

OBSERVACIONES DE ONDAS GRAVITACIONALES

Hace ya más de seis años, el Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) capturó la primera onda gravitacional de la historia, GW150914, emitida en la coalescencia de dos agujeros negros. Desde entonces la observación de ondas gravitacionales de colisiones de agujeros negros en sistemas binarios se ha convertido en algo rutinario, lo que ha dado paso a una nueva forma de astronomía, con importantes implicaciones en muchas áreas de la física.



José A. Font

Dp. Astronomía y Astrofísica/OAUV, U. de Valencia
J.Antonio.Font@uv.es

Sascha Husa

Universitat de les Illes Balears
sascha.husa@uib.es

Mario Martínez

Institut de Física d'Altes Energies (IFAE)
mmp@ifae.es

Alicia Sintés

Universitat de les Illes Balears
alicia.sintes@uib.es

Sin embargo, hace apenas seis años todavía se albergaban dudas de la existencia de tal tipo de radiación, originalmente postulada en la Teoría General de la Relatividad de Albert Einstein en 1916. Además de los dos detectores Advanced LIGO, situados en Livingston (Louisiana, EE.UU.) y en Hanford (Washington, EE.UU.), el detector europeo Advanced Virgo, emplazado en Cascina (Italia), también contribuye a las detecciones desde finales de la segunda campaña de observación, O2 (concluida en agosto de 2017). Combinando los tres observatorios no solo aumenta nuestra confianza en el origen astrofísico de las señales (al minimizar las perturbaciones locales asociadas a efectos instrumentales y del entorno), sino que también es posible localizar en el cielo las fuentes que emiten las ondas gravitacionales con una precisión de hasta unas pocas decenas de grados cuadrados, lo que permite el seguimiento observacional posterior de las fuentes mediante telescopios "tradicionales" en todo el rango del espectro electromagnético. Esta posibilidad, esperada con mucha antelación por ambas comunidades científicas, se tornó realidad con la espectacular detección de [GW170817](#), señal gravitacional asociada a la colisión de dos estrellas de neutrones en un sistema binario en la galaxia NGC 4993 en la dirección de la constelación de Hydra. La fuente, GW170817/GRB 170817A/AT 2017gfo, observada por unos 200 telescopios tanto terrestres como espaciales, desde las frecuencias de los rayos gamma (GRB 170817A) hasta las de las ondas de radio, ha dado origen a la llamada [Astronomía de Mensajeros Múltiples](#). La astronomía española tuvo una participación muy relevante en las observaciones de esta fuente.

La red de detectores de ondas gravitatorias formada por Advanced LIGO y Advanced Virgo cuenta desde finales de la tercera campaña de observación, O3, con un nuevo instrumento, el interferómetro japonés KAGRA lo que, de nuevo, mejorará las posibilidades de localización de las fuentes y la significancia estadística del origen astrofísico de las detecciones. La campaña de observación O3 ha sido la más larga de las realizadas hasta la fecha. Inicialmente la misión iba a prolongarse durante 12 meses, incluyendo en este periodo un parón de un mes por mantenimiento de los instrumentos en octubre de 2019. O3 comenzó el 1 de abril de 2019 y finalizó unos días antes de la fecha originalmente prevista, el 30 de abril de

POR LA COLABORACIÓN LIGO-VIRGO-KAGRA

2020, a consecuencia de la pandemia global de COVID-19. El análisis de los datos recogidos durante los dos periodos de observación precedentes, O1 (desde el 12 de septiembre de 2015 hasta el 19 de enero de 2016) y O2 (desde el 30 de noviembre de 2016 hasta el 25 de agosto de 2017), produjo 11 señales (y 14 eventos marginales). Todas ellas, excepto GW170817, proceden de colisiones de agujeros negros en sistemas binarios. Durante la primera mitad de O3 (O3a; 1 de abril de 2019 a 1 de octubre de 2019) el número de detecciones anunciadas ha sido de 39. Todas ellas cumplen con el criterio de

un umbral de dos eventos de falsa alarma al año establecido por la colaboración para cada uno de los cuatro pipelines empleados en las búsquedas. El rápido crecimiento en el número de detecciones aparece ilustrado en la Figura 1 que muestra la cuenta acumulada de eventos desde el inicio de O1 hasta el final de O3a. Muy recientemente, la Colaboración LIGO-Virgo-KAGRA (LVK, por sus siglas en inglés) ha anunciado los resultados del estudio de los datos correspondientes a la segunda mitad de O3 (O3b; 1 de noviembre de 2019 a 27 de marzo de 2020), que incluye 35 nuevas detecciones.

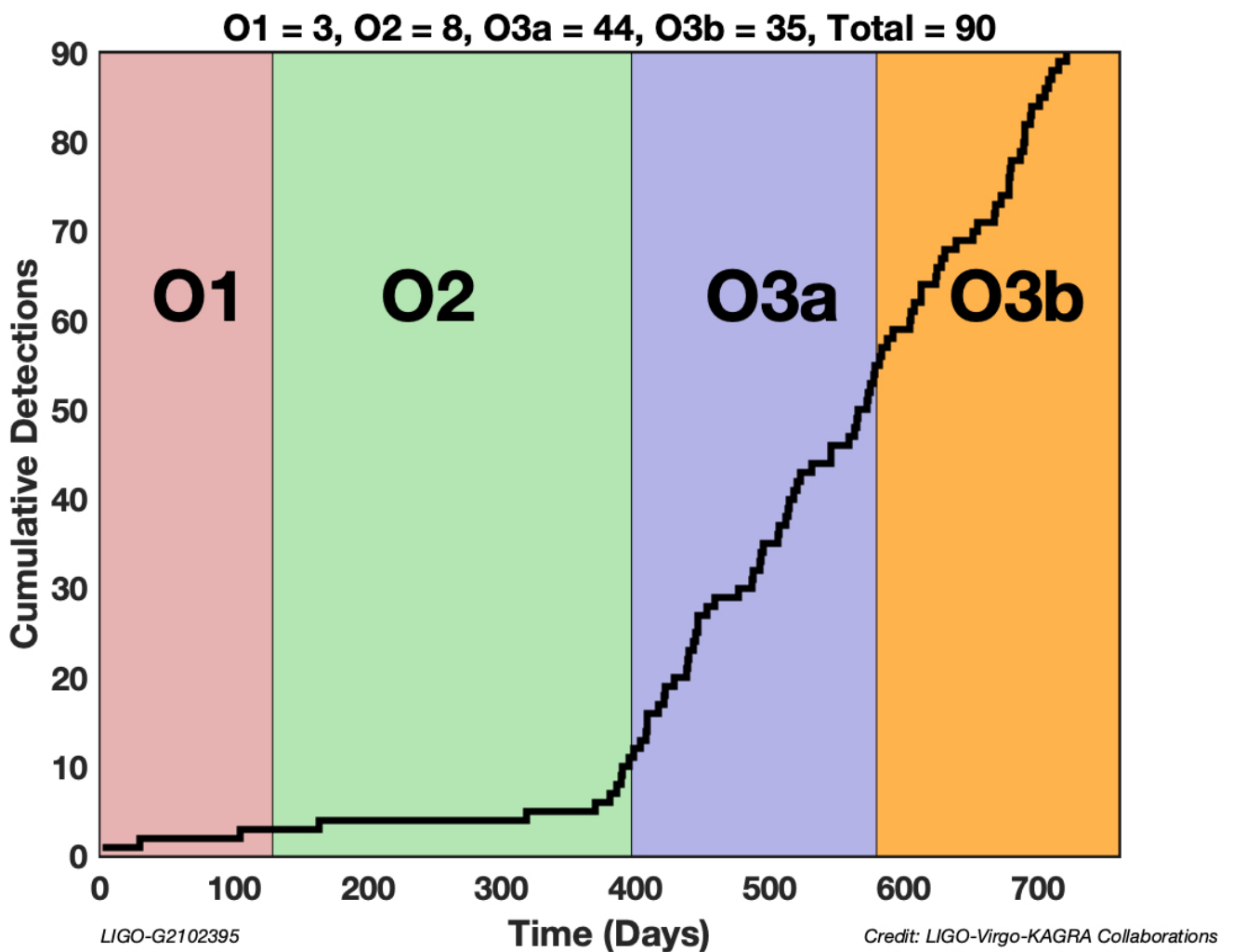


Figura 1: Número acumulado de ondas gravitacionales observadas por la Colaboración LIGO-Virgo-KAGRA desde O1 hasta O3. Crédito: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration.

Durante O3, la colaboración analizó todos los datos recibidos en tiempo real con objeto de detectar señales candidatas, localizar las fuentes y enviar alertas a la comunidad astronómica para iniciar búsquedas de contrapartidas empleando ondas electromagnéticas o detectores de neutrinos. Las [alertas de LIGO/Virgo](#) son públicas y se distribuyen a través de la Gamma-ray Coordinates Network (GCN) de la NASA. Además, la LVK ofrece una localización centralizada de todos los eventos candidatos de ondas gravitacionales en la base de datos [GraceDB](#) (Gravitational-Wave Candidate Event Database). Los datos de O1, O2 y O3 han sido ya hechos públicos por la colaboración a través de la web [Gravitational Wave Open Science Center](#), página que también recoge información para llevar a cabo análisis independientes de los datos, incluyendo documentación, tutoriales y software de apoyo. Los últimos datos, correspondientes a O3b, han sido publicados el 8 de noviembre de 2021.

Todas las observaciones anunciadas por la LVK se encuentran publicadas en 4 catálogos de ondas gravitatorias transitorias (GWTC por sus siglas en inglés), [GWTC-1](#), [GWTC-2](#), [GWTC-2.1](#), y [GWTC-3](#). El primero incluye las detecciones de O1 y O2, el segundo las de O3a, el tercero constituye un catálogo más "profundo" que GWTC-2 que recoge las detecciones realizadas durante O3a incluyendo triggers con menor umbral de significancia astrofísica. En concreto, el umbral utilizado en GWTC-2.1 es de tan solo dos eventos de falsa alarma al día, lo cual proporciona 1201 candidatos. De estos, hay 8 candidatos no incluidos en GWTC-2 con una probabilidad de ser de origen astrofísico (p_{astro}) superior a 0,5, todos ellos son potenciales candidatos a fusiones de binarias de agujeros negros. Finalmente, el catálogo GWTC-3 incluye las detecciones de O3b. La figura 2 muestra las masas de los eventos detectados por la colaboración y publicados en los diversos catálogos hasta GWTC-3. En total, la figura contiene 90 eventos que superan el umbral establecido por la colaboración para ser considerados de origen astrofísico. Las binarias de agujeros negros aparecen representadas en color azul y las binarias de estrellas de neutrones se ilustran en color naranja (los objetos en color amarillo y en color rojo corresponden, respectivamente, a estrellas de neutrones y agujeros negros en nuestra galaxia observados electromagnéticamente).

EVENTOS DE O3 (GWTC-2 Y GWTC-3) Y ANÁLISIS RELACIONADOS

GWTC-2 y GWTC-3 contienen tanto eventos identificados como colisiones de binarias de agujeros negros hasta redshifts de aproximadamente 0,8 (GWTC-2) y 0,9 (GWTC-3) así como binarias cuyas componentes secundarias no pueden ser identificadas sin ambigüedad ni como agujeros negros ni como estrellas de neutrones. En comparación con GWTC-1, el intervalo de masas de agujeros negros se extiende significativamente tanto hacia masas más pequeñas como más grandes, abarcando desde unas 7 masas solares (GW200115_042309, GWTC-3) hasta unas 150 masas solares (GW190521, GWTC-2). Además, por primera vez, en estos catálogos se incluyen sistemas binarios con cocientes de masas significativamente asimétricos (3:1 para GW190412, 9:1 para GW190814 y 26:1 para GW191219_163120). Los 39 eventos del catálogo GWTC-2 fueron observados en aproximadamente 26 semanas, lo que equivale a un ritmo de detecciones de aproximadamente 1,5 eventos a la semana, lo cual es consistente con lo obtenido en GWTC-1. El ritmo de detecciones de los eventos de GWTC-3 es similar.

Con los eventos de O3, la colaboración ha podido presentar datos actualizados de ritmos de sucesos, [estudios de poblaciones](#) y tests de Relatividad General. Así, por ejemplo, se pudo observar que el espectro de masas de la componente primaria de las binarias de agujeros negros es consistente tanto con una ley de potencias rota a 39,7 masas solares como con una ley de potencias con un pico gaussiano a unas 33,1 masas solares. Aunque la distribución de masas de la primaria se extiende hasta unas 65 masas solares, solo un 3% de sistemas tienen masas primarias superiores a 45 masas solares. Por otro lado, entre el 12% y el 44% de las binarias de agujeros negros tienen los espines individuales formando ángulos de más de 90 grados, lo que produce un espín efectivo negativo durante la fase de inspiral, lo que a su vez permite inferir que entre 25% y 93% de estos sistemas pueden haberse formado dinámicamente (pues las colisiones cuasi-circulares favorecen los espines alineados). Finalmente, los datos de GWTC-2 conducen a ritmos de colisiones de unos 24 eventos por año y por Gpc^3 para binarias de agujeros negros y de unos 320 eventos por año y por Gpc^3 para binarias de estrellas de neutrones.

Masses in the Stellar Graveyard

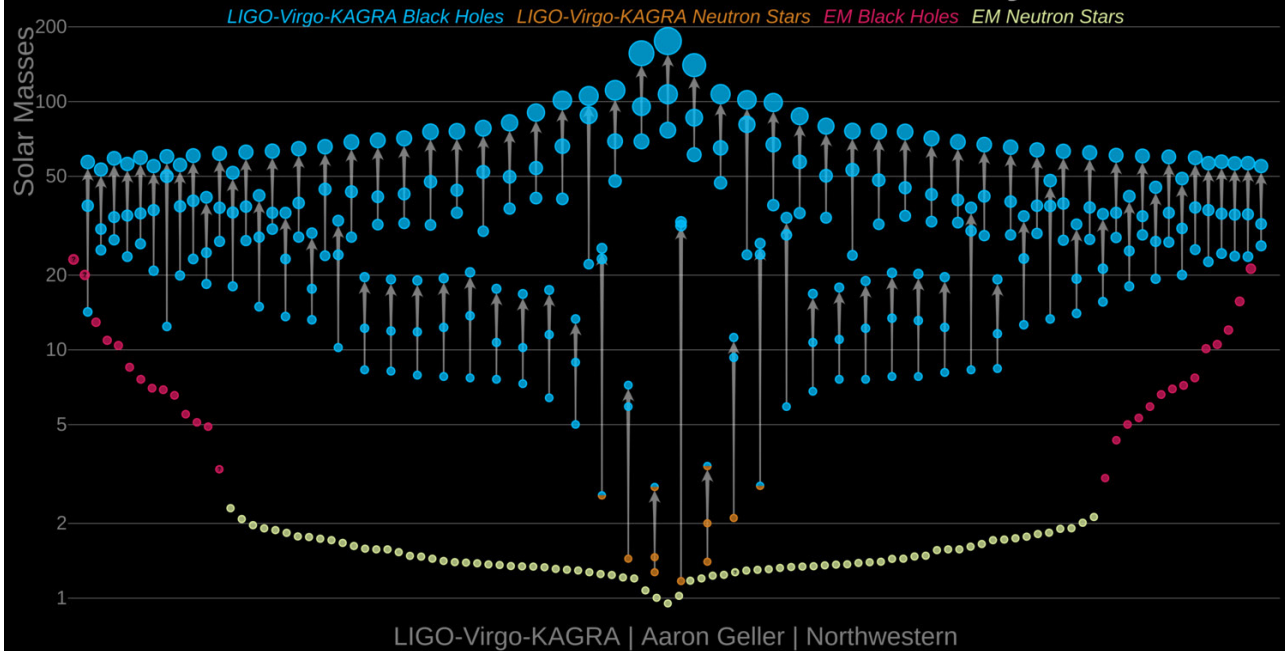


Figura 2: Masas de los eventos de origen astrofísico publicados desde GWTC-1 hasta GWTC-3. Crédito: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration, Aaron Geller, Northwestern University.

Para los primeros, el ritmo de sucesos parece aumentar con el redshift aunque no más rápidamente que el ritmo de formación estelar.

GWTC-2 y GWTC-3 también han sido utilizado por la LVK para llevar a cabo nuevos [tests de la Relatividad General](#), evaluando la consistencia de los datos con las predicciones de la teoría. En primer lugar, se comprobó que los residuos de las formas de onda teóricas que mejor ajustan las observaciones son consistentes con el nivel de ruido de los detectores. Se emplearon también modificaciones parametrizadas de las formas de onda, variando coeficientes post-newtonianos en señales analíticas y parámetros de señales fenomenológicas obtenidas numéricamente, mejorando resultados previos por un factor 2. Asimismo, se demostró que los objetos finales de las colisiones son consistentes con una interpretación basada en que estos sean agujeros negros de Kerr (solución exacta de las ecuaciones de la Relatividad General). En particular, esto se comprobó midiendo las frecuencias de los modos cuasi-normales de oscilación y los ritmos de decaimiento de las señales durante la fase ringdown. Se encontraron variaciones relativas de la frecuencia del

modo fundamental (cuadrupolo) y del primer armónico compatibles con cero, lo que favorece la conjetura de que los agujeros negros no tienen pelo. Además, la cota superior de la masa del gravitón obtenida en el análisis de los datos de GWTC-2 es $1.76 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$ al 90% de credibilidad. Finalmente, no se encontró evidencia de la posible existencia de ecos en las señales de la fase post-fusión, que pudieran indicar desviaciones a la solución de Kerr. Por lo tanto, los eventos compilados en GWTC-2 no muestran evidencia a favor de nueva física más allá de la Relatividad General o a favor de la existencia de imitadores de agujeros negros.

OTROS ESTUDIOS CON DATOS DE O3

Los datos adquiridos por Advanced LIGO y Advanced Virgo durante O3 han permitido llevar a cabo búsquedas de ondas gravitatorias producidas por sistemas astrofísicos distintos a coalescencias de binarias compactas. Este tipo de búsquedas se realiza de manera habitual por la colaboración LVK. En la mayoría de ocasiones, las búsquedas permiten poner nuevos límites superiores a diversas magnitudes físicas, actualizando los valores previos obtenidos en campañas de búsqueda similares.

«Los eventos compilados
en GWTC-2
no muestran evidencia
a favor de nueva física
más allá de la Relatividad
General o a favor de la
existencia de imitadores de
agujeros negros.»

Así, se han realizado búsquedas en todo el cielo de [señales continuas](#) producidas por estrellas de neutrones aisladas en nuestra galaxia, con rotación y con ligeras desviaciones de la simetría axial. Pese a que no se ha observado ninguna señal de este tipo, pudieron ponerse nuevos límites superiores a los valores obtenidos con los datos de O2. La mejora fue especialmente significativa en la región de las altas frecuencias (\sim kHz), debido en parte a la mejora en la sensibilidad de los detectores gracias a la implementación de técnicas de "quantum squeezing".

También se han llevado a cabo búsquedas de señales de tipo "burst", tanto de [corta](#) duración (<1 s) como de [larga](#) duración (>1 s), empleando los datos de O3 al completo. Asociadas a las primeras, se buscaron señales debidas a modos de oscilación de tipo f en estrellas de neutrones (que pueden excitarse cuando un púlsar sufre un glitch) y a supernovas de Tipo II/Ib/Ic (originadas por el colapso del núcleo estelar). Por lo que respecta a la segunda clase, se buscaron señales debidas a deformaciones no axisimétricas en magnetares o a coalescencias excéntricas de agujeros negros. En ambos casos, no se encontraron candidatos suficientemente significativos. En el contexto de señales "burst" también se hizo una [búsqueda adaptada a 105 GRBs observados por Fermi y Swift](#) durante O3a, sin encontrar correlaciones significativas en los datos.

Otras búsquedas habituales son fondos estocásticos de radiación gravitatoria, tanto [isótropos](#) como [anisótropos](#), y estos también se han realizado con los datos de O3. De nuevo, no se han encontrado evidencias significativas. O3 también se ha utilizado para constreñir la posible existencia de [cuerdas cósmicas](#) (hipotéticos defectos topológicos que pudieron producirse durante transiciones de fase en el universo primitivo), obteniéndose el valor más competitivo hasta la fecha de la tensión de tales cuerdas cósmicas. Además, también en el ámbito de lo hipotético, los datos se han analizado para constreñir la existencia de [fotones oscuros](#) (bosones de gauge de espín 1) a través del análisis de posibles acoplamientos con los interferómetros. Aunque no se ha encontrado evidencia de su existencia, las restricciones proporcionadas por la colaboración LVK mejoran en dos órdenes de magnitud los límites previos obtenidos en los experimentos de detección de materia oscura MICROSCOPE y Eöt-Wash.

Finalmente, por lo que respecta a coalescencias de binarias compactas, se han buscado posibles improntas de [efecto lente gravitacional](#) en las observaciones de GWTC-2, sin encontrar evidencias convincentes. Además, también se han buscado [agujeros negros de masa intermedia](#) (empleando los datos de O3 al completo) y [agujeros negros de masa subsolar](#). Para los primeros, el aumento de la sensibilidad de la red de detectores durante O3 permitió la detección de GW190512, lo que ha proporcionado la primera evidencia de la formación de agujeros negros de masa intermedia. Las búsquedas dedicadas en los datos de O3, tanto modeladas (empleando patrones de señales como filtros) como no modeladas, proporcionaron algunos candidatos marginales no suficientemente significativos. En el otro extremo de masas, las búsquedas de agujeros negros de masa subsolar (entre 0,2 y 1 masas solares) tampoco han conducido a nuevas detecciones aunque han servido para poner restricciones astrofísicas a posibles fuentes en ese rango, como los agujeros negros primordiales y modelos de materia oscura disipativa.

NUEVOS DESCUBRIMIENTOS DURANTE O3

A continuación, pasamos a discutir los nuevos descubrimientos incluidos en GWTC-2 y GWTC-3 de manera individualizada:

GW190412

La mayoría de fusiones de agujeros negros detectadas desde el inicio de las campañas observacionales de los interferómetros avanzados, se asocian a sistemas binarios con componentes de igual masa. Este balance entre las masas se rompió con la observación de GW190412, apenas transcurridos 12 días del comienzo de O3. En esta señal, la componente primaria es más de 3 veces más masiva que la secundaria. Concretamente, los agujeros negros fusionados tenían alrededor de 30 y 8 masas solares, respectivamente. La importancia de esta detección radica en el hecho de que el desequilibrio entre las masas produce una intensidad inusualmente alta de la radiación gravitatoria en los llamados "modos de alto orden". Estos modos son, en general, subdominantes, pues la mayor parte de la emisión gravitacional se produce en el modo cuadrupolar dominante (asociado con variaciones temporales del cuadrupolo de masa del sistema). La aparición de modos subdominantes en GW190412 proporciona otra confirmación más de la validez de la teoría de la Relatividad General de Einstein.

GW190425

Tras GW170817, esta es la segunda observación de una onda gravitacional consistente con la fusión de un sistema binario de estrellas de neutrones, con masas individuales estimadas entre 1,12 y 2,52 masas solares (intervalo de credibilidad del 90%). Sin embargo, la posibilidad de que una o las dos componentes del sistema binario sean agujeros negros no puede descartarse utilizando únicamente datos gravitacionales. La fuente de GW190425 está a una distancia de 500 millones de años-luz de la Tierra y está localizada en el cielo en un área unas 300 veces mayor que la proporcionada para GW170817, pues solo fue observada por LIGO-Livingston (aunque los datos de Virgo se utilizaron para la inferencia de parámetros). Pese a tratarse de una fusión de estrellas de neutrones, no se ha encontrado contrapartida electromagnética, aunque simulaciones de relatividad numérica de este sistema indican la formación rápida de un agujero negro tras la fusión, lo que podría explicar la ausencia de emisión electromagnética. La masa total estimada del sistema binario que produjo GW190425 es 3,4 veces la masa del Sol. Esto lo convierte en un sistema considerablemente más masivo que las binarias de estrellas de neutrones conocidas en nuestra galaxia, cuya masa total está entre 2,5 y 2,9 veces la masa del Sol. Esto parece indicar que el sistema de estrellas de neutrones que originó GW190425 pudo formarse de manera distinta a los sistemas galácticos conocidos.

GW190521

Esta señal fue debida a la fusión de dos agujeros negros de 66 y 85 masas solares. Tanto la componente primaria del sistema binario como el agujero negro remanente, de unas 142 masas solares, se sitúan en un rango de masas no observado previamente, ni a través de ondas gravitacionales ni con observaciones electromagnéticas. El agujero negro final es el más masivo jamás detectado con ondas gravitacionales y pertenece a la clase de los llamados agujeros negros de masa intermedia (desde unas 100 hasta unas 100.000 masas solares). Debido a la elevada masa del sistema, la señal es muy breve, de unos 0.1 s, y, además no tiene la típica forma de "chirp" en la fase previa a la fusión sino que más bien se asemeja a una señal tipo "burst". Esto hace que la interpretación de la fuente sea mucho más complicada que en todos los otros eventos detectados por LIGO y Virgo.



Figura 3: Fotografías aéreas de LIGO Hanford (arriba a la izquierda), KAGRA (arriba a la derecha -ilustración), Virgo (abajo a la izquierda) y LIGO Livingston (abajo a la derecha). Crédito: ICRR, Univ. de Tokio / LIGO Lab / Caltech / MIT / Virgo Collaboration.

La detección de GW190521 subraya la existencia de poblaciones de agujeros negros que no habían sido observadas o que son inesperadas, lo que plantea nuevas preguntas sobre los mecanismos de formación. En particular, la masa de la componente primaria de GW190521 desafía los modelos astrofísicos que describen el colapso de estrellas muy masivas al final de sus vidas. Según estos modelos, tales estrellas se desestabilizan completamente en las explosiones de supernova, debido a un proceso llamado "inestabilidad de pares". En consecuencia, esta detección podría obligar a revisar nuestra comprensión actual de las etapas finales de la evolución estelar y las restricciones sobre la masa final en los procesos de formación de agujeros negros. Otra posibilidad para explicar la masa del agujero

negro primario es que sea el resultado de la fusión de agujeros negros más ligeros en un proceso de captura dinámica en un cúmulo globular denso.

Debemos también indicar que la componente primaria de dos de las fusiones de agujeros negros con $p_{\text{astro}} > 0,5$ publicadas en el catálogo "profundo" GWTC-2.1, concretamente GW190403_051519 y GW190426_190642, se encuentra en ambos casos dentro del hueco de masas predicho por la inestabilidad de pares de la teoría de supernovas. La masa del agujero negro resultante es, respectivamente, 100 y 184 masas solares, por lo que ambos sistemas se encontrarían dentro de la clase de los agujeros negros de masa intermedia, al igual que GW190521.

GW190814

Esta señal fue producida como resultado de la fusión de un agujero negro de 23 masas solares con un objeto compacto de aproximadamente 2,6 masas solares. El desequilibrio entre las masas de las dos componentes, de alrededor de un factor 9, la convierte en la fusión de un sistema binario con las masas más desiguales de todas las observadas, superando ampliamente a GW190412. Como en GW190412, la señal GW190814 permitió inferir la presencia en la emisión de multipolos de orden superior al cuadrupolo, lo cual proporcionó de nuevo estrictas verificaciones de la Relatividad General. Además, los múltipolos de orden superior permiten separar la degeneración existente entre la distancia a la fuente y el ángulo de inclinación del plano de la órbita del sistema binario con respecto a la visual.

La naturaleza de la componente secundaria de GW190814 es un misterio, al encontrarse dentro del denominado "hueco en la distribución de masas", un intervalo que parece existir entre 2,5 y 5 masas solares en el que no se han observado objetos compactos. De este modo, la componente secundaria de GW190814 podría tanto ser el agujero negro más ligero o la estrella de neutrones más masiva jamás observados.

De todas las detecciones, GW190814 es la señal con mejor localización en el cielo, con una incertidumbre de apenas unos 19 grados cuadrados. Esto permitió que muchos telescopios terrestres y espaciales hicieran un seguimiento en busca de luz y otras señales electromagnéticas, pero, a diferencia de GW170817, no se detectaron contrapartidas. Hay varias razones probables para explicar esto: En primer lugar, GW190814 estaba unas seis veces más lejos (800 millones de años luz) que GW170817 (130 millones de años luz), lo que dificulta la detección de cualquier señal electromagnética. En segundo lugar, si la colisión implicó dos agujeros negros, probablemente no hubo ninguna emisión electromagnética. Finalmente, si la secundaria se trataba de una estrella de neutrones, esta podría haber sido capturada entera por el agujero negro al ser este 9 veces más masivo, en cuyo caso tampoco debería haberse producido emisión electromagnética.

GW200105 y GW200115

Los eventos GW200105 y GW200115 pertenecen a la segunda mitad de O3 (O3b). Estos dos eventos, representan las primeras observaciones de ondas

gravitacionales generadas por la coalescencia de una estrella de neutrones y un agujero negro. La existencia de estos sistemas binarios mixtos fue predicha por la comunidad astronómica hace varias décadas, pero nunca habían sido observadas con seguridad, electromagnética o gravitacionalmente. Dos eventos anteriores, GW190814 y GW190426, han sido considerados candidatas a tal tipo de sistemas, pero sin un nivel de confianza suficientemente elevado. Las masas del agujero negro y la estrella de neutrones que originaron GW200105 son, respectivamente, 8,9 y 1,9 masas solares y su distancia luminosidad es de 280 Mpc. Para GW200115, las correspondientes masas son unas 5,7 y 1,5 masas solares y su distancia luminosidad es de 300 Mpc. Las predicciones teóricas indican que cuando las masas de los dos objetos compactos son comparables, la estrella de neutrones se fragmenta debido a las fuerzas de marea del agujero negro. Esta desintegración produciría emisión electromagnética de alta energía. Este proceso probablemente no sucedió ni para GW200105 ni para GW200115, ya que en ambos casos la masa del agujero negro es significativamente mayor a la de la estrella de neutrones, por lo que esta fue capturada sin sufrir desintegración previa. Esta dinámica podría explicar la ausencia de contrapartida electromagnética en ambos eventos, aunque la incertidumbre en la localización es elevada para los dos, 7200 grados² para GW200105 y 600 grados² para GW200115.

PAPEL DE LOS GRUPOS ESPAÑOLES DURANTE O3

Seis grupos españoles contribuyen al estudio y análisis de las ondas gravitatorias detectadas dentro de la colaboración LVK: Dos grupos, en la Universidad de las Illes Balears (UIB) y el Instituto Galego de Física de Altas Enerxías (IGFAE) forman parte de la Colaboración científica LIGO; mientras que la Universitat de València (UV), el Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona (ICCUB), el Institut de Física d'Altes Energies (IFAE) de Barcelona y el Instituto de Física Teórica (IFT) de la Universidad Autónoma de Madrid-CSIC son miembros de Virgo.

En preparación para O3, los grupos españoles han jugado un papel significativo en las tareas de puesta a punto de los interferómetros y los estudios de ruido con el fin de alcanzar la sensibilidad deseada. Durante O3, científicos de los grupos nacionales han participado en los equipos editoriales de diversas publicaciones de la

LVK, analizando datos, o realizando tareas de revisión interna de métodos, resultados y artículos. Los datos tomados durante O3 continúan siendo analizados por la LVK, y los grupos españoles continúan involucrados en estas actividades. Una parte del análisis que resulta particularmente costosa computacionalmente es la estimación de parámetros con métodos bayesianos. La estimación de las masas, los espines y la ubicación en el cielo se basa en la comparación de los datos del detector con modelos teóricos de formas de onda. Para el descubrimiento de las dos primeras coalescencias de estrellas de neutrones y agujeros negros, GW200105 y GW200115, así como para algunos eventos de GWTC-3, el análisis ha sido realizado por el grupo de la UIB en el superordenador Mare Nostrum del Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona. Así mismo, el PIC, Port d'Informació Científica de IFAE, ha contribuido significativamente al procesamiento de los datos de los experimentos. Además, uno de los dos modelos utilizados en la inferencia de todos los eventos incluidos en el catálogo GWTC-3 ha sido un modelo computacionalmente eficiente desarrollado en la UIB. Miembros de los grupos españoles también han escrito varios artículos complementarios a los resultados de la LVK, analizando GW190412 y GW190521 con nuevos métodos o [hipótesis astrofísicas](#), estableciendo límites a [nuevos modelos cosmológicos](#), o [reinterpretando las búsquedas de señales estocásticas](#) en términos de límites a modelos de nueva física en el universo temprano a altas temperaturas.

04 y 05

En estos momentos, los detectores se encuentran en fase de incorporación de nueva instrumentación y mejoras, con objeto de aumentar su sensibilidad para la campaña de observación O4 y para finalmente alcanzar la sensibilidad nominal de diseño en O5. Por primera vez, un grupo español (IFAE) hace una contribución significativa al detector Advanced Virgo en la forma de [nuevos deflectores instrumentados](#) que mejorarán el buen funcionamiento del interferómetro. Un primer deflector fue instalado en primavera de 2021 alrededor de uno de los espejos del experimento, y nuevos sistemas serán instalados para instrumentar los espejos principales a tiempo para O5.

La Colaboración LVK continúa evaluando y respondiendo a los impactos continuos del COVID-19 en los preparativos para O4, cuya fecha de inicio ha sido

anunciada para finales de 2022. Durante O4, se espera que Advanced LIGO tenga la sensibilidad suficiente para detectar fusiones de binarias de estrellas de neutrones hasta distancias de entre 160 y 190 Mpc y Advanced Virgo hasta distancias de entre 90 y 120 Mpc. Por su parte, el detector japonés KAGRA, también participará en la campaña O4 aunque, probablemente, con una sensibilidad inferior a la inicialmente estimada (25-130 Mpc). Para O5, de alcanzarse la sensibilidad de diseño, se podrían observar colisiones de binarias de estrellas de neutrones hasta distancias máximas de unos 330 Mpc (Advanced LIGO), 260 Mpc (Advanced Virgo) y superiores a 130 Mpc (KAGRA). Además, es posible que durante parte de O5, el detector LIGO-India se una a la red de observatorios, con las mismas capacidades observacionales que Advanced LIGO. Debemos también indicar que la colaboración mantiene actualizado [un artículo de revisión](#) con estudios prospectivos para la observación y localización de señales gravitacionales transitorias en las próximas campañas de observación. Además, la hoja de ruta para el futuro de la investigación en ondas gravitacionales ha sido recientemente discutida en un artículo en [Nature Reviews Physics](#), en el que puede encontrarse información sobre la evolución de este campo de investigación durante las próximas dos décadas.

DETECTORES DE TERCERA GENERACIÓN: IMPLICACIÓN ESPAÑOLA EN EL EINSTEIN TELESCOPE

Tras el éxito de LIGO y Virgo, la comunidad internacional de ondas gravitacionales trabaja en la definición de la así llamada tercera generación de detectores, de cara a las próximas décadas, con los proyectos Cosmic Explorer y Einstein Telescope (ET). En particular, el proyecto ET (ver figura 4) ha sido recientemente incluido en la hoja de ruta del Foro Estratégico Europeo de Infraestructuras de Investigación (ESFRI, por sus siglas en inglés) y ha iniciado su fase de preparación. ET tendrá la sensibilidad de observar ondas gravitacionales en todo el universo y en un amplio espectro de frecuencias, llevando el campo de estudio de las ondas gravitacionales al régimen de la física de precisión. Los grupos españoles han jugado un papel significativo en el desarrollo del caso científico de ET desde sus inicios. Recientemente, España ha intensificado su presencia en ET, e IFAE coordinará, a nivel europeo, los trabajos preparatorios para establecer los pilares de la gobernanza y organización del experimento y su diseño final en los próximos años.

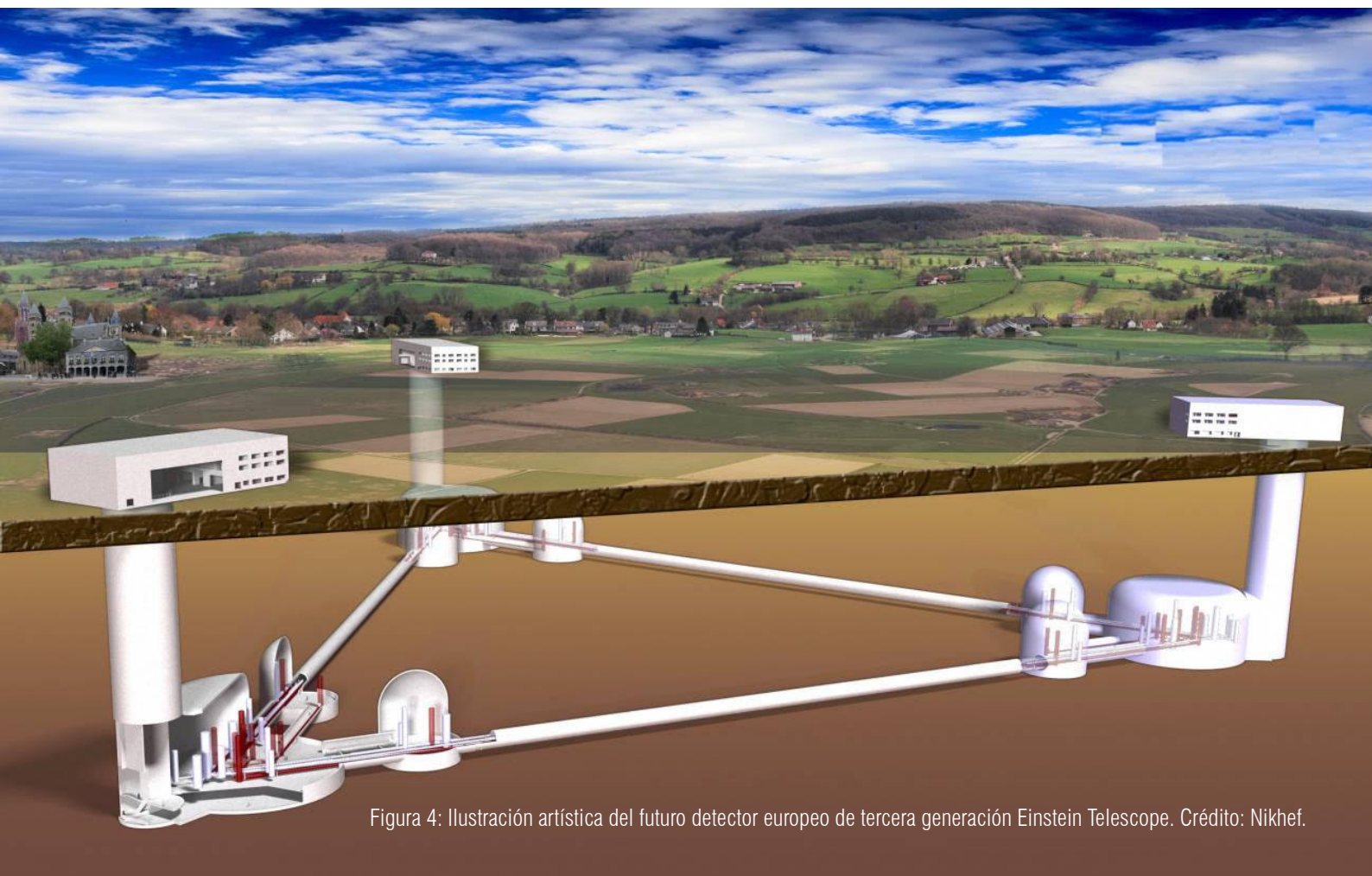


Figura 4: Ilustración artística del futuro detector europeo de tercera generación Einstein Telescope. Crédito: Nikhef.