

## Propiedades de la Población de Binarias de Agujeros Negros deducidas a partir de O1 y O2

Toda detección individual de ondas gravitacionales origina una ola de emoción en su paso a través de la colaboración – en algunas mayor que en otras, es cierto – pero hay algunos resultados científicos que sólo pueden obtenerse combinando la información procedente de muchas detecciones conjuntas. Un par de agujeros negros con masas varias docenas de veces mayores que la del Sol podría ser un dato estadístico atípico, pero siete u ocho de ellos juntos comienzan a sugerir una tendencia. [GW150914](#) fue la primera detección de tales “agujeros negros masivos de origen estelar” y llegó como una sorpresa para muchos, ya que los agujeros negros que se conocían anteriormente en nuestro propio entorno Galáctico eran significativamente más pequeños y menos masivos. Sin embargo, los astrofísicos encontraron pronto mecanismos que podrían haber producido tales agujeros negros masivos si las estrellas progenitoras se hubiesen formado en un entorno bastante diferente al de nuestro Sol. Con el objetivo de poner a prueba tales teorías, el único camino es observar una gran, y quizás más diversa, población de sucesos asociados a binarias de agujeros negros.

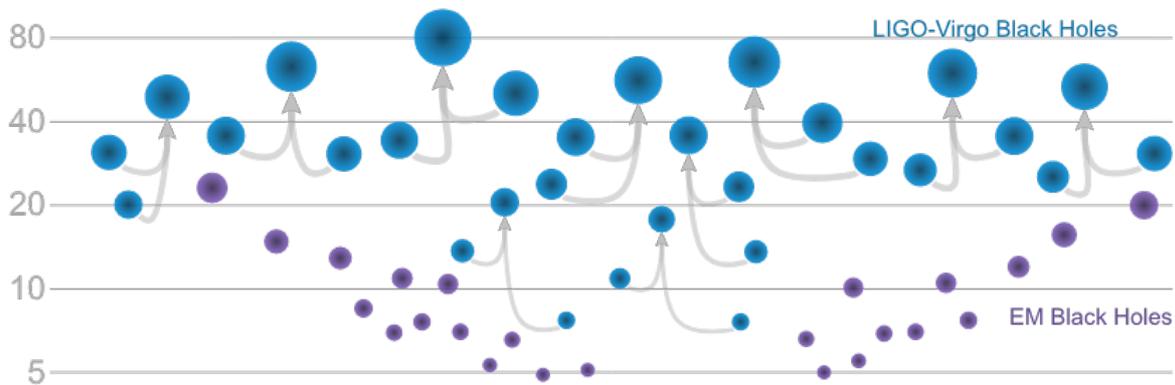
En los últimos años, la red global de detectores avanzados de ondas gravitacionales formada por los interferómetros [LIGO](#) y [Virgo](#) ha recopilado el primer catálogo de observaciones de ondas gravitacionales. El [nuevo catálogo](#), denominado GWTC-1 (del inglés “Gravitational-wave Transient Catalog 1”), que incluye señales detectadas durante el primer y segundo Período de Observaciones (O1 y O2, respectivamente) de la red avanzada, presenta cuatro nuevas señales de binarias de agujeros negros, además de las ya publicadas, incluyendo el más masivo sistema binario de agujeros negros observado hasta la fecha. LIGO y Virgo han descubierto, hasta ahora, un total de ¡10 fusiones de agujeros negros!

Este creciente botín de agujeros negros es un gran paso hacia el descubrimiento de las propiedades de la población “invisible” de agujeros negros que impregna nuestro Universo. Encontramos varios aspectos interesantes en la distribución, incluyendo una aparente ausencia de sistemas binarios de agujeros negros cuyos componentes antes de la fusión tienen masas mayores que 50 masas solares, restricciones preliminares en los spins de estos agujeros negros, y evidencias preliminares de que la tasa de fusiones de agujeros negros aumenta en épocas cósmicas tempranas.

### Catálogo 1 de Ondas Gravitacionales procedentes de sucesos Transitorios

Durante los dos primeros períodos de observación de los detectores de ondas gravitacionales (GW, por sus siglas en inglés) [LIGO Avanzado](#) y [Virgo Avanzado](#), se ha recogido alrededor de un año de valiosos datos. El primer período de observación de LIGO Avanzado (O1) transcurrió desde septiembre de 2015 hasta enero de 2016, y el segundo (O2) desde noviembre de 2016 hasta agosto de 2017. Durante este segundo período de observación, el interferómetro Virgo también se unió a la búsqueda, propiciando la primera red mundial de detectores avanzados de GW.

[Diez fusiones de binarias de agujeros negros \(BBH, por sus siglas en inglés\), así como una fusión de una binaria de estrellas de neutrones](#), se detectaron durante estos dos períodos de observación, y con esas detecciones la Colaboración LIGO/Virgo ha creado su [primer catálogo](#) de GW procedentes de sucesos transitorios. Las binarias de agujeros negros son la etapa final en la evolución de estrellas masivas, y proporcionan información sobre los sistemas estelares progenitores y los entornos que conducen a su formación. Como se puede ver en la Figura 1, los agujeros negros detectados por LIGO/Virgo ya muestran destacadas diferencias con respecto a los agujeros negros que han sido inferidos indirectamente a través de las observaciones electromagnéticas.



**Figura 1:** Masas de los agujeros negros conocidos, tanto los detectados por LIGO/Virgo vía Gws (azul) como los observados indirectamente mediante observaciones electromagnéticas de sistemas binarios de rayos X (morado). Las masas de los productos de la fusión también se muestran. (Créditos: LIGO-Virgo / Frank Elavsky / Northwestern).

¿Qué implicaciones tienen las propiedades medidas de las BBHs detectadas usando GWs con respecto a la población de BBH astrofísicos? A fin de presentar una clara valoración de nuestro conocimiento sobre la población de BBH, necesitamos explicar varios efectos sutiles. Debido al omnipresente ruido de fondo en los detectores, no podemos medir con precisión las masas o los spines de los agujeros negros que se fusionan; sólo podemos identificar las “regiones” más probables en el espacio de posibles masas y spines que pueden tener cada uno – el equivalente a las [barras de error](#) en medidas individuales. Además, las fusiones de BBH más masivas emiten, en general, señales de GWs más intensas que pueden ser observadas a distancias mayores que las procedentes de sistemas menos masivos (lo que se conoce como [sesgo de Malmquist](#)). En consecuencia, somos capaces de ver más binarias masivas en un volumen espacial mucho mayor. Este “[efecto de selección](#)” puede explicar parcialmente por qué nuestras fusiones observadas parecen preferir agujeros negros con masas entre 30 y 40 veces la del Sol en lugar de sólo entre 10 y 15 veces la solar.

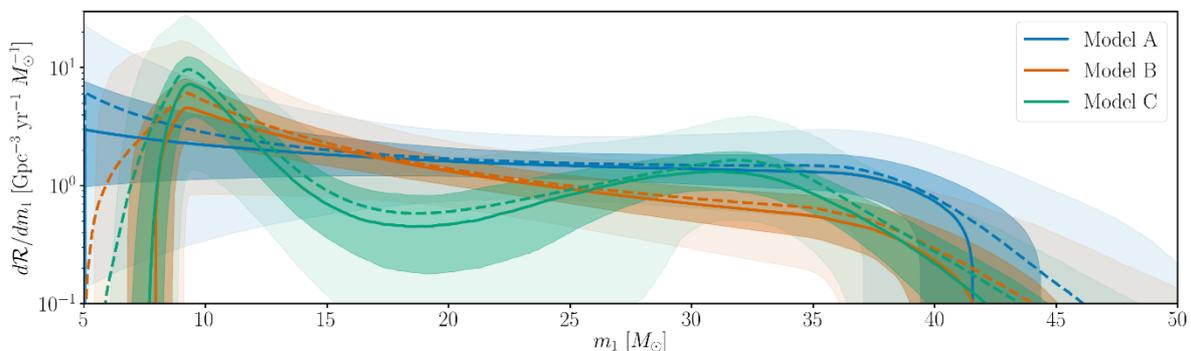
Sin embargo, cuantificando nuestros efectos de selección e incertidumbres en las medidas, hemos estimado cuánto más probable es encontrar diferentes clases de

BBHs. Usando este conocimiento, podemos traducir nuestras observaciones en estimaciones sobre la población subyacente. Debido a que disponemos de muy pocas observaciones, debemos hacer estimaciones bien fundadas para completar la ausencia de datos, un proceso conocido como [inferencia Bayesiana](#).

### El espectro de Masas de BBH

Las medidas de GW de agujeros negros ya han tenido profundas implicaciones en la astrofísica estelar. La mayor parte de los agujeros negros detectados por LIGO/Virgo son más masivos que la población de agujeros negros de masa estelar conocida anteriormente, deducida indirectamente a partir de las observaciones electromagnéticas de [sistemas binarios de rayos X](#); esto nos dice algo sobre [cómo y dónde pueden haberse formado las BBHs masivas](#). Con más eventos, tenemos la oportunidad de ir un paso más allá – ahora que sabemos que existen agujeros negros de masa estelar masivos, ¿podemos cuantificar la tasa relativa de masas que aparecen en la población de fusiones de agujeros negros?

La distribución de masa “estándar” se parametriza por una [ley de potencias](#); la probabilidad de que exista un agujero negro de una masa dada decrece con la masa según una potencia:  $p(m)$  es proporcional a  $m^\alpha$ , donde  $\alpha$  es la pendiente de la ley de potencias (es decir, cómo de abruptamente decrece la probabilidad cuando la masa aumenta). Usando inferencia Bayesiana y el catálogo de masas medidas, podemos deducir el verdadero valor del parámetro en este modelo ( $\alpha$ ). Por ejemplo, la distribución de masas de estrellas masivas puede ser descrita por una ley de potencias con pendiente  $\alpha = 2.3$ .



**Figura 2:** Número de agujeros negros de una masa determinada por unidad de volumen que interviene en fusiones, para varias conjeturas diferentes en los modelos. El Modelo A tiene la menor complejidad y el Modelo C es el más complejo. Las líneas continuas, sombreadas en oscuro y las sombreadas más claras muestran la mediana, los intervalos de confianza del 50% y del 90%, y la línea discontinua muestra la “distribución de población posterior”, o la mejor predicción sobre qué masa podría tener un miembro de una población típica. Adaptada a partir de la Figura 1 del artículo.

Examinamos múltiples modelos de distribución de masa que tengan un grado de flexibilidad mayor que la uniparamétrica ley de potencias e incorporamos

predicciones astrofísicas más sofisticadas. Por ejemplo, en lugar de suponer unos límites en la masa máxima y mínima “fijos” para la ley de potencias, permitimos que esos parámetros queden libres y medimos sus valores a partir de los datos. Un modelo (Modelo C) tiene un mayor grado de complejidad y se describe por una combinación de leyes de potencias y una [distribución Gaussiana \(normal\)](#). La distribución Gaussiana puede capturar un posible aumento de agujeros negros a masas mayores (debido, por ejemplo, a las [supernovas por inestabilidad de pares pulsacional](#)). La tasa relativa de fusiones como función de la masa del agujero negro primario deducida del catálogo de BBHs se muestra en la Figura 2 para los tres diferentes modelos.

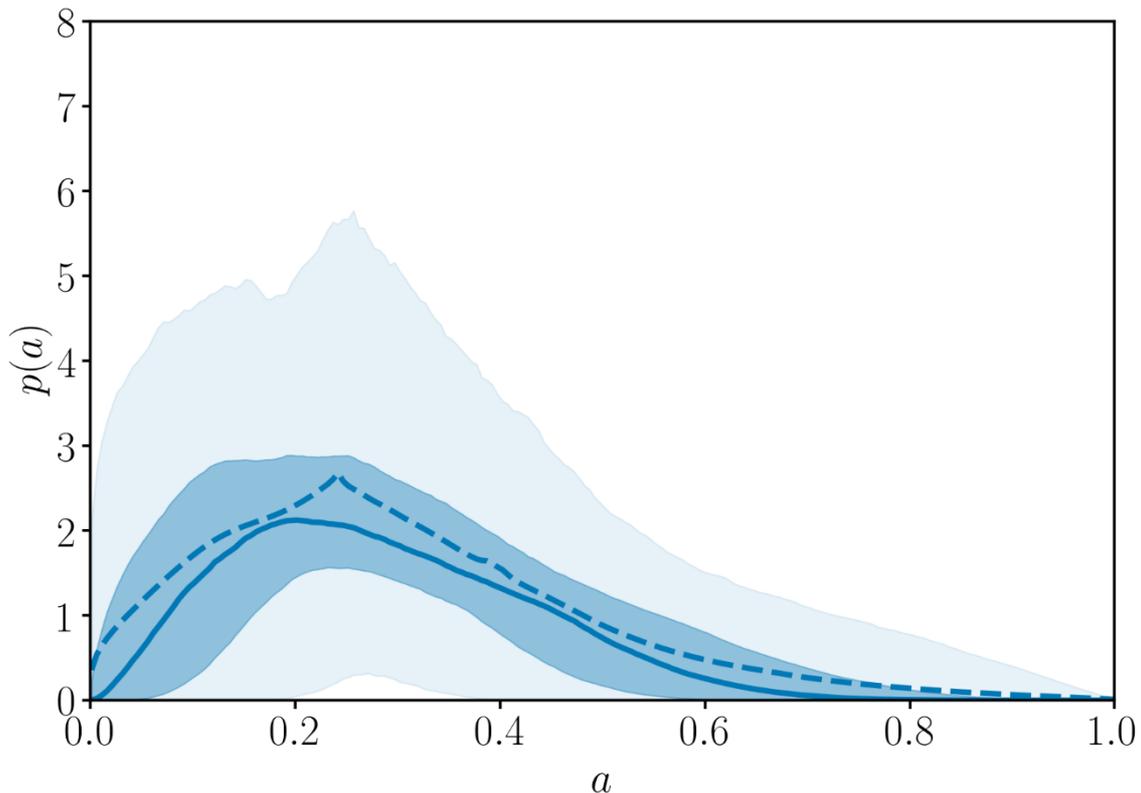
Notablemente, los tres modelos concluyen que prácticamente no hay fusiones de BBHs con masas de sus componentes superiores a 45 masas solares. Las fusiones de BBH masivos se pueden detectar a distancias cosmológicas mucho mayores (es por ello que la mayor parte de nuestras detecciones son de agujeros negros más masivos que los detectados anteriormente por la emisión en rayos X). Sin embargo, esto significa que si las BBHs de masa estelar con masas de sus componentes superiores a 45 masas solares existieron, habríamos esperado detectar alguna con una masa en dicho rango (entre 45 masas solares y alrededor de 100 masas solares). Los diez agujeros negros detectados son consistentes con masas de sus componentes menores que 45 masas solares; por tanto, confiamos en que deben haber muy pocas BBHs, si alguna, con componentes más masivos. Esto ajusta bien las predicciones a partir de la modelización de supernovas, que predice una ausencia de masas en el espectro de masas de agujeros negros en el intervalo entre aproximadamente 50 a 130 masas solares, debido a un tipo de supernova conocido como [supernovas por inestabilidad de pares pulsacional](#). Los tres modelos coinciden entre sí bastante bien, pero aquel que permite una componente adicional Gaussiana a masas mayores resulta ligeramente favorecido con respecto a los otros dos modelos examinados, suministrando una débil evidencia de que la distribución de BBH se desvía de una ley de potencias.

## Distribuciones del spin

Las observaciones de GW procedentes de la coalescencia de objetos compactos revela también información acerca de cómo giran los objetos compactos – tanto cómo de *rápido* giran (lo que se conoce como la magnitud del spin) cuanto cómo de inclinados están los spines con respecto a la órbita de la binaria (lo que se conoce como inclinación del spin). Ambos aspectos proporcionan percepciones únicas sobre *cómo* y *dónde* se formaron los agujeros negros. Por ejemplo, las medidas de la magnitud del spin puede revelar cómo interactúan las diferentes capas dentro de las estrellas masivas, y las inclinaciones del spin pueden ayudar a determinar la intensidad de las explosiones de supernova que forman agujeros negros, así como si un sistema BBH evolucionó como un par de estrellas aislado o se formó en un entorno estelar denso, como un [cúmulo globular](#), a partir de interacciones dinámicas entre estrellas.

A partir de las observaciones presentadas en el catálogo, los datos desfavorecen valores altos del spin, particularmente cuando los agujeros negros individuales giran en la misma dirección que la de la órbita de la propia binaria. La Figura 3 muestra la

distribución de la magnitud del spin inferida usando un modelo en el que las magnitudes del spin se supone obedecen una [distribución beta](#). La distribución de inclinaciones del spin está algo menos restringida (delimitada en parte por los valores pequeños de las magnitudes de los spines, ya que éstos hacen difícil deslizar la dirección de los spines), y no puede hacerse actualmente ninguna afirmación concluyente en cuanto a si los datos sugieren alineamiento, isotropía, o una mezcla de las inclinaciones de los espines.



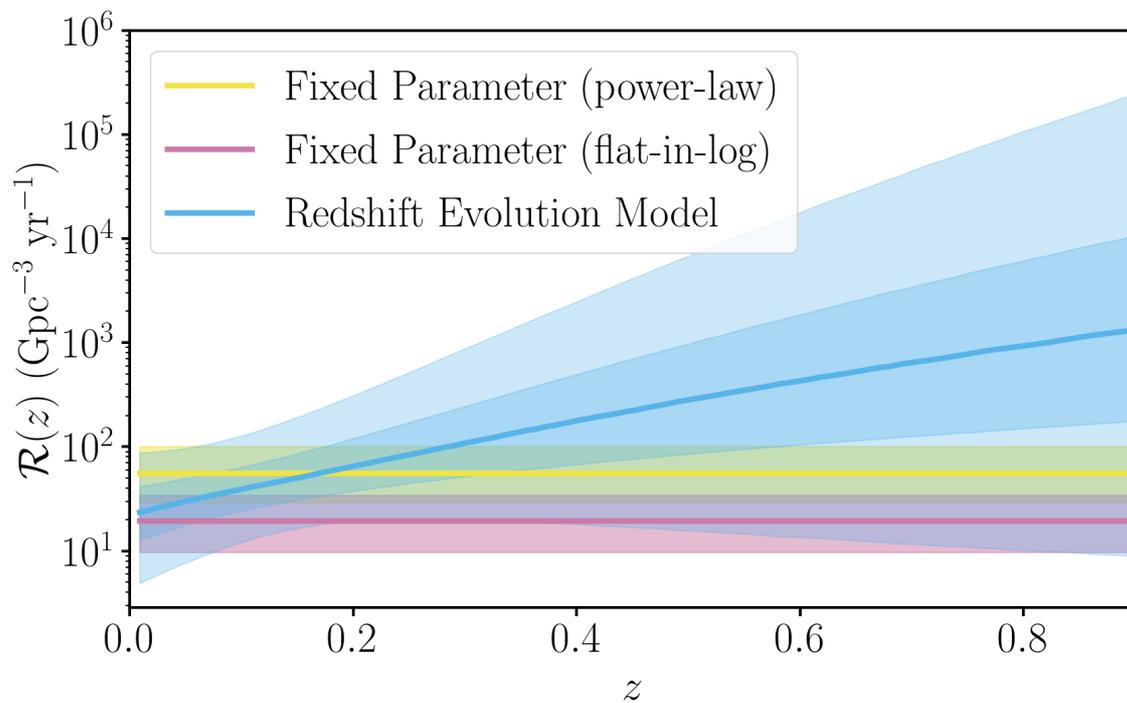
**Figura 3:** Distribución de la magnitud del spin inferida para el modelo de magnitud de spin paramétrico usado en el análisis, en unidades en las que 1 es el spin máximo posible permitido por la relatividad general para un agujero negro. La línea continua, región sombreada oscura, y región sombreada más clara muestran la mediana, los intervalos de confianza al 50% y al 90%, y la línea discontinua muestra la distribución de población posterior. Adaptado a partir de la Figura 7 del artículo.

### Tasa de Evolución con el Desplazamiento al Rojo

A partir de este catálogo de señales, se puede también estimar el número promedio de fusiones de BBH por unidad de tiempo, por volumen espacial como función del [desplazamiento al rojo](#):  $\mathcal{R}(z)$ . Una aproximación vaga es que esta tasa podría ser constante en un [volumen comóvil](#), lo que significa que cada galaxia contribuye en un ritmo aproximadamente constante de fusiones a lo largo de la historia cósmica. Sin embargo, la tasas de densidad de fusiones de BBH probablemente dependa de otros factores, como la tasa de formación estelar en función del desplazamiento al rojo, que no es constante a lo largo de la historia cósmica. Para complicar algo más

la situación, la detección de una señal a un desplazamiento al rojo determinado depende también de las propiedades intrínsecas del sistema particular, tal como cuán de masivo es.

Estimaciones de la tasa de evolución se muestran en azul en la Figura 4. Las líneas en rojo y amarillo muestran los modelos en los que se ha supuesto que la tasa es constante a lo largo de la historia cósmica, y la distribución de masa se fija bien a una ley de potencias o bien a una distribución de logaritmo constante. Mientras que no podemos identificar con seguridad una tendencia con respecto al desplazamiento al rojo, nuestro análisis encuentra un 88% de probabilidad de que la tasa de fusiones de BBH aumente con el desplazamiento al rojo, lo que significa que en el Universo local es probable que sucedan más fusiones de BBH a desplazamientos al rojo más altos. Esto es consistente con el ritmo de formación estelar en el Universo, que fue también mayor en épocas cósmicas más tempranas, y con picos alrededor de un desplazamiento al rojo de 2.



**Figura 4:** Esta figura muestra las restricciones en la evolución de la densidad de la tasa de fusiones de BBH en función del desplazamiento al rojo. En azul, la línea continua proporciona la mediana posterior de la densidad de la tasa de fusiones, y las bandas oscura y clara proporcionan los intervalos de confianza al 50% y al 90%.  
Figura 5 del artículo.

### Conclusiones y perspectivas futuras

A medida que el catálogo de BBHs observadas crezca en los próximos períodos de observación, las incertidumbres en los parámetros del modelo de población irán reduciéndose, y conoceremos qué modelos son los favorecidos por los datos. Entre muchos otros dilemas astrofísicos, tal inferencia puede conducir a un importante

conocimiento sobre cómo los agujeros negros se forman via supernovas, cómo afectan las interacciones en binarias a las estrellas masivas, la dinámica intrínseca de cúmulos estelares densos, y la historia de formación de los agujeros negros a lo largo de la historia cósmica.

## Glosario

- **Agujero Negro:** Región del espacio-tiempo generada por una masa extremadamente compacta donde la gravedad es tan intensa que impide que cualquier cosa, incluida la luz, escape de ella.
- **Binaria de rayos X:** Sistemas de estrellas binarias compuestos por un objeto compacto que acreta material de una estrella donadora. El material que cae se calienta y emite radiación intensa en rayos X.
- **Desplazamiento al rojo:** Efecto por el que la longitud de onda de la luz medida en el punto en que es detectada es más larga que lo era en el que se emitió. Cuando la luz recorre distancias cosmológicas, el desplazamiento al rojo es fundamentalmente debido a la expansión del Universo, y puede ser usado para medir distancias a objetos lejanos.
- **Inferencia Bayesiana:** Método de inferencia estadística que descansa en actualizar la probabilidad de una hipótesis en la medida en que más evidencias estén disponibles.
- **Período de Observación:** Período de observación en el que los detectores de ondas gravitacionales están tomando datos.
- **Sesgo de Malmquist:** Detección preferente de objetos brillantes intrínsecamente.
- **Supernova por Inestabilidad de Pares (Pulsacional):** Tipo de supernova que aparece cuando el apoyo de la presión de radiación de la estrella es drenada debido a la producción de pares electrón-positrón.
- **Volumen Comóvil:** Volumen del espacio que se expande con el tiempo cósmico al mismo ritmo al que las estructuras en el Universo se alejan unas de otras: un volumen comóvil fijo contiene en promedio un número de galaxias constante en el tiempo.

## SABER MÁS:

- Visita nuestras páginas web: <http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
- Lea [aquí](#) el artículo completo, disponible y online.
- Lea [aquí](#) el artículo del catálogo.
- Explore los datos del catálogo [aquí](#), en el [Gravitational Wave Open Science Center](#).