BÚSQUEDA DE AGUJEROS NEGROS MÁS LIGEROS QUE EL SOL MEDIANTE ONDAS GRAVITACIONALES

Cada campaña de observación de la red de detectores de ondas gravitacionales LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) ofrece la oportunidad de detectar más fuentes —el número de fusiones binarias de objetos compactos detectadas supera ya las 200— y de realizar búsquedas más exhaustivas de fuentes que aún no se han observado. Entre estas últimas, un objetivo fascinante son las fusiones de objetos compactos con masas inferiores a la masa del Sol (denotadas por el símbolo $M_\odot$). Aunque no se conoce ningún proceso astrofísico que forme objetos tan ligeros a partir de estrellas normales (véase la **figura 1**), procesos hipotéticos podrían haber formado, por ejemplo, agujeros negros primordiales en el Universo primitivo.

Las fusiones de objetos ligeros no suelen ser emisores de ondas gravitacionales tan potentes como las de los sistemas más pesados, pero nuestros detectores serían, no obstante, sensibles a tales fuentes si no se encuentran demasiado lejos (normalmente a menos de una décima de gigaparsec). Su detección tiene el potencial de revelar nueva física. En la primera parte de la cuarta campaña de observación de LVK (O4a), los detectores de LIGO han recopilado datos con una sensibilidad sin precedentes, aumentando su alcance entre un 15 % y un 45 % en comparación con la tercera campaña de observación y, por lo tanto, explorando un volumen mayor del Universo.

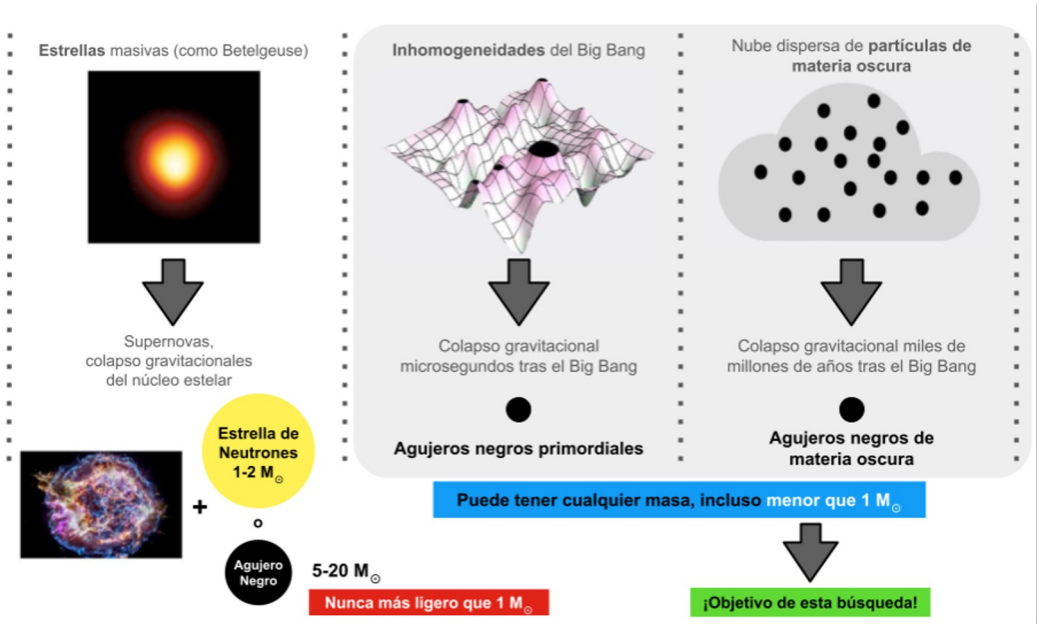


Figura 1: Esquema de los diferentes procesos que dan lugar a los objetos compactos que pueden observarse con LIGO-Virgo-KAGRA. Además de las estrellas de neutrones y los agujeros negros formados por evolución estelar, existen hipotéticos agujeros negros primordiales o de materia oscura que podrían existir en el universo y tener una masa inferior a la de nuestro Sol.

Utilizando tres procesos de búsqueda independientes (GstLAL, MBTA y PyCBC, todos ellos basados en nuestro conocimiento de la forma de onda esperada, pero que difieren en sus métodos para separar las señales del ruido de fondo y para estimar su significación estadística), analizamos los datos de O4a para buscar fusiones de masas subsolares, en las que el objeto más ligero del sistema binario tiene una masa comprendida entre 0,2 $M_\odot$ y 1 $M_\odot$ y el objeto más pesado tiene una masa comprendida entre 0,2 $M_\odot$ y 10 $M_\odot$. Para situar este rango en contexto, los objetos compactos más ligeros observados hasta la fecha mediante ondas gravitacionales tienen todos masas que se estiman por encima de 1 $M_\odot$, mientras que las observaciones electromagnéticas han mostrado indicios de una estrella de neutrones ligera con una masa estimada en torno a 0,8 $M_\odot$.

PARA SABER MÁS:

Visita nuestras webs:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

La búsqueda no reveló ningún nuevo candidato a detección (aunque sí detectó GW230529; ver el resumen científico sobre este emocionante descubrimiento). Sin embargo, a partir de nuestra falta de detección, pudimos establecer límites superiores para la tasa de este tipo de eventos (ver la **figura 2**). Para ello, cuantificamos la sensibilidad de nuestra búsqueda aplicándola a señales simuladas de fusiones de agujeros negros binarios de masa subsolar (menor que 1 $M_\odot$) añadidas a los datos de O4a.

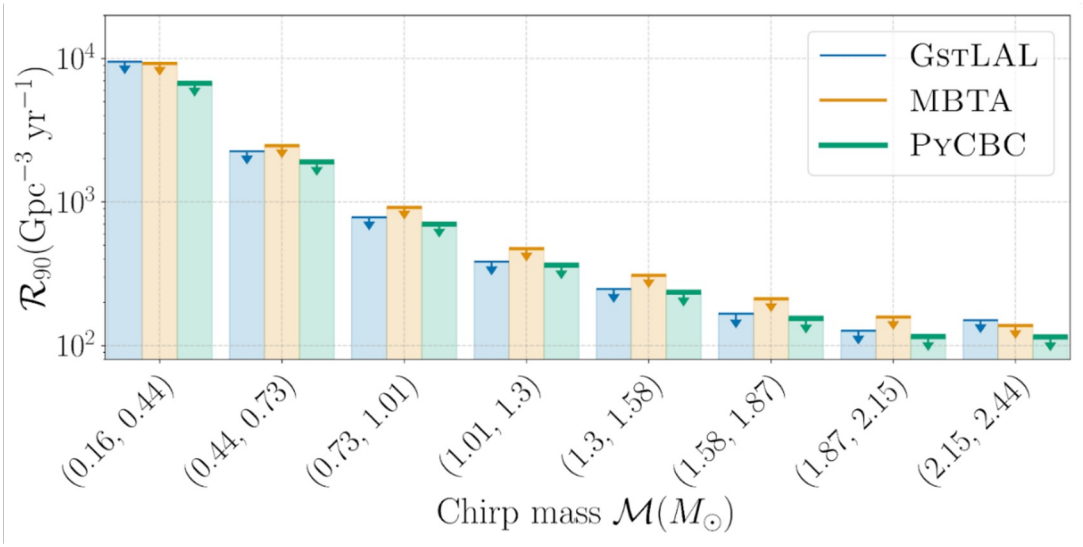


Figura 2: (Figura 5 en el artículo): Límites superiores de la tasa de fusión de binarias de agujeros negros de masa subsolar, en función de la masa chirp, es decir, la suma de las masas de los dos agujeros negros que representa la masa efectiva del sistema binario. Estos límites superiores se deducen de la ausencia de detecciones en los datos de O4a y de la sensibilidad estimada de la búsqueda realizada por cada canal de análisis.

Por primera vez, también analizamos la sensibilidad de nuestra búsqueda en el caso de que los objetos de masa inferior a la solar del sistema binario sean estrellas de neutrones. Aunque no se espera que las estrellas de neutrones tengan masas inferiores a la del Sol, si existieran estrellas de neutrones de tan baja masa, se prevé que los efectos de marea en la dinámica del sistema binario —en el que la atracción gravitatoria de una estrella provoca una deformación en la otra— desempeñen un papel importante. Esto se debe a que la deformación, sutil en las estrellas de neutrones típicas, se volvería significativa en estrellas de baja masa. Dado que nuestra búsqueda asume que los objetos son agujeros negros, es decir, partículas puntuales sin efectos de marea, es posible que no capte perfectamente una señal procedente de fusiones de estrellas de neutrones de masa inferior a la solar. Para cuantificar la sensibilidad de esta búsqueda, usamos simulaciones de fusiones de sistemas binarios de estrellas de neutrones de masa inferior a la solar y determinando con qué frecuencia se detecta una señal.

Los límites superiores de la tasa de fusión pueden reformularse como restricciones para los modelos de materia oscura que predicen fusiones de agujeros negros binarios con masas inferiores a la del Sol. Uno de estos modelos predice que los agujeros negros primordiales podrían haberse formado en el Universo primitivo y haberse emparejado para formar binarios que, con el tiempo, se fusionan. Derivamos los valores máximos de la fracción de materia oscura que podrían representar los agujeros negros primordiales, en función de diversas hipótesis sobre su masa y el escenario de formación de binarios. Otra clase de modelos considera la posibilidad de que la materia oscura esté compuesta por partículas (desconocidas) que pueden interactuar con su entorno de tal manera que se acumulen en regiones densas y, en última instancia, colapsen para formar agujeros negros. A estos se les denomina «agujeros negros oscuros» (o «agujeros negros de materia oscura»; ver figura 1), ya que se originarían a partir de la materia oscura. Los agujeros negros oscuros podrían entonces formar binarios y fusionarse, dejando una señal de ondas gravitacionales al entrar en espiral. Aunque, una vez más, esta búsqueda no produjo detecciones, este resultado nulo nos permite limitar el grado en que la materia oscura podría estar compuesta por agujeros negros oscuros, en el rango de masas subsolares considerado aquí.

La campaña de observación O4 se ha prolongado hasta noviembre de 2025 y ha permitido recopilar muchos más datos, lo que brinda la oportunidad de ampliar la búsqueda y abre la posibilidad tanto de lograr una detección como de establecer restricciones más precisas. ¡Estén atentos!

PARA MÁS INFORMACIÓN:

Visita nuestras webs: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)

Lee una versión preliminar gratuita del artículo científico aquí o en arXiv.

Traducción al castellano por Pablo García y Salvatore Mangano (a partir de la versión original en inglés).