

MIDIENDO LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO CON ONDAS GRAVITACIONALES

En agosto de 2017 los observatorios de ondas gravitacionales LIGO avanzado y Virgo avanzado detectaron, por vez primera, las ondas gravitacionales procedentes de la fusión de una binaria de estrellas de neutrones. Este extraordinario evento fue también observado de forma extensa por los telescopios sensibles a la luz en todo el rango del espectro electromagnético, lo que posibilitó una identificación precisa de la galaxia asociada a la fuente de ondas gravitacionales. Gracias a la combinación de la distancia a la galaxia medida a partir de las ondas gravitacionales y la velocidad radial deducida de los datos electromagnéticos, hemos podido determinar de forma novedosa y completamente independiente el valor de una magnitud ciertamente relevante en cosmología: el ritmo actual de expansión del universo. Esta medición marca el amanecer de la apasionante e incipiente era de la cosmología de ondas gravitacionales.

UNA BREVE HISTORIA SOBRE LA EXPANSIÓN DE HUBBLE

Hace alrededor de 90 años que los astrónomos descubrieron que nuestro universo se encontraba en expansión, un descubrimiento pionero que revolucionó nuestra manera de entender el cosmos, apoyando ya entonces la [Teoría del Big Bang](#) en cuanto a su origen y evolución, representando hoy en día uno de los pilares de la [cosmología](#) moderna.

A la vanguardia de dicho descubrimiento estaba [Edwin Hubble](#), de quien el [Telescopio Espacial Hubble](#) recibió el nombre. Sus observaciones de las galaxias en el universo cercano revelaron una relación lineal entre sus distancias y sus velocidades de recesión lejos de la Vía Láctea (ver Figura 2), consistente con la interpretación de que las galaxias en general no se movían a través del espacio sino que fueron separadas por la expansión del propio espacio. Este fenómeno de [expansión universal](#) lleva ahora el nombre de Hubble y el actual ritmo de expansión, igual a la constante de proporcionalidad de la relación lineal de Hubble, es conocido como la [constante de Hubble](#). Se representa con el símbolo H_0 y se expresa en unidades de kilómetros por segundo por megaparsec (un parsec es una unidad de distancia aproximadamente igual a un cuarto de un año-luz o 3.086×10^{16} metros). La estimación original de H_0 de Hubble fue de unos $500 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (ver Figura 2), pero este valor fue posteriormente comprobado que se trataba de una sobrestimación muy significativa.

Desde principios del siglo 21 se han desarrollado y aplicado un amplio rango de diferentes métodos para calcular la constante de Hubble, aprovechando una amplia variedad de datos astrofísicos incluyendo observaciones de [variables Cefeidas](#), [supernovas tipo Ia](#), la [relación de Tully-Fisher](#) e incluso observando el [fondo cósmico de microondas](#) (CMB por sus siglas en inglés). Un aspecto clave de muchas medidas de H_0 que usan datos del universo cercano es la necesidad de combinar dos o más indicadores de distancia, empleando lo que suele referirse como [Escala de Distancias](#). Claramente, todo método capaz de evitar los peldaños de esta escala podría ser de gran utilidad, como el enfoque completamente novedoso descrito en este artículo.

De las actuales medidas de la constante de Hubble, destacamos aquí dos de ellas realizadas por métodos diferenciados aplicados a distancias cosmológicas cercanas y muy lejanas respectivamente, y actualmente inconsistentes entre sí: el proyecto [ShoES](#), que combina el estudio de Cefeidas y supernovas de tipo Ia, dando un valor de la constante de Hubble alrededor de un 8% mayor que el valor deducido de las observaciones del CMB por el [satélite Planck](#). Si bien esta diferencia puede no parecer demasiado grande, y siendo mucho más pequeña que las grandes discrepancias entre las diferentes medidas de la constante de Hubble que surgieron durante gran parte del siglo 20, representa sin embargo un importante puzzle aún no resuelto por la cosmología.

UN NUEVO ENFOQUE: LAS SIRENAS ESTÁNDAR

Presentamos aquí un enfoque novedoso para medir la constante de Hubble por medio de las ondas gravitacionales, aplicando por primera vez un método revolucionario propuesto 30 años atrás por Bernard Schutz en su [artículo seminal](#) y posteriormente refinado en [este artículo](#). La idea principal del método es estimar de la distancia a una cierta galaxia usando observaciones de ondas gravitacionales catalogadas como "[sirenas estándar](#)", que son el análogo gravitacional de una "[candela estándar](#)" astronómica, la luminosidad (y por ende la distancia) de las cuales puede ser directamente inferida de las observaciones. Las sirenas estándar son objetos binarios compactos formados tanto por estrellas de neutrones como por agujeros negros, cuya forma de onda gravitacional de tipo "[gorrío](#)" evoluciona cuando los objetos compactos se aproximan en espiral hasta su fusión, transporta información sobre la distancia a la fuente, así como de las masas de los objetos compactos además de otros parámetros del sistema. El análisis de la forma de onda permite estimar la distancia. Nosotros hemos utilizado la fuente GW170817, [detectada por LIGO avanzado y Virgo avanzado](#) el 17 de agosto de 2017, para realizar la primera medida tipo sirena estándar de la constante de Hubble.

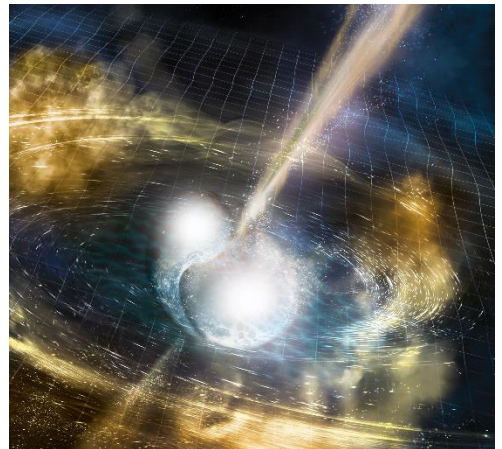


Figura 1: Ilustración artística de la fusión de dos estrellas de neutrones. Los estrechos haces de luz representan la emisión en rayos gamma. Las ondulaciones de la cuadrícula espacio-temporal son reflejo de las ondas gravitacionales isotrópicas que caracterizan la fusión. Los remolinos de material eyectados en la fusión de las estrellas podrían ser la fuente de la luz de baja energía observada. Crédito: National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simanet.

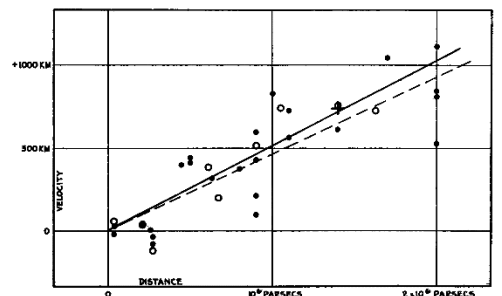


Figura 2: Gráfica esquemática de la relación de Hubble, adaptada con los datos tomados en 1929 por Edwin Hubble. La relación lineal entre la velocidad radial (eje vertical, que en el artículo original de Hubble fue referenciado equivocadamente en kilómetros) y la distancia (eje horizontal, referenciado en parsecs) es evidente, aunque hay una dispersión considerable en los datos y el rango de distancia se extiende solamente hasta unos 2 Mpc. Crédito: Proc. Nat. Acad. Sciences. (1929)

GW170817 representa la primera vez que las [ondas gravitacionales y electromagnéticas](#) de una misma fuente astrofísica han sido observadas. Esta observación conjunta apoya la hipótesis de que la fuente procede de la fusión de dos estrellas de neutrones, lo que ha permitido también la identificación de la galaxia huésped, una galaxia conocida como [NGC4993](#) en la constelación de Hidra. El análisis de la onda gravitacional GW170817 permitió la estimación de la distancia en aproximadamente 44 Mpc bajo la hipótesis de que la posición en el cielo de GW170817 era exactamente coincidente con NGC 4993. Esta estimación de distancia tiene una incertidumbre del 15%, resultante de la combinación del ruido instrumental en los detectores y el hecho de que no conocemos de manera precisa la inclinación del [plano de la órbita](#) de la binaria de estrellas de neutrones con respecto a la Tierra (ver la [Figura 4](#)). No obstante, nuestra estimación de la distancia usando ondas gravitacionales tiene la gran ventaja de ser completamente independiente de la Escalera Cósmica de Distancia derivada de las observaciones electromagnéticas.

UNA MEDICIÓN SIRENA ESTÁNDAR DE H_0

Para estimar H_0 es necesario combinar la distancia a NGC4993 obtenida mediante las ondas gravitacionales con la velocidad radial de la galaxia debida a la expansión de Hubble. Sin embargo, no podemos simplemente medir la velocidad radial de NGC4993 ya que la expansión del universo no es suave y uniforme en todos sus puntos: la ‘granulación’ del universo modifica la expansión de Hubble en escalas pequeñas ya que las galaxias tienen movimientos propios (conocidos como ‘[velocidades peculiares](#)’) causados por la atracción gravitacional de otras galaxias y cúmulos de galaxias (y también por la invisible [materia oscura](#)) en sus alrededores. La relativa cercanía de NGC4993 implica que el valor de su velocidad peculiar sea probablemente una parte significativa de su velocidad radial medida y, por tanto, no puede ser ignorada.

La velocidad peculiar de NGC4993 se tuvo en cuenta identificando primero un pequeño grupo de galaxias con las que está asociada, para después usar los resultados de velocidades peculiares en una muestra de galaxias mucho mayor. Así, se pudo corregir el movimiento del grupo como conjunto. Esto proporcionó una estimación de la ‘velocidad Hubble’ para NGC4993 (es decir, la velocidad que hubiera tenido si en ella solamente actuara la expansión de Hubble) de unos 3000 km s^{-1} . Este resultado fue comparado con los resultados obtenidos por otros métodos para reconstruir patrones de velocidades peculiares de galaxias a gran escala, y descubrimos que eran absolutamente consistentes entre sí. Como medida de precaución, consideramos una incertidumbre amplia de unos 150 km s^{-1} en nuestros cálculos de velocidad peculiar a la vez que identificamos el 15% de incertidumbre en el cálculo de la distancia usando ondas gravitacionales como el efecto dominante en la estimación de H_0 .

En la figura 3 resumimos nuestras medidas para la constante de Hubble. La curva continua azul representa la probabilidad de diferentes valores de H_0 , estando el pico situado a $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, mientras que las líneas discontinuas y punteadas respectivamente indican los límites de los [intervalos de confianza](#) para H_0 , es decir, los rangos en los que nuestros análisis indican dónde se encuentra la constante de Hubble con una cierta probabilidad. En la Figura 4 se muestran los valores límites de H_0 junto con los de la inclinación de la binaria de estrellas de neutrones y se ilustra la degeneración existente entre ambas magnitudes. Esto significa que nuestros datos asignan probabilidades similares a ciertas combinaciones de H_0 y la inclinación de la fuente. Esta degeneración se debe a la gran correlación entre la distancia y el ángulo de inclinación para una fuente dada de ondas gravitacionales: la amplitud de la onda gravitacional emitida por una binaria lejana vista ‘de cara’ o ‘del revés’ es similar a la de la misma fuente pero ahora cercana y vista ‘de costado’. La degeneración es la responsable de la cola de baja probabilidad para valores altos de H_0 en la Figura 3, ya que la curva continua se obtiene esencialmente proyectando sobre el eje vertical el mapa de contorno de la Figura 4.

CONCLUSIONES

Hemos medido por primera vez el valor de la constante de Hubble usando observaciones de ondas gravitacionales y electromagnéticas. Nuestra estimación es consistente con los valores de H_0 obtenidos tanto mediante datos de fuentes cercanas como cosmológicos, representados por los análisis de SHoES y Planck respectivamente, además de haber sido derivados de forma completamente independiente de la tradicional Escalera Cósmica de Distancias. Esto marca un hito importante en la larga historia de la medición del ritmo de expansión del universo y, además, prevemos tener medidas cada vez más precisas de esta magnitud fundamental gracias a las futuras observaciones de ondas gravitacionales. ¡La era de la cosmología de ondas gravitacionales ya está aquí!

FIGURAS DE LA PUBLICACIÓN

Para más información sobre el significado de estas figuras, lea el artículo completo [aquí](#).

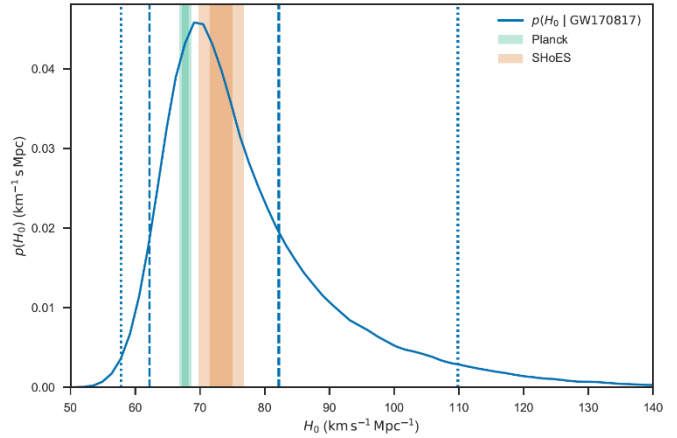


Figura 3: Gráfica que resume los resultados de la inferencia de la constante de Hubble. La probabilidad relativa de los diferentes valores de H_0 está representada por la curva continua azul, que es máxima en $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Las líneas verticales discontinuas y punteadas muestran los límites de los intervalos de confianza del 68.3% y 95.4% para H_0 , respectivamente. Las líneas verticales verde y naranja son cotas en H_0 calculadas usando datos electromagnéticos: las banda verde muestran el rango de valores inferidos del análisis de los datos del CMB obtenidos por el satélite Planck; las bandas naranjas muestran el rango de valores inferidos por SHoES, que combina datos de Cefeidas con datos de supernovas los obtenidos del universo cercano. Las zonas más y menos oscuras de las bandas coloreadas indican el 68.3% y 95.4% de los intervalos de confianza respectivamente. Nótese que las regiones del 95.4% de probabilidad de Planck y *shoES* no concuerdan entre sí. Nuestro resultado obtenido con las ondas gravitacionales es, sin embargo, consistente con los resultados de Planck y SHoES.

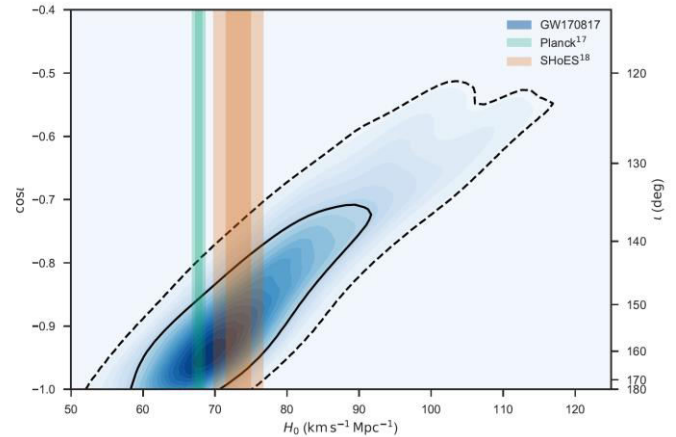


Figura 4: Mapa de contorno que resume la inferencia de manera conjunta de la constante de Hubble (eje horizontal) y la inclinación del plano orbital de binaria de estrellas de neutrones (eje vertical); el eje de la derecha muestra el ángulo de inclinación en grados y el eje de la izquierda muestra el coseno del ángulo de inclinación. Las zonas sombreadas más oscuras señalan la región de más probabilidad. Nótese la significativa correlación entre los ángulos de inclinación y el valor inferido de la constante de Hubble. Esto se produce debido a la significativa correlación entre la distancia y el ángulo de inclinación para una fuente dada: la amplitud de la onda gravitacional emitida por una binaria lejana vista ‘de cara’ y ‘del revés’ es similar a la misma fuente pero ahora cercana y vista ‘de costado’. La región de probabilidad más alta se corresponde con ángulos de inclinación cercanos a los 180 grados, lo que indica que GW170817 fue visto casi del revés’.



Visite nuestras páginas web :
<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>

