

GW151226: OBSERVACIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES PROVENIENTES DE LA FUSIÓN DE UNA BINARIA DE AGUJEROS NEGROS DE 22 MASAS SOLARES

Unos meses después de la primera detección de ondas gravitacionales provenientes de una fusión de agujeros negros (GW150914), el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO, por sus siglas en inglés) ha hecho otra observación de ondas gravitacionales a partir de la colisión y fusión de otro par de agujeros negros. Esta señal, llamada GW151226, llegó a los detectores LIGO el 26 de diciembre del 2015 a las 03:38:53 UTC.

La señal, proveniente de unos 1.400 millones de años luz de distancia, es un ejemplo de la coalescencia de una binaria compacta, cuando dos objetos extremadamente densos se fusionan. Los sistemas binarios como este son una de las muchas fuentes de ondas gravitacionales que los detectores LIGO están buscando. Las ondas gravitacionales son distorsiones del mismo espacio-tiempo que llevan consigo energía de un sistema binario como este, causando que los dos objetos orbiten en forma espiral el uno alrededor del otro. En esta fase de evolución espiral los dos objetos se van acercando progresivamente hasta que se funden. Las ondas gravitacionales producidas por la binaria estiran y comprimen el espacio-tiempo a medida que se propagan a través del universo. Es este efecto de estiramiento y compresión lo que los observatorios como LIGO-avanzado pueden detectar y usar para revelar información sobre las fuentes que crearon las ondas gravitacionales.

GW151226 es la segunda observación confirmada de una fusión de un sistema binario y, junto con GW150914, marca el inicio de la astronomía de ondas gravitacionales como un nuevo medio revolucionario para explorar nuevas fronteras de nuestro universo.

LA SEÑAL

Como en la primera detección, GW151226 fue observado por los dos instrumentos gemelos de LIGO-avanzado ubicados en Livingston, Luisiana, y Hanford, Washington, EE.UU. La figura 1 muestra los datos recogidos por los dos instrumentos durante el último segundo antes de la fusión. Para facilitar su identificación, la animación alterna imágenes de los datos reales del detector con los datos después de haber sustraído la señal más coincidente. Aún así, en contraste con la primera detección (en la que la señal del evento era obvia frente al ruido de fondo de los detectores), en este caso no es inmediatamente claro que haya una señal de onda gravitacional entre los datos. Esto se debe a que GW151226 tiene una menor intensidad de señal (en referencia a la amplitud medida de la onda gravitacional). También es más difícil de ver la señal ya que se extiende por un periodo de tiempo más largo, de 1 segundo en comparación con los 0,2 segundos de la primera detección. A pesar de la dificultad de reconocer este evento a simple vista, nuestros códigos de búsqueda fueron capaces de encontrar la señal en los datos.

¿CÓMO SE HIZO LA DETECCIÓN?

El primer aviso de la señal vino de un método de búsqueda de baja latencia, que analiza los datos casi a tiempo real a medida que se van registrando. La figura 2 muestra los resultados de uno de los métodos de búsqueda. Este análisis identificó a GW151226 como un candidato de onda gravitacional a los 70 segundos de su llegada a la Tierra. Aproximadamente un minuto más tarde, ya se habían calculado las primeras estimaciones de los parámetros de la

fuelle. Estas búsquedas iniciales usaron una técnica conocida como filtrado adaptado para identificar las posibles señales de ondas gravitacionales. En este método, los datos se comparan con muchas señales predichas (“patrones de formas de onda”) para poder identificar la que más se parece. Si en los datos de ambos detectores se identifica una señal al mismo tiempo, entonces tenemos un candidato a onda gravitacional. El filtrado adaptado fue esencial tanto para la detección como para el análisis de GW151226 debido a su menor amplitud de señal en comparación con la primera detección (GW150914).

Los análisis de búsqueda iniciales solo pueden dar estimaciones aproximadas de las propiedades de la fuente -incluyendo las masas de los dos objetos compactos, velocidad de rotación y su orientación, distancia y posición en el cielo. Para determinar estas propiedades (conocidas como parámetros) con más precisión, utilizamos una técnica diferente: Probamos muchas combinaciones distintas de parámetros y para cada una verificamos que tanto se parece la forma de onda predicha con esa combinación de parámetros a la señal que hemos visto. Esto nos permite construir un mapa de los diferentes conjuntos de parámetros que podrían explicar nuestra observación, y averiguar la probabilidad que tiene cada conjunto de ser el correcto. La figura 3 muestra la excelente concordancia entre la señal de onda gravitacional reconstruida (según lo observado por el detector de Livingston), generada a partir de un rango de los parámetros más probables, en comparación con una señal calculada a partir de una solución numérica de las ecuaciones de la relatividad general de Einstein.

¿CÓMO PODEMOS ESTAR SEGUROS DE QUE ESTE EVENTO FUE REAL?

Al igual que con la primera detección, se hicieron muchos chequeos para asegurar que ningún efecto ambiental o instrumental pudiese haber causado la señal. Estos efectos podrían ser cualquier cosa, ¡desde refrigeradores con un mal comportamiento hasta la caída de rayos lejanos! Durante el tiempo del evento, no hubo tales perturbaciones lo suficientemente grandes como para explicar GW151226, así que concluimos que la señal debía haber tenido un origen astrofísico.

¿QUÉ VIMOS?

Comparando los datos con millones de formas de señales, podemos encontrar qué combinaciones de parámetros de la binaria son capaces de describir la señal. La figura 4 muestra la distribución de combinaciones probables de masas para la binaria inferidas con este método. A partir de esta figura, podemos decir con una certeza del 99% que la masa del objeto menor no puede ser inferior a 4.5 veces la masa del Sol, cantidad que se encuentra muy por encima de la máxima masa teórica de una estrella de neutrones. Por esa razón, ¡podemos estar seguros que hemos observado una binaria de agujeros negros! La distribución de las combinaciones de masa para los dos agujeros negros está centrada alrededor de 14 y 8 veces la masa del Sol respectivamente. Después de la fusión, el agujero negro resultante tiene una masa de aproximadamente 21 masas solares.

Los agujeros negros pueden estar girando a medida que orbitan entre sí - al igual que la Tierra gira sobre su propio eje. Esta rotación puede tener diferentes ángulos de inclinación con respecto al movimiento orbital; para la Tierra esta inclinación produce las diferentes estaciones. Cuán rápidamente están rotando los agujeros negros (la magnitud de espín) y cuán inclinados están (la desalineación de espín) también afectará a la duración de la señal observada. Si los espines de los agujeros negros son grandes y en la misma dirección que el momento orbital, entonces esos agujeros negros pueden acercarse mucho el uno al otro antes

de fusionarse. Por el contrario, si los agujeros negros están rotando en el sentido opuesto al que están orbitando, los agujeros negros se fusionarán a una distancia mayor, dando lugar a una señal más corta. Cuando los espines y la órbita no están alineados, la binaria se balanceará a medida que se mueve en espiral hacia la fusión (esto se llama precesión debido al espín).

La figura 5 muestra la combinación de magnitudes de rotación e inclinaciones que pueden describir los datos. Encontramos que el agujero negro primario (el más masivo de los dos) está probablemente girando en la misma dirección que el movimiento orbital. Sin embargo, no podemos decir cómo está inclinado. Esta figura también muestra que no podemos poner ninguna restricción importante en el rotación del agujero negro menos masivo.

Después de la fusión, el agujero negro resultante también está rotando. Encontramos que este nuevo agujero negro está rotando al 70% del máximo valor posible.

La masa del agujero negro final es menor que la suma de las masas de los dos agujeros negros iniciales, ya que un porcentaje de su masa es convertida directamente en energía de ondas gravitacionales durante las fases de evolución espiral y fusión. La diferencia de masas es equivalente a convertir la masa de nuestro Sol a energía radiada en forma de ondas gravitacionales. En su pico, ¡la potencia emitida desde la binaria fue mayor que la potencia combinada de la luz (lo que los astrónomos llaman luminosidad) de todas las estrellas y galaxias en el universo observable!

También podemos decir que esta fusión tuvo lugar a alrededor de 1.400 millones de años luz de distancia - así que estas ondas gravitacionales han viajado una distancia similar a las de la primera detección, GW151226.

Podemos usar la diferencia en el tiempo de llegada a los detectores de las ondas gravitacionales para “triangular” la posición de la fuente de ondas gravitacionales en el cielo. Aún así, con sólo dos detectores, nuestra estimación de la posición es muy tosca. Para GW151226 pudimos localizar su posición dentro de 850 grados cuadrados en el cielo - aproximadamente 4000 veces el tamaño de la luna llena. La precisión de este método de triangulación mejorará considerablemente con el incremento del número de detectores; para más detalles ver este [artículo](#).

GW151226 duró aproximadamente un segundo en la banda de frecuencias sensible de los detectores, haciéndola una señal mucho más larga que la de la primera detección, que solo duró 0.2 segundos. Esta duración más larga es debida a las masas más ligeras de los agujeros negros del sistema binario: se pudo ver más de la fase espiral en la banda sensible de los detectores de LIGO. Una fase espiral más larga también significa que GW151226 puede ser usado para calcular mejores límites de cualquier violación de la relatividad general. No encontramos ninguna pista de que Einstein estuviera equivocado.

¿QUÉ SIGNIFICADO TIENE GW151226 PARA LA ASTROFÍSICA?

GW151226 es la primera observación directa de una binaria de agujeros negros en este rango de masas. No se espera que las binarias de agujeros negros emitan ninguna luz, así que las ondas gravitacionales que emiten nos permiten encontrar nuevos sistemas binarios de agujeros negros que no podrían ser directamente observados de ninguna otra manera. Habiendo dicho esto, podemos comprobar la consistencia de nuestros resultados con otros

métodos. Por ejemplo, las masas que medimos (para los agujeros negros iniciales y finales) para GW151226 son consistentes con las masas de otros agujeros negros inferidas a partir de observaciones de binarias de rayos X. Aún así, nuestra medición de la onda gravitacional ha sido obtenida a través de un método completamente independiente.

Las binarias de agujeros negros pueden formarse de muchas maneras diferentes. Podrían haber sido originadas a partir de dos estrellas masivas que nacieron y evolucionaron juntas hasta convertirse en una pareja de agujeros negros al final de sus vidas. Alternativamente, en áreas del universo en las que las estrellas individuales se encuentran en entornos más densos, una binaria de agujeros negros podría haberse formado a partir de dos objetos individuales que estuvieran interaccionando el uno con el otro hasta convertirse en un sistema binario más tarde en sus vidas. Las propiedades de GW151226 son consistentes con ambos escenarios de formación, así que por el momento no podemos favorecer uno por encima del otro.

Aún así, tanto GW151226 como GW150914 indican que podría haber muchas más binarias de agujeros negros de masas estelares en el universo de las que esperábamos. Estas detecciones iniciales son un importante paso adelante para entender más sobre la población de estas binarias, que hasta ahora había estado completamente oculta para nosotros.

PUNTOS PRINCIPALES

LIGO-avanzado ha observado otra fusión de agujeros negros. Las observaciones de GW151226 y GW150914 indican una población de binarias de agujeros negros en el universo. Las observaciones de ondas gravitacionales han sido capaces de confirmar la existencia de agujeros negros y proveer una nueva visión de los misterios del universo. ¡La era de la astronomía de ondas gravitacionales ha comenzado!

LEE MÁS

Página de la Colaboración Científica LIGO (incluye un enlace a nuestra publicación en Physical Review Letters)

Página de Virgo-avanzado

Información sobre la tecnología de LIGO-avanzado y sus mejoras

LIGO Open Science Center (con acceso a los datos de GW151226) <https://losc.ligo.org>

FIGURAS DE LA PUBLICACIÓN

Para saber más sobre como fueron generadas estas figuras y su significado, lea la publicación principal en Physical Review Letters.

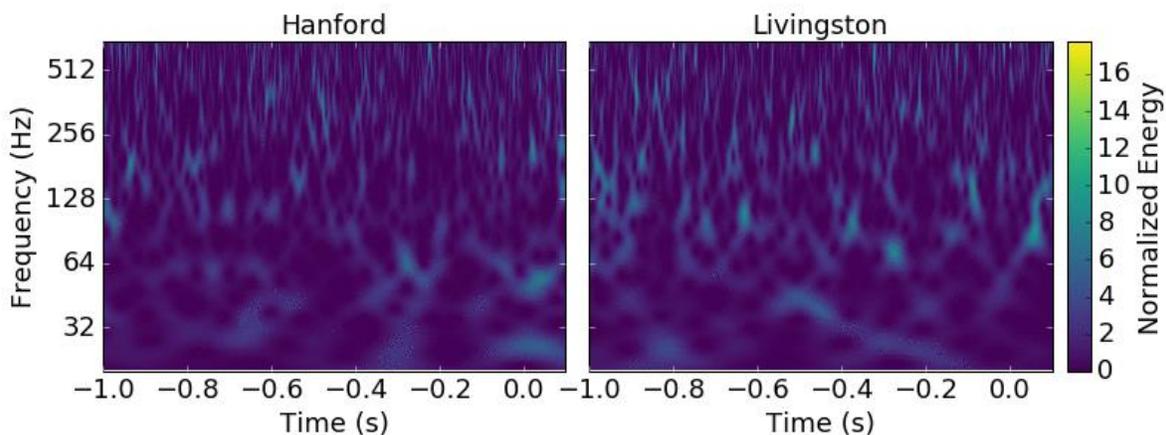


Figura 1. (Adaptada de la figura 1 de nuestra publicación). El evento de onda gravitacional GW151226 así como fue observado por los instrumentos gemelos LIGO-avanzado: LIGO Hanford (a la izquierda) y LIGO Livingston (a la derecha). Las imágenes muestran los datos recogidos por los detectores durante el último segundo anterior a la fusión, a medida que la señal varía en función del tiempo (en segundos) y de la frecuencia (en Hertz o el número de ciclos de onda por segundo). Para estar seguros de que una onda gravitacional real ha sido observada, comparamos los datos de los detectores con un conjunto predefinido de modelos de fusiones de binarias. Esto nos permite encontrar señales de ondas gravitacionales que se encuentran profundamente escondidas en el ruido de los instrumentos y que son muy difíciles de detectar a simple vista. La animación muestra los datos del detector con y sin el modelo más parecido de señal de onda gravitacional, haciéndolo mucho más fácil de identificar. La señal puede ser vista aumentando en frecuencia a medida que los dos agujeros negros se acercan. ¡Esta señal es mucho más difícil de detectar a simple vista que la primera detección GW150914!

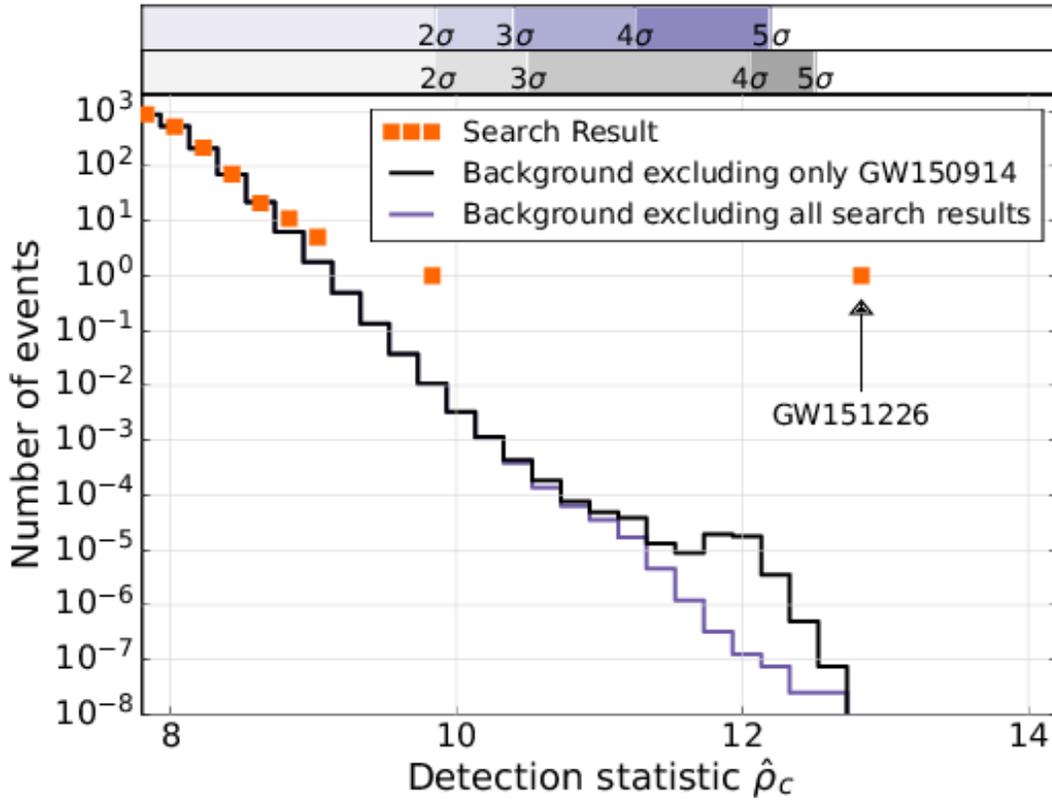


Figura 2. (Adaptada de la figura 2 de nuestra publicación). Resultados de nuestra búsqueda de fuentes de ondas gravitacionales similares a GW151226 (y la detección previa GW150914) que muestran que significancia tiene la detección comparada con el fondo de falsos “eventos” causados por el ruido de los instrumentos LIGO. Podemos ver que GW151226 se encuentra muy por encima del nivel de fondo.

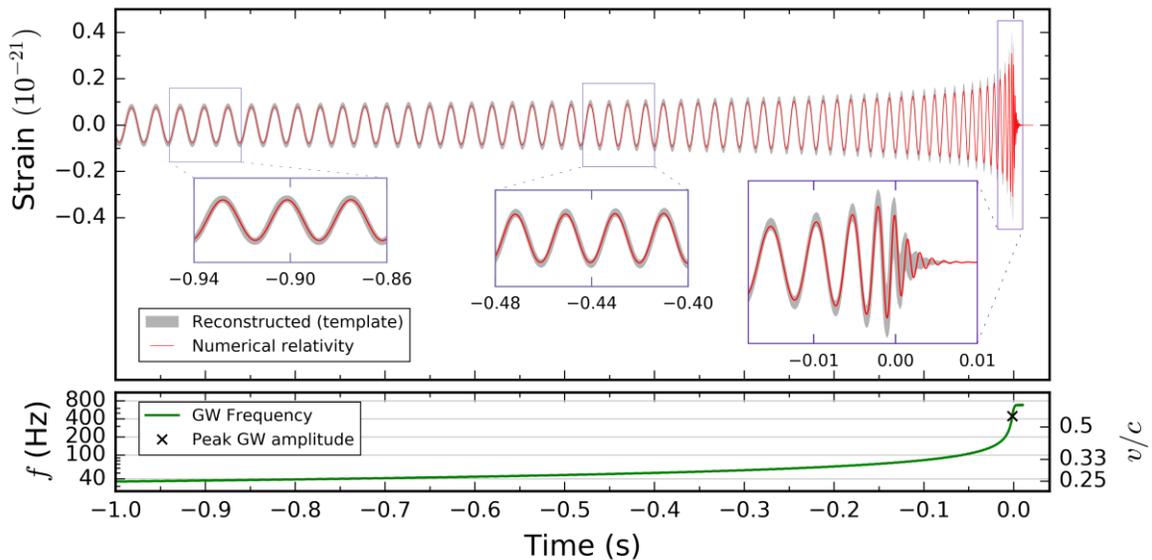


Figura 3. (Adaptada de la figura 5 de nuestra publicación). El panel superior muestra una comparación de la señal de onda gravitacional reconstruida en función del tiempo vista por el detector de Livingston (gris) con una señal calculada a partir de una simulación numérica de

relatividad general. El tiempo se cuenta en segundos hacia atrás con respecto al momento de la fusión de los dos agujeros negros. El panel inferior muestra cómo cambia la frecuencia de las ondas gravitacionales con el tiempo. La frecuencia aumenta a medida que los agujeros negros se acercan. Esto también se puede relacionar con la velocidad orbital v , que se muestra en la parte derecha del panel inferior en unidades de la velocidad de la luz c . La cruz negra marca el punto donde la amplitud de la señal fue mayor, que aproximadamente también es el instante en el que los agujeros negros se fusionaron.

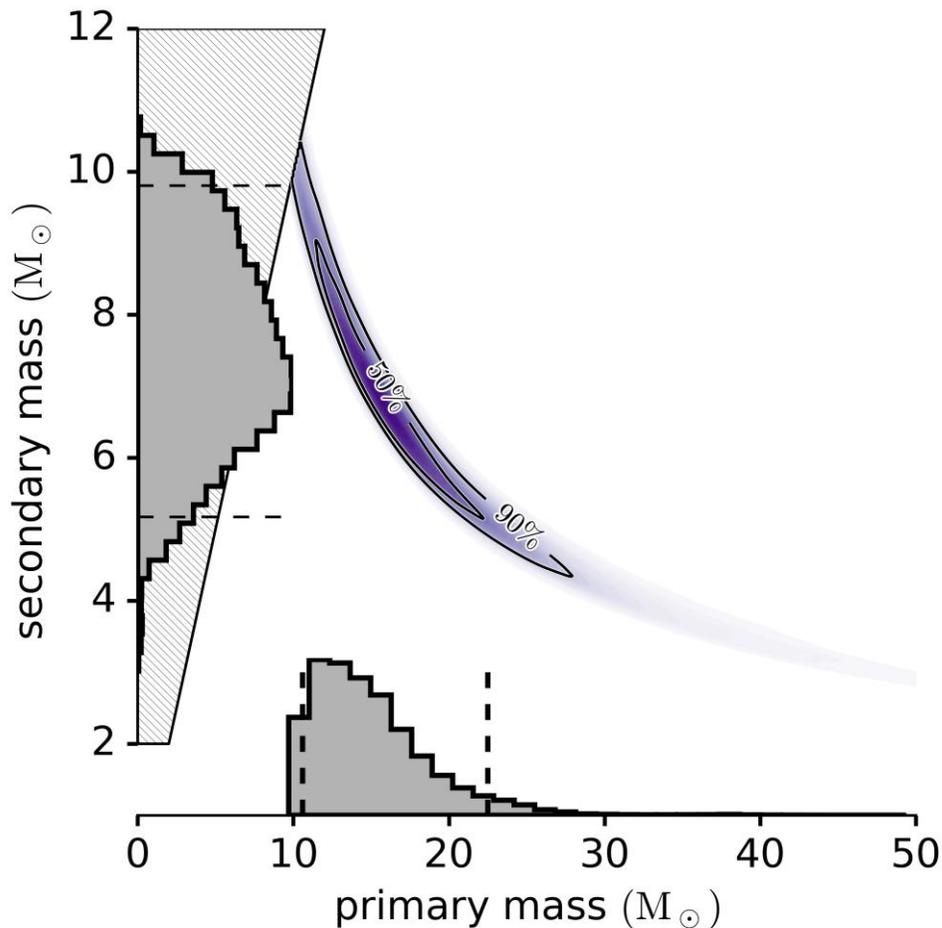


Figura 4. (Adaptada de la figura 3 de nuestra publicación). La imagen muestra las combinaciones de masas de los agujeros negros (en unidades de masas solares) que pueden explicar los datos que hemos observado. Llamamos al agujero negro más masivo el agujero negro primario y al menos masivo el secundario. Las regiones más oscuras corresponden a combinaciones de masas más probables, donde medimos una probabilidad del 90% de que GW151226 tenga masas comprendidas en el contorno negro llamado "90%".

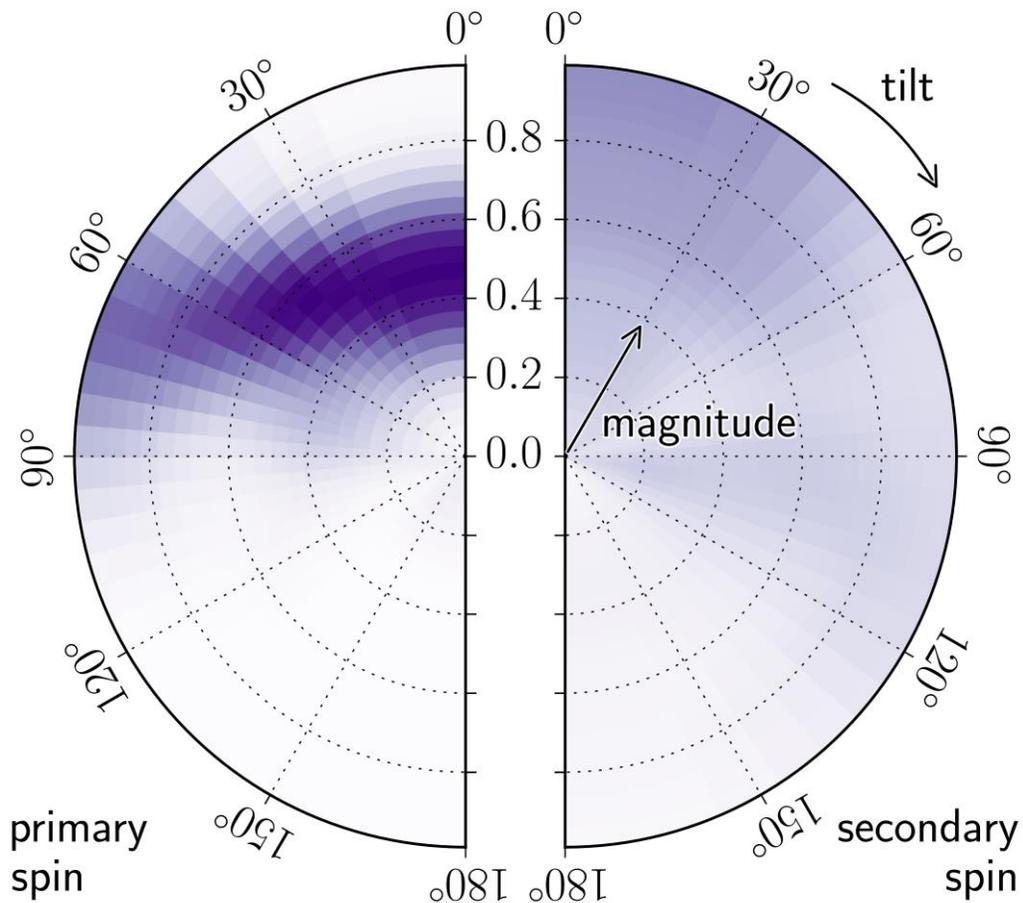


Figura 5. (Adaptada de la figura 4 de nuestra publicación). Esta imagen muestra la posible magnitud de espín (cuán rápidamente está rotando) y de su alineación (la inclinación respecto al movimiento orbital) de los dos agujeros negros. Llamamos al agujero negro más masivo el agujero negro primario y al menos masivo el secundario. Cada bloque en el semicírculo representa una combinación diferente de magnitud y orientación, en la que cuánto más oscura sea la sombra más probable es la combinación. Podemos inferir algunos límites en la magnitud y la orientación de espín para el agujero negro primario, no así para el agujero negro secundario.