

CONSTRUYENDO BOSONES ULTRALIGEROS CON ONDAS GRAVITACIONALES Y ESPINES DE AGUJEROS NEGROS

Las ondas gravitacionales proveen una poderosa manera de explorar los bloques constituyentes de nuestro Universo que son difíciles o imposibles de observar a través de otros experimentos. Las y los físicos saben que la mejor explicación a cómo las partículas interactúan unas con otras, conocida como el Modelo Estándar, está incompleta, y que existen muchas teorías prometedoras que proponen modificaciones o extensiones al Modelo Estándar para explicar mejor nuestras observaciones. En este estudio, la Colaboración LIGO-Virgo-KAGRA usó observaciones de fusiones de agujeros negros binarios para investigar las propiedades de bosones ultraligeros: partículas existentes en algunas de las extensiones propuestas al Modelo Estándar y que podrían ayudar a explicar preguntas sin resolver en la física de partículas y en la cosmología, incluyendo la naturaleza de la materia oscura.

Combinamos dos aproximaciones complementarias: una búsqueda directa de ondas gravitacionales de duración de vida larga provenientes de nubes de bosones vectoriales que rodean agujeros negros recientemente formados y una búsqueda indirecta basada en el espín de agujeros negros fusionantes, ambas basadas en un proceso conocido como superirradiancia de agujeros negros. Aun cuando no se encontró evidencia de bosones ultraligeros, nuestros resultados proveen constricciones más robustas (basadas en menos suposiciones) y más fuertes (con mayor confianza) en las masas de bosones escalares y vectoriales, haciendo más estrecho el espacio de parámetros en los cuales estas partículas pudieran existir.

¿QUÉ ES LA SUPERIRRADIANCIA DE AGUJEROS NEGROS?

Los [bosones](#) ultraligeros son partículas hipotéticas propuestas por muchas teorías que extienden el [Modelo Estándar de la física de partículas](#). Estos son extraordinariamente ligeros, muchos órdenes de magnitud más ligeros que cualquier otra partícula conocida, y son uno de los principales candidatos de la [materia oscura](#). En este estudio, consideramos tanto bosones escalares ([espín 0](#)) como [bosones vectoriales](#) ([espín 1](#)). Si tales partículas existieran, interactuarían con agujeros negros rotantes mediante un proceso conocido como [superirradiancia](#) de agujeros negros. En este proceso, un agujero negro transfiere parte de su energía rotacional al [campo bosónico](#), causando que el campo [crezca exponencialmente](#) y forme una nube de partículas alrededor del agujero negro.

Mientras la nube de bosones crece, ésta extrae [momento angular](#) del agujero negro, causando que éste reduzca su velocidad rotacional lentamente. La nube también puede emitir [ondas gravitacionales](#) (OGs) de larga duración que son casi monocromáticas, es decir, de una sola frecuencia. Estos efectos proveen dos maneras complementarias de buscar bosones ultraligeros: directamente a través de OGs emitidas por las nubes de bosones e indirectamente a través de mediciones de los espines de los agujeros negros.

DESCUBRE MÁS:

Visita nuestros www.ligo.org

sitios:

www.virgo-gw.eu

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

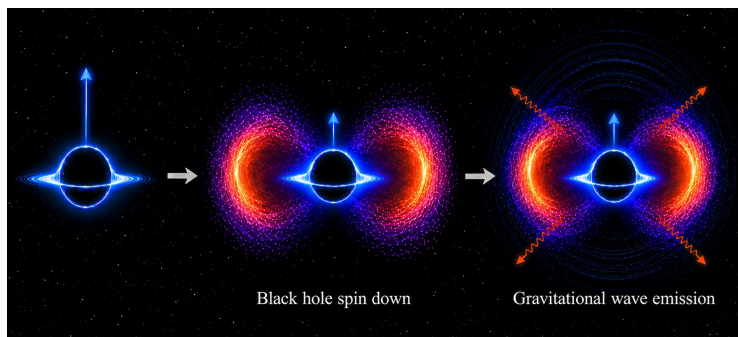


Figura 1: Representación esquemática de la formación y evolución de una nube de bosones alrededor de un agujero negro rotante. En la etapa de crecimiento, la superirradiancia extrae energía rotacional del agujero negro, amplificando la nube de bosones y desacelerando al agujero negro. En la subsecuente y mucho más duradera etapa de emisión de OGs, la nube de bosones lentamente se vacía mientras emite [ondas gravitacionales continuas](#).

¿CÓMO LAS BUSCAMOS?

Usamos dos aproximaciones complementarias para buscar los efectos de bosones ultraligeros en observaciones de OGs de la Colaboración [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK). Primero, buscamos señales de OGs de larga duración provenientes de nubes de bosones vectoriales alrededor de los remanentes de fusiones de [agujeros negros binarios](#). Nos enfocamos en bosones vectoriales porque se espera que estos produzcan señales de OGs más fuertes que las de los bosones escalares, haciéndolos más accesibles a nuestros detectores de OGs actuales. Se espera que estas señales sean casi monocromáticas y que persistan durante horas o meses después de la fusión de los agujeros negros, haciendo objetivos prometedores a agujeros negros recién formados.

Analizamos los datos de las fusiones [GW250114](#) y [GW250207](#) usando una técnica conocida como [Modelo Oculto de Markov](#), el cual está diseñado para rastrear señales débiles cuya frecuencia evoluciona con el tiempo. Estos eventos fueron seleccionados porque sus agujeros negros remanentes son masivos, rotan rápidamente y se encuentran relativamente cerca, haciéndolos prometedores anfitriones de nubes de bosones vectoriales detectables en nuestra búsqueda. Además, fueron elegidos porque las señales de las fusiones fueron excepcionalmente fuertes, permitiendo mediciones de sus propiedades con suficiente precisión como para poder modelar con gran precisión las señales de OGs esperadas.

Posteriormente, realizamos un análisis usando mediciones de agujeros negros de rotación rápida observados en fusiones binarias. Si bosones ultraligeros existieran con una masa que correspondiera con las masas de estos agujeros negros, la superirradiación extraería eficientemente momento angular de los agujeros negros y reduciría sus espines. La observación de agujeros negros con rotación rápida en fusiones binarias puede, entonces, descartar bosones con masas para las cuales, si existieran, hubiera causado una desaceleración considerable en estos agujeros negros. Aplicamos esta aproximación para los eventos de fusiones con espín alto GW240515_005301, GW241113_163507 y GW241225_082815, permitiéndonos establecer constricciones complementarias tanto en bosones escalares como en bosones vectoriales.

¿QUÉ ENCONTRAMOS?

Usando una [búsqueda directa](#) de ondas gravitacionales provenientes de nubes de bosones vectoriales alrededor de los remanentes de fusiones de agujeros negros, no encontramos evidencia alguna de estas señales. Por lo tanto, identificamos el rango de masas de los bosones vectoriales que pudieran haber producido ondas gravitacionales detectables pero que no fueron observadas. Esto nos permitió excluir masas de bosones vectoriales en el rango de $[2.80, 3.95] \times 10^{-13}$ eV (donde 1 eV, o electronvolt, corresponde a una masa de alrededor de 1.8×10^{-36} kg) con una [confianza mayor al 90%](#). Nuestros resultados se muestran en la **Figura 2**. Comparados con la [primera búsqueda directa de nubes de bosones vectoriales por la colaboración LVK usando datos O4a](#), nuestro análisis obtiene constricciones sustancialmente más fuertes.

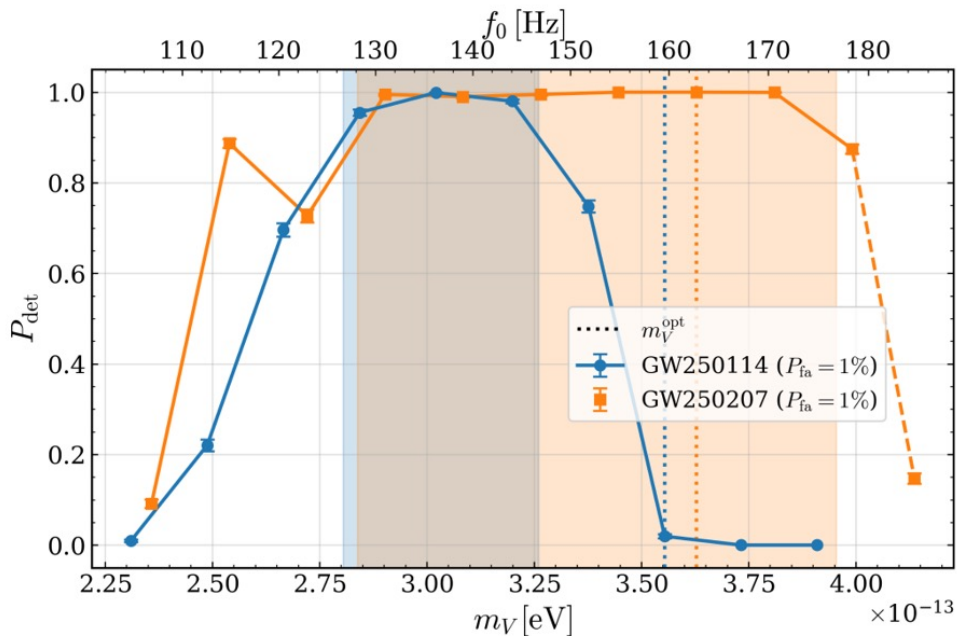


Figura 2 (Figura 3 de nuestro artículo): La confianza estimada (P_{det}) con la que podemos desfavorecer la existencia de bosones vectoriales con una masa dada por los valores del eje horizontal inferior, dado a que las búsquedas cuyos objetivos eran los agujeros negros remanentes de GW250114 (azul) y GW250207 (naranja) no encontraron emisión de OGs alguna. El eje horizontal superior muestra la frecuencia correspondiente a la cual un bosón de determinada masa emitiría OGs. La región sombreada indica el rango de las masas de bosones desfavorecidas con una confianza del 90%.

Estas constricciones más fuertes se deben, en su mayoría, a las propiedades de los eventos de fusiones analizados en este estudio. Las fusiones de agujeros negros GW250114 y GW250207 sucedieron relativamente cerca y fueron detectadas con una alta [relación señal/ruido](#), haciéndolas objetivos particularmente favorables para esta búsqueda. En conjunto, estos factores mejoraron nuestra habilidad para detectar emisiones de OGs provenientes de nubes de bosones vectoriales y, por lo tanto, permitiendo una exclusión de masas de bosones vectoriales con una confianza significativamente mayor, basado en no haber detectado emisiones de ondas gravitacionales.

Las mediciones de espín de la colaboración LVK proveen una prueba independiente de bosones ultraligeros. Encontramos que los altos espines observados en GW240515_005301, GW241113_163507 y GW241225_082815 son incompatibles con la desaceleración debida a superirradiancia por ciertas masas de bosones. Asumiendo tiempos de vida conservadores de agujeros negros de al menos 100,000 años, la medición de los espines nos permite excluir masas de bosones escalares en el rango de $[1.39, 6.94] \times 10^{-13}$ eV y masas de bosones vectoriales en el rango de $[0.32, 14.4] \times 10^{-13}$ eV con una confianza del 90% (véase la **Figura 3**). Estas exclusiones se extienden a un rango mayor que el de la búsqueda directa y proveen una prueba complementaria para la hipótesis de bosones ultraligeros.

¿POR QUÉ ESTO ES IMPORTANTE?

La ausencia de una señal detectada no significa que los bosones ultraligeros no existan. Por el contrario, nuestros resultados muestran que es cada vez menos probable que estas partículas existan con un rango de masas que pudieran producir efectos observables en nuestros datos de OGs. Al combinar la búsqueda directa de OGs provenientes de nubes de bosones vectoriales con constricciones independientes de agujeros negros con gran velocidad de rotación, este estudio establece algunos de los límites más estrictos hasta la fecha sobre OGs para los bosones vectoriales ultraligeros.

A medida que los detectores de OGs se vuelven más sensibles y que el número de fusiones de agujeros negros continúa creciendo, las búsquedas futuras explorarán una fracción aún mayor del [espacio de parámetros](#) de los bosones ultraligeros. Estas observaciones podrían eventualmente revelar una señal directa de nuevas partículas o podrían continuar reduciendo el rango de teorías viables. Cualquiera de estos resultados podría proveer una perspectiva valiosa de la naturaleza fundamental de la materia oscura.

En general, este trabajo demuestra cómo los agujeros negros y las observaciones de OGs pueden ser usados como poderosos laboratorios de física de partículas, permitiéndonos poner a prueba ideas que son difíciles o imposibles de estudiar en experimentos terrestres.

GLOSARIO

Bosón: tipo de partícula elemental. Los bosones no obedecen el principio de exclusión de Pauli que siguen los fermiones (otro tipo de partícula elemental, como los electrones). Esta propiedad permite a los bosones ocupar el mismo estado cuántico al mismo tiempo y formar objetos macroscópicos como las nubes de bosones que consideramos aquí.

eV: abreviación de electronvolt, una unidad de energía usualmente usada en física atómica y de partículas. Debido a la relación entre energía y masa establecida por Einstein, $E = mc^2$, las masas de las partículas pueden ser descritas en unidades de energía dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz, esto es, eV/c^2 . Por ejemplo, la masa del electrón es de $5.11 \times 10^5 \text{ eV}/c^2$ mientras que la masa del neutrino, la partícula más ligera conocida hasta ahora, es de menos de $0.120 \text{ eV}/c^2$. Cuando se usa el sistema de unidades naturales, el cual establece $c=1$, las masas se expresan en eV.

Superirradiancia: proceso mediante el cual partículas extraen energía rotacional de un objeto masivo que rota. En el caso de nubes de bosones, un campo bosónico en la vecindad de un agujero negro rotatorio puede ser amplificado por dispersión superirradiante.

Bosón vectorial: un tipo de partículas que tienen espín 1. Por ejemplo, el fotón es un bosón vectorial y transmite la fuerza electromagnética. En este trabajo consideramos un bosón vectorial, y su fuerza, no incluidos en el modelo estándar de la física de partículas.

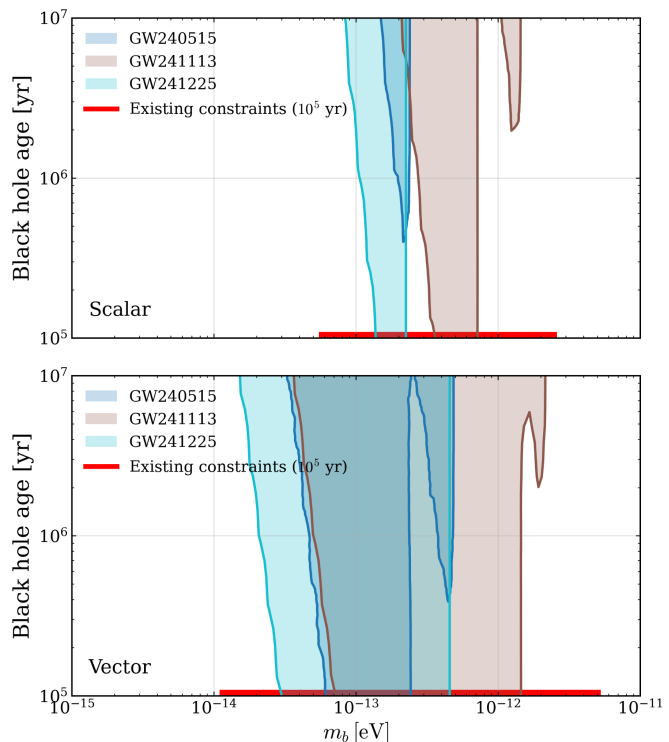


Figura 3 (Figura 4 de Nuestro artículo): Regiones de masas de bosones escalares (panel superior) y vectoriales (panel inferior) ultraligeros descartados por observaciones de agujeros negros de alta velocidad de rotación observados en los eventos de OGs GW240515_005301, GW241113_163507 y GW241225_082815. Las áreas sombreadas indican las masas de bosones que son incompatibles, con un nivel de confianza del 90%, con el espín observado de agujeros negros para una edad asumida para el agujero negro.

DESCUBRE MÁS:

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

Lee una versión gratuita de nuestro artículo científico:

<https://dcc.ligo.org/P2600218/public/>

O en ArXiv: <https://arxiv.org/abs/2608.11620>

Lee este resumen científico acerca nuestra previa (O3) búsqueda de nubes de bosones escalares alrededor de agujeros negros rotatorios: <https://ligo.org/science-summaries/O3BosonClouds/>