Estados Unidos lidera el apoyo financiero a Advanced LIGO. Organismos de financiación en Alemania (Sociedad Max Planck), el Reino Unido (Consejo de Infraestructuras de Ciencia y Tecnología, STFC) y Australia (Consejo Australiano de Investigación) también han contribuido significativamente al proyecto. Varias de las tecnologías clave que hicieron Advanced LIGO mucho más sensible se han desarrollado y han sido probadas por la colaboración alemana y británica GEO. Varias universidades han diseñado, construido y probado componentes clave para Advanced LIGO: la Universidad Nacional de Australia, la Universidad de Adelaide, la Universidad de Florida, la Universidad de Stanford, la Universidad de Columbia de Nueva York y la Universidad Estatal de Louisiana.

Material complementario e información:

El **Instituto Max Planck de Física Gravitacional (Instituto Albert Einstein; AEI)** es un instituto de la Sociedad Max Planck con sub-institutos en Potsdam-Golm (a las afueras de Berlín) y en Hanóver, que está estrechamente relacionado con la Universidad Leibniz. Desde su fundación en 1995, el Instituto Max Planck de Física Gravitacional (Instituto Albert Einstein) se ha establecido como un centro líder de investigación internacional. El programa de investigación se lleva a cabo en cinco divisiones y varios grupos de investigación independientes cubren el espectro completo de la física gravitacional: desde las inmensas dimensiones del universo hasta las minúsculas escalas de las cuerdas. El AEI es el único instituto en el mundo que aún todos estos campos clave de investigación. Tres de las cinco divisiones son parte de la Colaboración Científica LIGO a representaron un papel destacado en llevar a cabo la primera detección directa de ondas gravitacionales.

El **Instituto de Física Gravitacional de la Universidad Leibniz de Hanóver** está en conjunto con el AEI Hanóver. Bajo un mismo techo, científicos de ambas instituciones colaboran de cerca en todos los aspectos de la investigación de ondas gravitacionales. Más de 50 estudiantes de doctorado trabajan para la obtención de sus títulos por la Universidad Leibniz de Hanóver en la conjunta International Max Planck Research School (IMPRS) en Astronomía de Ondas Gravitacionales.

La **investigación de ondas gravitacionales en la Sociedad Max Planck** tiene una larga historia y se remonta a los inicios de este campo científico en los años 1960. Fue el grupo Max Planck quien dirigió experimentos de coincidencia entre detectores de masa resonante para refutar las primeras declaraciones de detección de ondas gravitacionales en los años 60. Posteriormente, el grupo empezó a trabajar en interferometría láser y construyó los primeros prototipos importantes de detectores de ondas gravitacionales por interferometría láser, desarrollando y/o demostrando la mayoría de los conceptos clave que hoy en día son una parte integral de los grandes observatorios. Entre ellos, los limpiadores de modos ópticos, la supresión de luz extraviada, el reciclaje de la potencia y, más adelante y en colaboración con la Universidad Leibniz de Hanóver, el reciclaje doble, la extracción de bandas laterales resonantes, los componentes ópticos térmicamente adaptables, las suspensiones monolíticas de varios niveles y los láseres estables de alta potencia.

Las **ondas gravitacionales** son una predicción importante de la teoría de la relatividad general. El movimiento en aceleración de grandes masas crea ondulaciones en el tejido del espacio-tiempo, lo cual conduce a diferencias minúsculas en la distancia relativa entre objetos lejanos. Incluso las ondas gravitacionales emitidas por fuentes astrofísicas, como explosiones estelares o fusiones de agujeros negros, tan sólo varían en una milésima parte del diámetro de un protón (10^{-18} meters) la longitud de una medición de un kilómetro de distancia sobre la Tierra. No ha sido hasta ahora que los detectores han alcanzado el nivel de sensibilidad necesario para poder medir ondas gravitacionales. La observación del "universo gravitacional", que hasta ahora se hallaba en la oscuridad para nosotros, conduce a una nueva era en astronomía. Los detectores de ondas gravitacionales por interferometría como LIGO (en los Estados Unidos), GEO600 (en Alemania) y Virgo (en Italia), así como futuros detectores en Japón y en India colaboran muy de cerca. Un detector de ondas gravitacionales de baja frecuencia en el espacio (LISA) se encuentra en preparación por la ESA y la NASA y científicos de la Universidad Leibniz de Hanóver y del AEI representan un papel destacado.

La señal presentada ahora ha sido llamada GW150914 porque llegó a la Tierra el 14 de Septiembre de 2015, a las 09:40:45 UTC. Fue detectada por ambos detectores de LIGO en Hanford y en Livingston. Fue observada durante aproximadamente 0,2 segundos durante los cuales la señales aumentó en frecuencia y en amplitud. Durante 0,2 segundos, su frecuencia aumentó desde los 35 Hz hasta 250 Hz y tuvo una amplitud máxima (deformación por la onda gravitacional) de 10^{-21} .

Comparando los tiempos de llegada de la señal - el detector en Livingston registró el evento 7 milisegundos antes que el detector en Hanford -, los científicos pueden afirmar que la fuente estaba localizada en el hemisferio sur.

La señal reproduce las predicciones de la relatividad general para la inspiral (una espiral hacia el interior) y fusión de dos agujeros negros con masas de 36 y 29 veces la masa del Sol respectivamente. El agujero negro resultante de la fusión tiene una masa de unas 62 veces la masa del Sol. Aproximadamente 3 veces la masa del sol fue convertida en ondas gravitacionales en una fracción de segundo - con una potencia máxima de unas 50 veces la de todo el universo visible. De las observaciones se ha inferido que el sistema de agujeros negros se encontraba a una distancia de unos 410 Megapársecs (1,3 mil millones de años luz).

A través de la caracterización de las fluctuaciones aleatorias de ruido en los detectores de Advanced LIGO, los científicos estiman que la significación estadística de la señal es de 5,1 desviaciones típicas. Esto significa que semejante señal, en 16 días de observación, ocurre menos de una vez cada 200.000 años a cause de coincidencias de las fluctuaciones aleatorias de ruido.

Advanced LIGO está formado por detectores de ondas gravitacionales por interferometría en dos localizaciones, uno en Hanford (Washington State, EE.UU.) y otro en Livingston (Louisian, EE.UU.). En cada establecimiento, rayos láser son enviados a través de tubos de vacío de cuatro kilómetros situados en forma de L para monitorizar con gran precisión la distancia entre los espejos que se encuentran al final de cada tubo. Según la teoría de Einstein, la distancia entre los espejos varía en una cantidad infinitesimal cuando la onda gravitacional pasa a través del detector. Los detectores Advanced LIGO pueden detectar cambios más pequeños que la diezmilésima parte de un protón (10^{-19} metros) en la longitud de sus brazos.

Observatorios independientes y con una gran separación entre ellos son necesarios para verificar que las señales vienen del espacio y también para determinar la dirección de la fuente de ondas gravitacionales.

aLIGO concluyó su primer periodo coordinado de tres meses de recogida de datos el día 12 de enero de 2016. Durante este periodo, la sensibilidad era de 3 a 5 veces mayor que la de initial LIGO. Se espera un incremento en la sensibilidad de diez veces la de initial LIGO cuando se alcance la sensibilidad diseñada.

GEO600 es un detector de ondas gravitacionales por interferometría con brazos de 600 metros, localizado cerca de Hanóver, Alemania. Está diseñado y menajedo por científicos del Instituto Max Planck de Física Gravitacional en la Universidad Leibniz de Hanóver, junto con colaboradores en el Reino Unido. GEO600 es parte de una red mundial de detectores de ondas gravitacionales y de momento el único detector que está constantemente recogiendo datos. GEO600 también es un laboratorio de ideas para las tecnologías de los detectores avanzados, como la luz no-clásica, el reciclaje de señal y de potencia y las suspensiones monolíticas.

Atlas es una inmenso clúster de ordenadores en el Instituto Albert Einstein en Hanóver, con enormes capacidades computacionales. Atlas está formado por más de 14.000 núcleo de CPU y 250.000 núcleos de GPU, lo que lo convierte en el mayor clúster del mundo dedicado al análisis de datos de ondas gravitacionales. La manutención de Atlas (inversión y operaciones) corre principalmente a cargo de la

Información financiera

Las operaciones de LIGO están financiadas por la National Science Foundation (NSF) de EE.UU. y las instalaciones se mantienen en funcionamiento a través de Caltech y MIT. La mejora de LIGO fue financiada por la NSF con contribuciones financieras y técnicas considerables por parte de la Sociedad Max Planck alemana, el Consejo de Infraestructuras de Ciencia y Tecnología (STFC) británico y el Consejo Australiano de Investigación.

www.aei.mpg.de/gwdetection

GEO600 está financiado por el Ministerio Federal de Educación y Ciencia, el Estado de Baja Sajonia, la Sociedad Max Planck, el Consejo de Infraestructuras de Ciencia y Tecnología (STFC) y la VolkswagenStiftung.