

EL NACIMIENTO DE LA ASTRONOMÍA DE ONDAS GRAVITACIONALES

Alicia M. Sintés Olives

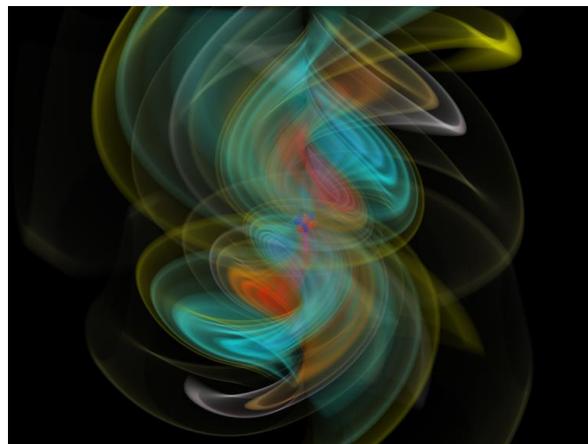
Profesora Titular de Física Teórica e Investigadora Principal de la Colaboración Científica LIGO en la Universidad de las Islas Baleares

RESUMEN

Los últimos tres años han sido testigos del nacimiento de la astronomía de ondas gravitacionales. Esta nueva era de la astronomía empezó de repente en septiembre de 2015 con la primera detección de una fusión de binarias de agujeros negros situados a 1.300 millones de años luz de distancia. Este descubrimiento causó un revuelo en la comunidad científica, no solo porque confirmaba una importante predicción de la teoría de la relatividad general de Albert Einstein de 1915, sino también por el impacto en el campo de la astronomía de este evento cósmico nunca antes observado. La importancia de este hallazgo dio pie a la concesión de los más prestigiosos premios científicos, incluido el Premio Nobel en Física en 2017. Otro descubrimiento más reciente, el de una fusión de un sistema binario de estrellas de neutrones, detectada conjuntamente por los detectores LIGO y Virgo, seguido de una explosión de rayos gamma y una kilonova, han reforzado la emoción de esta nueva era, en la que pronto esperamos ver otro tipo de fuentes y hacer astronomía de alta precisión.

1. INTRODUCCIÓN

Hay dos tipos de ondas que nos llevan información sobre el Universo: las ondas electromagnéticas y las gravitacionales. Viajan a la misma velocidad pero, aparte de eso, no podrían ser más distintas. Las ondas gravitacionales -ondulaciones en el propio tejido del *espacio-tiempo* producidas por materia acelerada- son ahora las nuevas mensajeras que nos permitirán abrir una nueva ventana al cosmos que podría revolucionar la comprensión del Universo en que vivimos.



Simulación numérica de la fusión de una binaria de agujeros negros, componentes tridimensionales de la curvatura del espacio-tiempo. Simulación de Sascha Husa y visualización de Rafel Jaume, ambos de la Universidad de les Illes Balears.

Se dice que Galileo Galilei inauguró la astronomía electromagnética hace unos cuatrocientos años, cuando construyó un pequeño telescopio óptico, lo dirigió hacia el cielo y descubrió las cuatro

lunas más grandes de Júpiter. Galileo hizo su descubrimiento solo, aunque construía sobre ideas y tecnología de otros. En cambio, la mejora en sensibilidad que posibilitó los recientes logros de las colaboraciones científicas LIGO (LSC) y Virgo fue el resultado de muchas décadas de trabajo, de más de mil científicos e ingenieros, todos ellos coordinados internacionalmente, y gracias a la complicidad de las agencias de financiación de varios países que hacen apuestas valientes para avanzar en la frontera del conocimiento.

2. LOS DETECTORES TERRESTRES

Los detectores terrestres de ondas gravitacionales, interferómetros tipo Michelson, son los instrumentos ópticos más grandes y sofisticados del mundo. Estos constituyen la regla más precisa jamás realizada por el hombre, capaces de detectar cambios de distancia de escalas sub-nucleares, en el rango de frecuencia de algunas decenas de Hz a varios kHz. Debido a este rango de frecuencia, son sensibles a eventos tipo supernovas, estallidos de rayos gamma, estrellas de neutrones en rotación, u objetos compactos como fusiones de sistemas binarios compactos, lo suficientemente pequeños (~10 km), capaces de alcanzar altas frecuencias orbitales.



Vista aérea de las instalaciones de LIGO en Hanford. La fotografía muestra los dos brazos del interferómetro, de cuatro kilómetros de longitud. Crédito: Caltech/MIT/LIGO Laboratory.

LIGO consta de dos detectores idénticos, uno en el estado de Luisiana y el otro en el estado de Washington, en los Estados Unidos, con brazos dispuestos en forma de L de cuatro kilómetros de longitud y separados por una distancia de 3000 kilómetros. Virgo, de tres kilómetros de longitud, se encuentra en Italia, concretamente en Cascina, cerca de Pisa. Estos tres detectores fueron diseñados en los años 90, construidos alrededor del año 2000 y manejados durante la siguiente década en su configuración inicial –junto con el detector GEO600, localizado en Alemania.

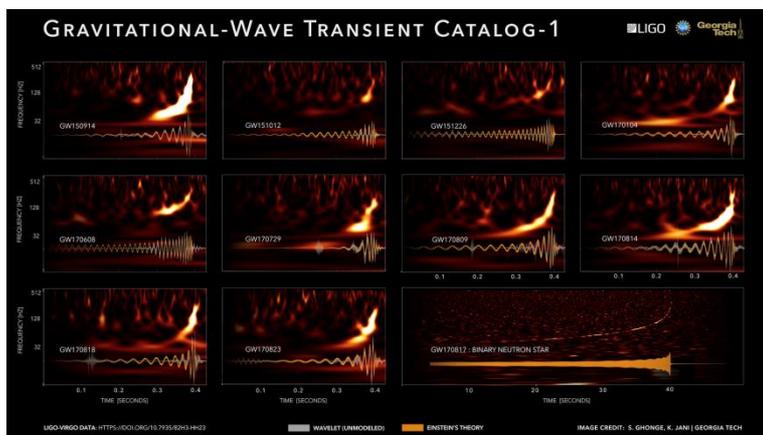


Vista aérea de las instalaciones de LIGO en Livingston. Crédito: Caltech/MIT/LIGO Laboratory.

LIGO está financiado por la NSF y operado por Caltech y MIT, que concibieron LIGO y condujeron a los proyectos de LIGO inicial y avanzado. El apoyo económico para el proyecto LIGO avanzado fue liderado por la NSF junto con Alemania (Sociedad Max Planck), el Reino Unido (Science and Technology Facilities Council) y Australia (Consejo OzGrav australiano de Investigación). Casi 1300 científicos de todo el mundo, incluido España, participan en el esfuerzo conjunto a través de la Colaboración Científica LIGO, que incluye a la Colaboración GEO. La Colaboración Virgo está compuesta actualmente por unos 350 científicos de Bélgica, Francia, Alemania, Hungría, Italia, los Países Bajos, Polonia y España. El Observatorio Europeo Gravitacional (EGO, por sus siglas en inglés) acoge al detector Virgo cerca de Pisa en Italia, y ha sido fundado por el Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) en Francia, el Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) en Italia, y Nikhef en los Países Bajos.

3. LAS PRIMERAS OBSERVACIONES DE LA RED DE DETECTORES AVANZADOS

Estos detectores y todos sus componentes –desde los espejos y el sistema de vacío hasta los fotodiodos que detectan el haz láser- han sido mejorados para incrementar su sensibilidad en un factor 10 aproximadamente. El programa de mejora en LIGO empezó en 2010 y un año después en Virgo. Los detectores LIGO, en su configuración avanzada, tomaron datos entre septiembre de 2015 y enero de 2016 en su primer ciclo de observación (llamado O1) y entre el 30 de noviembre de 2016 y 25 de agosto de 2017 (O2). Virgo se unió a O2 el 1 de agosto de 2017 y ello permitió no solo una mejor localización de las fuentes, sino que también redujo la posibilidad de que las señales detectadas fuesen un ruido local. Con estos dos primeros periodos de funcionamiento, la red de detectores LIGO-Virgo ha confirmado la detección de diez fusiones de agujeros negros y un choque explosivo de dos estrellas de neutrones.



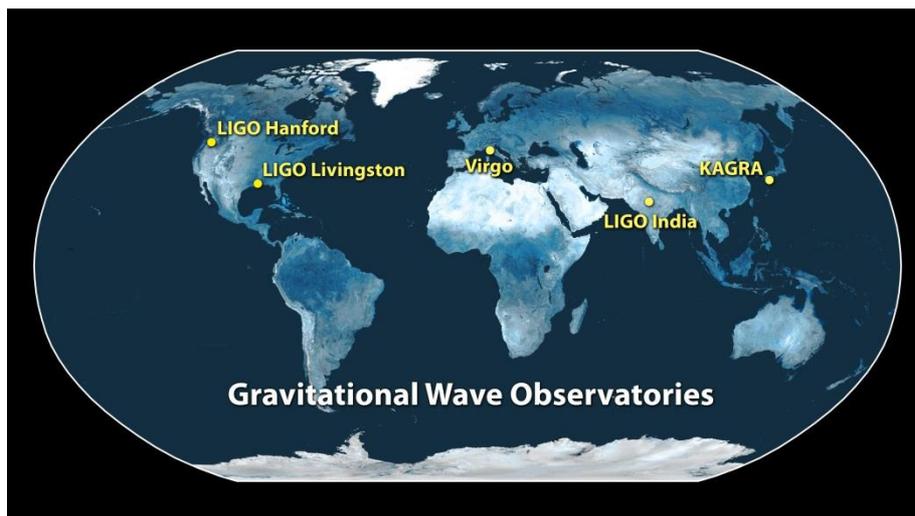
Espectrogramas y formas de onda para el primer catálogo de ondas gravitacionales transitorias detectadas en los dos primeros ciclos de funcionamiento de LIGO y Virgo avanzados. Crédito: LIGO/Virgo/Georgia Tech/S. Ghonge & K. Jani.

Durante estos primeros ciclos de funcionamiento los detectores avanzados no tenían la sensibilidad de diseño completa. Durante O1, para fusiones de binarias de estrellas de neutrones (BNS- “Binary Neutron Stars”) LIGO alcanzó un rango de 60-80Mpc, y su sensibilidad permitió confirmar las primeras detecciones de binarias de agujeros negros: GW150914, GW151012 y GW151226. Durante O2, la sensibilidad alcanzada durante este ciclo para BNS por LIGO fue del orden de 60 a 100 Mpc, ligeramente superior a O1, y nuevas señales procedentes de fusiones de agujeros negros fueron detectadas, junto con la primera observación de una fusión de binarias de neutrones: GW170817.

Las observaciones de fusiones de agujeros negros nos han dado acceso directo a las propiedades del espacio-tiempo en un régimen de campo gravitatorio fuerte y de alta velocidad –dado que los agujeros negros, antes de la fusión, iban a velocidades superiores a la mitad de la de la luz–, a descubrir toda una población de agujeros negros de masas estelares superiores a veinte veces la masa de nuestro Sol, y nos ha aportado información de cómo se forman estos sistemas. Si comparamos las

masas de los agujeros negros antes y después de la fusión, vemos que la coalescencia convierte el equivalente a varias veces la masa del Sol en radiación gravitacional, la mayoría emitida en una fracción de segundo. De hecho, en cada fusión el pico de energía liberada es superior a la luminosidad combinada (es decir, el ritmo al que la energía es liberada en forma de luz) de todas las galaxias del Universo observable. En contraste, el Sol emite el equivalente a cuatro mil millones de kilogramos de radiación electromagnética cada segundo.

Mención especial requiere el evento detectado el 17 de agosto de 2017, cuando se captaron de forma simultánea ondas gravitacionales y electromagnéticas de una misma fuente. En menos de dos segundos tras la señal GW170817 detectada por LIGO, el satélite Fermi de la NASA observó una explosión de rayos gamma, conocida como GRB170817A. En los minutos siguientes, telescopios alrededor del mundo empezaron una extensa campaña de observación que duró varias semanas. El telescopio Swope en Chile fue el primero en informar acerca de una fuente óptica brillante (SSS17a) en la galaxia NGC 4993, que fue confirmada por otros grupos de forma independiente. Esta observación conjunta sustenta la hipótesis de que la fuente fue una fusión de dos estrellas de neutrones. Además, ha permitido la identificación de la galaxia huésped y determinar, de forma novedosa y completamente independiente, el ritmo actual de expansión del Universo, la constante de Hubble. Este evento mostró la importancia de las observaciones conjuntas de ondas gravitacionales, electromagnéticas y neutrinos, y marcó el inicio de una nueva era en la astronomía multimensajera y la cosmología con ondas gravitacionales.



Red internacional de observatorios de ondas gravitacionales. Crédito: Caltech/MIT/LIGO Lab

Desde agosto de 2017, las dos colaboraciones estuvieron trabajando intensamente en sus interferómetros para mejorar la sensibilidad y fiabilidad. Esto incluyó diversas mejoras, incluida una mayor mitigación de los ruidos técnicos, el aumento de la potencia de los láseres y la instalación de una fuente de vacío comprimida, conocida como “squeezing”, gracias a una colaboración con el Instituto Albert Einstein de Hannover y el detector GEO600. Virgo reemplazó los cables de acero de los que suspendían los espejos principales del interferómetro por fibras de silicio fundidas, un procedimiento que ha permitido incrementar la sensibilidad en la región de frecuencias bajas y medias, y que ha tenido un impacto dramático en las capacidades de detección de fusiones de sistemas binarios de objetos compactos, y en LIGO se han reemplazado varios espejos por versiones con mejor rendimiento. Con estas mejoras se espera que LIGO tenga un rango BNS de 120–170 Mpc y que Virgo mejore su alcance hasta los 65–85 Mpc durante el 2019.

KAGRA, el detector japonés ubicado en la mina de Kamioka, entró en operación por primera vez con una configuración simple en marzo de 2016. Después de varias actualizaciones operó con su configuración de diseño, pero a temperatura ambiente, a finales de 2018. Ahora, el detector se enfriará

criogénicamente para reducir el ruido térmico. Las primeras observaciones criogénicas pueden tener lugar en 2019-2020 con un rango de BNS de 8-25 Mpc.

4. EL NUEVO PERIODO DE OBSERVACIÓN

La caza de nuevas ondas gravitacionales se ha reanudado muy recientemente, el 1 de abril de 2019. Durante este nuevo período de observación (O3), que durará un año, la colaboración LIGO-Virgo registrará datos científicos de manera continua. Los tres detectores operarán como un observatorio global y al que se unirá el detector KAGRA a finales de 2019. Gracias a las nuevas mejoras, se espera que las detecciones de señales procedentes de la fusión de agujeros negros sean muy comunes, hasta una por semana. Los científicos también esperan observar quizás hasta decenas de fusiones de estrellas de neutrones, como GW170817, que abrió la era de la astronomía de multi-mensajeros. Las observaciones de muchas señales, que se espera tengan lugar durante O3, proporcionarán un censo de la población de remanentes de masa estelar y una mejor comprensión del universo violento.”

Durante O3, la red global LIGO-Virgo notificará en cuestión de minutos a la comunidad astrofísica la observación de candidatos potenciales de ondas gravitacionales a través del sistema de alertas públicas. Esto permitirá hacer un seguimiento de las señales de ondas gravitacionales con búsquedas electromagnéticas y de neutrinos, conduciendo por tanto a descubrimientos en astronomía de multi-mensajeros.

Se espera que el resultado científico de O3 sea revolucionario, y potencialmente revelará nuevas señales emocionantes procedentes de nuevas fuentes tales como la fusión de sistemas binarios compuestos por un agujero negro y una estrella de neutrones. O3 tendrá asimismo como objetivo las ondas gravitacionales de larga duración, producidas por ejemplo por estrellas de neutrones girando de manera no simétrica con respecto a su eje de rotación. Sin embargo, la detección de tales señales, así como las de aquellas procedentes de explosiones supernova producidas tras el colapso de núcleos estelares y otras fuentes, es todavía un desafío enorme y la colaboración LIGO-Virgo está trabajando para conseguir este objetivo.

5. LA PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA

Cinco grupos en España están contribuyendo a la astronomía de ondas gravitacionales de LIGO-Virgo, en áreas que van desde el modelado teórico de las fuentes astrofísicas hasta la mejora de la sensibilidad del detector para los períodos de observación actuales y futuros. Dos grupos, en la Universidad de les Illes Balears (UIB) y el IGFAE-Universidad de Santiago de Compostela, forman parte de la Colaboración Científica LIGO, mientras que la Universidad de València (UV), el ICCUB y el IFAE de Barcelona son miembros de Virgo.

Después de los maravillosos descubrimientos que trajeron los dos primeros períodos de observación, los grupos LIGO-Virgo españoles están participando activamente en O3. Las mejoras significativas en la sensibilidad y los grandes avances tecnológicos logrados en los tres detectores por parte de los equipos de puesta en marcha desde O2 han sido absolutamente notables. Sus esfuerzos pronto se verán recompensados con otra esperada e importante ola de nuevos y emocionantes descubrimientos, que impulsará aún más el campo emergente de la astrofísica de multimensajeros.

El grupo de física gravitacional en la UIB está siguiendo un amplio programa científico para estudiar las ondas gravitacionales emitidas por agujeros negros y estrellas de neutrones, además de tener responsabilidades significativas dentro de la colaboración LIGO y GEO, y de contribuir también a la futura misión espacial LISA o al detector Europeo Einstein-Telescope. El equipo continua liderando varias búsquedas prioritarias de señales de ondas continuas provenientes de estrellas de neutrones desconocidas, así como las señales transitorias emitidas después de la fusión de dos estrellas

de neutrones. Los modelos de la señal de onda gravitacional provenientes de la fusión de agujeros negros son una parte esencial del proceso de análisis de datos, y la UIB participa en el desarrollo de uno de los dos modelos clave utilizados hasta ahora. Después de aproximadamente tres años de desarrollar una descripción mejorada y más precisa de la fusión de los agujeros negros, el grupo UIB está ansioso por probar el valor del modelo al hacer nuevos descubrimientos. Además, un estudiante de doctorado del grupo, Pep Covas, está haciendo una estancia de tres meses en LIGO Hanford, y contribuye directamente a operar el detector durante este emocionante tiempo.

El grupo de Ondas Gravitacionales IGFAE en la Universidad de Santiago de Compostela es el miembro más ‘joven’ de la Colaboración LIGO en España. El grupo tiene una gran experiencia en los métodos de análisis para detectar señales de ondas gravitacionales procedentes de la fusión de sistemas binarios de agujeros negros y estrellas de neutrones. IGFAE-GW está actualmente trabajando en la actualización de los canales de detección de este tipo de eventos por medio del software PyCBC con el objetivo de maximizar el alcance de las búsquedas de binarias en la nueva toma de datos. El grupo está también involucrado en la deducción de información referente a las poblaciones de fuentes de ondas gravitacionales, incluyendo los indicios que las docenas de nuevas detecciones de binarias de agujeros negros proporcionarán sobre la formación y evolución de estos misteriosos sistemas binarios. Miembros del grupo IGFAE-GW también trabajan en el observatorio de rayos cósmicos Pierre Auger. Estos investigadores continuarán trabajando en el seguimiento multimensajero de los eventos de O3 usando los datos recogidos en el observatorio Pierre Auger con el objetivo de establecer límites más restrictivos a la emisión de neutrinos de ultra-alta energía procedentes de fusiones de binarias de estrellas de neutrones.



Imagen de Pep Covas de la Universitat de les Illes Balears en el Observatorio LIGO-Hanford.

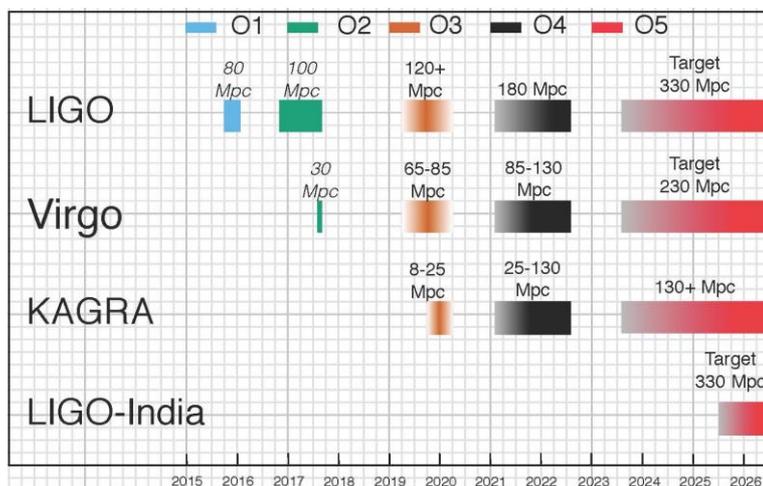
Fuentes astrofísicas de ondas gravitacionales como estrellas de neutrones y progenitores de supernovas son los focos principales del grupo Virgo en la Universidad de Valencia, con respecto a la investigación relativa al modelado de formas de onda a través de simulaciones de relatividad numérica, estimación de parámetros, y análisis de datos. Además, estos escenarios son los candidatos principales para realizar el seguimiento de observaciones de señales electromagnéticas asociadas, un programa de investigación que este grupo, junto con el de la UIB, también está involucrado.

El grupo Virgo del Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona (ICCUB) tiene una gran experiencia en la manipulación de datos masivos, instrumentación y electrónica puntera, adquirida gracias a la exitosa participación del ICCUB en grandes proyectos de física de altas energías (LHCb) y enormes censos astronómicos (Gaia), que está siendo transferida a Virgo. De este modo, los expertos del ICCUB contribuirán al procesado de datos de forma más eficiente, proporcionarán instrumentación y software, además de sus grandes conocimientos científicos especialmente en el campo de la cosmología.

IFAE ha asumido responsabilidades significativas en el experimento Virgo relacionadas con el control de la luz difusa dentro del experimento. El grupo ha jugado ya un papel importante en la puesta a punto del interferómetro, previo al comienzo de O3. Esta implicación energética en el experimento continuará en aspectos relacionados con operaciones y la actualización del interferómetro. Para ello, IFAE está trabajando en la construcción de nuevos deflectores instrumentados con fotosensores alrededor de los espejos principales en las áreas suspendidas, permitiendo a la poste un alineamiento mucho más eficiente y un ajuste preciso de los parámetros del interferómetro durante las operaciones; una mejor descripción dinámica de los espejos usando las distribuciones de luz difusa y simulaciones; y la supresión del desarrollo de altos modos en el interferómetro, conduciendo a patrones reconocibles en la distribución de la luz en los deflectores. El equipo de IFAE ha desarrollado un programa de investigación completo que se centra en aspectos relacionados con física fundamental. Esto incluye pruebas de modelos exóticos de Gravedad más allá de la Relatividad General; búsquedas de agujeros negros primordiales como candidatos de materia oscura; la determinación precisa del factor de expansión del universo; y el uso de ondas gravitacionales como pruebas de la inflación y las transiciones de fase en el universo temprano. En colaboración con el equipo de IFAE en CTA/MAGIC y Cosmología Observacional, el grupo en Virgo está en una posición privilegiada para aprovechar al máximo el enfoque de la astronomía de multimensajero.

6. EL FUTURO

Futuros ciclos de funcionamiento tendrán una duración y sensibilidad crecientes, con lo que se esperan muchas más observaciones. Suponiendo que no se encuentren obstáculos inesperados, los detectores LIGO podrían alcanzar un rango BNS de 190 Mpc en 2020. El tercer detector LIGO será instalado en la India y será configurado de forma idéntica a los instalados en EE.UU., aunque no se espera que alcance su mismo nivel de sensibilidad hasta 2024. Además, en EE.UU. ya se han asegurado fondos para la actualización del detector A+, implementando mejoras más allá del diseño actual de LIGO avanzado.



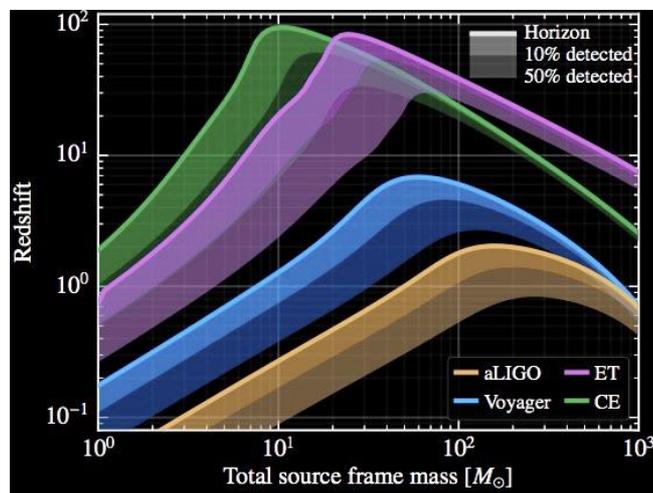
Cronograma de los distintos periodos de observación de LIGO, Virgo y KAGRA. Figura publicada en: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs41114-018-0012-9> Abbott, B.P., Abbott, R., Abbott, T.D. et al. Living Rev Relativ (2018) 21: 3. <https://doi.org/10.1007/s41114-018-0012-9>

La capacidad de localizar las fuentes de las señales detectadas depende de su distribución geográfica de los detectores y de su sensibilidad relativa. La determinación de la posición del cielo de una fracción significativa de las señales detectadas en áreas de 5 a 20 grados cuadrados requiere al menos tres detectores de sensibilidad dentro de un factor de ~ 2 entre sí y con un amplio ancho de banda de frecuencia. Cuando todos los detectores, incluidos KAGRA y el tercer detector LIGO en India, alcancen la sensibilidad de diseño, una fracción significativa de las señales de ondas

gravitacionales se localizará en unos pocos grados cuadrados solo mediante observaciones de ondas gravitacionales.

Esta claro que esta década verá una mejora en el alcance astrofísico, que se traducirá en un aumento considerable en la tasa de detección de fusiones de sistemas binarios, además de posibilitar la detección de otras fuentes, como supernovas o estrellas de neutrones en rotación. Sin embargo, la detección de fusiones de agujeros negros supermasivos necesitará de otros instrumentos, como el detector espacial LISA, y las detecciones de fusiones de estrellas de neutrones a distancias cosmológicas requerirán una nueva generación de instalaciones terrestres.

En estos momentos se está planeando un detector de tercera generación utilizando las infraestructuras ya existentes en LIGO bajo el nombre "LIGO Voyager" para mejorar la sensibilidad por un factor dos adicional, y reducir a la mitad el corte de baja frecuencia a 10 Hz. Voyager sería una actualización a A+, que estaría operativa entre 2027 y 2028. Voyager utilizaría masas de prueba de silicio de más de 160 kg, enfriadas a 123 K (una temperatura alcanzable con nitrógeno líquido) y un cambio a una longitud de onda del láser más larga en el rango de 1500–2200 nm en el que el silicio es transparente.



Alcance astrofísico en función de la masa total de los sistemas binarios en coalescencia para distintos futuros detectores. Los contornos sombreados indican el alcance máximo y distancia a la que son observables el 10% y 50% de las fuentes.

Futuras nuevas instalaciones como *Einstein Telescope* (ET) en Europa o *Cosmic Explorer* (CE) en EE.UU. se basarán en la experiencia y el éxito de los detectores actuales, para crear una próxima generación de instrumentos con un orden de magnitud más sensible que los detectores avanzados. Las instalaciones subterráneas de esta futura generación de observatorios, con una configuración triangular de 10 km de brazo en el caso de ET o en forma de L de 40 km para CE, podrían estar en funcionamiento en la década de los 40 y tendrán como objetivo expandir en gran medida la nueva frontera de la astronomía de ondas gravitacionales y la astrofísica.