

GW170104: OBSERVACIÓN DE UNA FUSIÓN DE UN SISTEMA BINARIO DE AGUJEROS NEGROS DE 50 MASAS SOLARES CON UN CORRIMIENTO AL ROJO IGUAL A 0.2

INTRODUCCIÓN

En septiembre de 2015 los detectores avanzados de LIGO (observatorio de ondas gravitacionales mediante interferometría láser) llevaron a cabo la primera detección directa de ondas gravitacionales procedentes de la fusión de dos agujeros negros a una distancia mayor de mil millones de años luz. Este evento, conocido como GW150914, llegó un siglo después de la predicción teórica de las ondas gravitacionales propuesta por la teoría de la relatividad general de Albert Einstein. Este evento fue seguido por otro posible evento (conocido como LVT151012) en octubre de 2015 y por una segunda detección confirmada (conocida como GW151226) en diciembre de 2015 - también originada por una fusión de dos agujeros negros.

Advanced LIGO (versión mejorada del experimento LIGO) empezó su segundo periodo de observación a finales de noviembre de 2016, después de que algunas mejoras diseñadas para incrementar la sensibilidad de los detectores fueran instaladas. Después de algo más de un mes, otra nueva detección llamada GW170104 tuvo lugar. En este artículo resumimos cómo GW170104 fue detectada, qué hemos aprendido de los agujeros negros que la originaron, y cómo este nuevo descubrimiento de LIGO puede mejorar nuestra comprensión de la naturaleza de la gravedad y el espacio-tiempo.

DETECCIÓN DE LA SEÑAL GW170104

GW170104 fue observada por los detectores de Advanced LIGO, situados en Hanford, Washington, y en Livingston, Louisiana, siguiendo una alerta automática activada en Livingston. Investigaciones detalladas del estado de los detectores en el momento del evento, similares a las que se llevaron a cabo en las anteriores detecciones (ver aquí y aquí), revelaron que los dos detectores estaban operando con normalidad.

Los dos paneles superiores de la figura 1 muestran los datos medidos por los dos detectores en el momento de la fusión. La señal GW170104 es muy parecida a la señal GW150914: en los dos casos los datos de LIGO claramente muestran la característica forma de “chirp” que se espera de la fusión de dos agujeros negros - una rápida ascensión en amplitud y frecuencia a medida que la velocidad a la que los cuerpos están orbitando va aumentando hasta que se fusionan.

Usando una técnica conocida como filtrado adaptado (ver aquí y aquí), los datos de GW170104 fueron comparados con un banco de modelos de ondas teóricas, para encontrar la que más similar y poder extraer algunas propiedades físicas de las fuentes, como sus masas o su posición en el cielo. Estimaciones aproximadas de estas propiedades fueron enviadas a astrónomos alrededor del planeta para que pudieran buscar contrapartidas electromagnéticas - emisiones en forma de luz que podrían estar asociadas con el evento de onda gravitacional. (Puedes leer más sobre las búsquedas de contrapartidas electromagnéticas de GW150914 aquí).

DETERMINANDO LAS PROPIEDADES DE GW170104

Un análisis más detallado usando filtrado adaptado fue realizado offline durante varias semanas usando supercomputadores muy potentes. El objetivo de este análisis era determinar la significación estadística de la detección calculando la tasa de falsas alarmas del evento - ¿cómo de probable es ver una señal similar a GW170104 simultáneamente en los dos detectores como resultado de coincidencias en su ruido de fondo? Cuanto menor sea la tasa de falsas alarmas, mayor será la significación estadística de la detección. (Más detalles sobre como la tasa de falsas alarmas es calculada para datos de LIGO pueden encontrarse en el resumen científico de GW150914).

Nuestro análisis calculó una tasa de falsas alarmas de menos de una vez cada 70.000 años - ¡suficientemente pequeño para confirmar que GW170104 fue una detección con mucha significación estadística de un evento astrofísico real!

El tercer panel de la figura 1 muestra una comparación entre el modelo que más se aproxima a los datos y los propios datos (expresados como “gravitational-wave strain”, igual a la variación fraccional de la distancia entre dos puntos a medida que una onda gravitacional pasa) observados por los detectores de LIGO en el momento de la fusión. El panel inferior muestra la diferencia residual entre los datos y el mejor modelo teórico, que se ajusta muy bien a los datos.

Análisis adicionales mediante supercomputadores nos permitieron extraer estimaciones más precisas de los parámetros de GW170104 - las características físicas del evento, incluyendo las masas de los objetos que estaban fusionándose, su distancia a la Tierra, su posición en el cielo, la orientación del plano orbital y límites de la razón a la que los objetos están rotando y su órbita está precesionando. El proceso de estimación de parámetros incluye la comprobación de millones de combinaciones de estos parámetros y el ajuste del modelo de onda predicho por cada combinación a los datos medidos por los detectores de LIGO. (Puedes leer más sobre como se hace la estimación de parámetros aquí y aquí).

Podemos estimar la incertidumbre sobre los parámetros de GW170104 tanto individualmente como de manera conjunta. Por ejemplo, la figura 2 muestra qué podemos inferir sobre las masas de los dos objetos compactos, los cuales creemos que tienen masas entre 30 y 20 veces la masa del Sol respectivamente - indicando que GW170104 fue resultado de la fusión de dos agujeros negros. A partir de la masa estimada del agujero negro resultante, calculamos que el equivalente a dos masas solares fueron radiadas en forma de energía de ondas gravitacionales durante la duración del evento. ¡Esto corresponde a un pico en luminosidad de onda gravitacional muchas veces mayor que la potencia luminosa combinada de cada estrella en todo el Universo observable!

También estimamos la distancia a GW170104 y calculamos que este evento probablemente ocurrió al doble de distancia que GW150914, a una distancia de aproximadamente 3 miles de

millones de años luz. De hecho, GW170104 es tan remoto que cuando sus ondas gravitacionales llegaron a la Tierra, las ondas mismas habían sido estiradas un 20% debido a la expansión del Universo - un fenómeno familiar, conocido como corrimiento al rojo cosmológico, patente cuando se observa luz de galaxias distantes.

Una tabla con los mejores ajustes para los parámetros de GW170104 puede encontrarse en el artículo publicado y también en este resumen de datos.

¿QUÉ NOS DICE GW170104?

La población de agujeros negros de masa estelar

GW170104 es la tercera detección directa de ondas gravitacionales, y el cuarto miembro (incluyendo el evento candidato LVT151012) de nuestro creciente retrato familiar de sistemas binarios de agujeros negros con masas medidas directamente. La figura 2 también muestra la comparación de las masas estimadas de los agujeros negros de GW170104 con respecto a los otros tres eventos: podemos ver que GW170104 se sitúa entre GW150914 y LVT151012. Además, esta detección ha mejorado nuestra estimación de la frecuencia a la que las fusiones de agujeros negros ocurren. Aunque esta frecuencia es aún incierta, ya parece inconsistente con algunos modelos astrofísicos de cómo los agujeros negros se forman y fusionan.

Más comparaciones con estos modelos de formación pueden obtenerse a partir de las mediciones de la rotación de los agujeros negros, ya que estos modelos hacen diferentes predicciones sobre cómo de alineados deberían estar los ejes de rotación de los agujeros negros. Aunque estos parámetros de rotación no están muy bien delimitados, nuestras observaciones ya apuntan a una posible tendencia de los ejes de rotación en un sistema binario fusionándose a estar desalineados.

Poniendo a prueba la relatividad general

La adición de una tercera detección de ondas gravitacionales confirmada también ha mejorado nuestra capacidad para poner a prueba algunos conceptos fundamentales de la relatividad general (RG). Combinando nuestras nuevas observaciones con las de GW150914 y GW151226, podemos comprobar algunas predicciones específicas de la RG sobre cómo deben evolucionar los modelos de onda, y buscamos diferencias sistemáticas de estas predicciones con nuestros datos. Los resultados son consistentes con los resultados previos (ver aquí y aquí), ¡con lo que la teoría de Einstein ha pasado la prueba una vez más!

La gran distancia a la que se encuentra GW170104 también nos ha permitido poner a prueba otra predicción de la RG: que las ondas gravitacionales viajan a la velocidad de la luz y son no dispersivas. En algunas situaciones, una onda puede ser dispersada a medida que viaja a través

de un material, es decir, que la onda se “descompone” debido a que diferentes frecuencias viajan a diferentes velocidades. (Ejemplos cotidianos de este efecto incluyen la descomposición de luz blanca en un arco iris, o la distorsión de sonidos escuchados en una piscina debajo del agua). Por otro lado, las ondas de sonido no son dispersadas a medida que viajan en el aire en un auditorio: si fuera así, la audiencia escucharía notas agudas y graves en momentos diferentes.

De acuerdo con la RG, las ondas gravitacionales de GW170104 no deberían haber sido dispersadas a medida que viajaban los miles de millones de años luz hasta nosotros. Para comprobar esto, consideramos un simple modelo para la dispersión, motivado por algunas teorías alternativas a la RG en las que dicho fenómeno sí es predicho, y comparamos estas predicciones con las observaciones de GW170104, combinadas otra vez con las de GW150914 y GW151226.

La figura 3 muestra nuestros límites de la magnitud de la posible dispersión para diferentes valores de un parámetro del modelo llamado α . Podemos ver que sólo una pequeña dispersión está permitida de manera consistente con nuestras observaciones, es decir, que la predicción de la RG (en la que la dispersión sería exactamente cero) ha pasado la prueba de nuevo. Aunque límites aún más restrictivos han sido calculados para la dispersión de ondas electromagnéticas a medida que viajan en el vacío del espacio, nuestro análisis muestra la primera prueba de este fenómeno extendido al campo de las ondas gravitacionales.

El segundo periodo de observación de Advanced LIGO seguirá hasta mediados de 2017, y se espera que Advanced Virgo empiece a tomar datos en breve. A medida que más detecciones se vayan sumando, esperamos adquirir más comprensión de los modelos de formación y evolución de agujeros negros de masa estelar, y poder hacer pruebas aún más rigurosas de la RG.

Figura 1: los dos paneles superiores muestran un gráfico de la evolución de la frecuencia de la señal observada por cada uno de los detectores de LIGO, durante un intervalo de aproximadamente 0.1 segundos alrededor del momento de la detección de GW170104. La amplitud de la señal está representada por la barra de colores. El tercer panel compara el modelo de onda teórico (mostrado en negro) de una fusión de agujeros negros que más se ajusta a los datos observados por los detectores de LIGO. Los datos han sido ajustados para eliminar los tres milisegundos de diferencia en el tiempo de llegada de la señal entre los dos detectores y para tener en cuenta las diferentes orientaciones de sus brazos. El panel inferior muestra la diferencia residual entre los datos y este modelo teórico: podemos ver que esta diferencia no tiene ningún patrón aparente.

Figura 2: esta imagen muestra qué masas de los agujeros negros (en masas solares) son consistentes con la señal GW170104. El mapa de contorno en la parte superior derecha de la figura muestra qué combinaciones de masas son consistentes para los dos agujeros negros en combinación. Las regiones más oscuras del mapa de contorno muestran las combinaciones de masa con más probabilidad de ser correctas. Las barras grises, conocidas como histogramas, muestran la probabilidad relativa de diferentes masas para cada agujero negro considerado de manera independiente, con máximos en 30 y 20 masas solares respectivamente. También se muestran los contornos de probabilidad medidos para los otros eventos.

Figura 3: límites superiores para la magnitud del parámetro de dispersión A , permitidos por los datos de GW170104, para diferentes valores del parámetro α del modelo. El modelo permite tanto valores positivos como negativos para A , y podemos ver qué límites similares son obtenidos para ambos casos. La relatividad general predice un valor exactamente igual a cero.