

## MEJORANDO LAS MEDICIONES DE LA EXPANSIÓN CÓSMICA CON ONDAS GRAVITACIONALES

En una nueva publicación de LIGO, Virgo y KAGRA, se ha utilizado un conjunto de 47 fuentes de ondas gravitacionales del recién publicado [Tercer Catálogo de Fuentes de Ondas Gravitacionales Transitorias GWTC-3](#) para medir el ritmo local de expansión del Universo. A partir de sus formas de onda, hemos estimado las distancias de estas fuentes GWTC-3, que comprenden las fusiones de binarias de agujeros negros, binarias de estrellas de neutrones y de sistemas mixtos estrella de neutrones-agujero negro. Derivamos entonces información sobre el [desplazamiento al rojo](#) de estos sistemas binarios a partir de la distribución medida de sus masas, o a partir de la distribución de desplazamientos al rojo cartografiada por el catálogo de galaxias [GLADE+](#), y combinamos estas medidas para inferir una nueva y significativamente mejorada estimación de la [constante de Hubble](#). Con la promesa de obtener muchas más detecciones de ondas gravitacionales (GW) durante los próximos años, nuestro nuevo método para explorar la expansión cósmica podría arrojar pronto algo de luz sobre la actual “[tensión de Hubble](#)”: la fuerte y desconcertante discrepancia entre las mediciones de la constante de Hubble obtenidas con diferentes métodos.

### Cosmología y Ondas Gravitacionales en pocas palabras

En la década de 1920, Georges Lemaître y Edwin Hubble descubrieron que nuestro universo está en expansión (véase la [Figura 1](#) para una ilustración). Este avance revolucionó nuestra comprensión del cosmos y sustenta la [teoría del Big Bang](#), una de las piedras angulares de la [cosmología](#) moderna.

El ritmo de expansión local del universo se mide utilizando la constante de Hubble, que se denota con  $H_0$  y está expresada en unidades de kilómetros por segundo por [Megaparsec](#) (Mpc). Sin embargo, incluso después de casi un siglo, el valor de la constante de Hubble aún no se ha

determinado con precisión. Existen claras inconsistencias entre las mediciones más recientes (en su mayoría en el rango de 65 a 80  $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ ) utilizando diferentes métodos. Por ejemplo, podemos inferir la constante de Hubble indirectamente a partir de las mediciones de la primera luz del Universo, cuando su edad era de unos 380.000 años, conocida como fondo cósmico de microondas, o [CMB](#), y este enfoque arroja valores muy cercanos a  $H_0 = 68 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ . Como alternativa, podemos determinar la constante de Hubble de forma más directa a partir del estudio del brillo de las [supernovas de tipo Ia](#) y de las estrellas pulsantes conocidas como [variables Cefeidas](#), lo que arroja valores muy cercanos a  $H_0 = 74 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ . Estos valores están en profundo desacuerdo, teniendo en cuenta sus incertidumbres tan pequeñas, y la discrepancia es demasiado grande para que se deba simplemente a las inevitables variaciones aleatorias que esperamos de las distintas mediciones. Esta llamada “tensión de Hubble” se ha convertido, por tanto, en un problema importante en cosmología.



*Figura 1. Representación esquemática de la expansión cósmica, en la que las galaxias se alejan unas de otras en la superficie de un globo en expansión. (Créditos: Eugenio Bianchi, Carlo Rovelli y Rocky Kolb)*

Mientras tanto, [desde 2015](#) hemos abierto una ventana completamente nueva para observar el Universo, basada no en las ondas electromagnéticas (es decir, la luz, producida por el desplazamiento de cargas eléctricas) sino en las ondas gravitacionales (producidas por la aceleración de masas). Las GWs son "arrugas", o perturbaciones, en el tejido del espacio-tiempo. Fueron predichas por Albert Einstein en 1917 y su observación es una hermosa confirmación de su [teoría de la Relatividad General](#). Una de las fuentes más intensas de ondas gravitacionales que se conocen en el Universo son las parejas de objetos extremadamente densos y compactos conocidos como [agujeros negros](#) o [estrellas de neutrones](#). A medida que estas estrellas giran una alrededor de la otra, atadas por la gravedad, pierden energía mediante la emisión de GWs y su órbita se encoge hasta que se fusionan en un único agujero negro.

Si observamos la emisión GW de la fusión de un sistema binario compacto de este tipo, el análisis de la señal gravitacional de la fusión y su evolución nos permite [medir directamente la distancia al sistema binario](#). Esto contrasta con muchos otros métodos más tradicionales para medir las distancias cosmológicas (incluidas las Cefeidas y las supernovas de tipo Ia mencionadas anteriormente), que se basan en múltiples pasos de calibración a través de lo que los astrónomos denominan la [escalera de distancias cósmicas](#).

Esta exquisita propiedad de ser un indicador de distancia [autocalibrado](#), capaz de saltarse los peldaños de la escalera de distancias cósmicas, ha alimentado un gran interés por estas fuentes binarias compactas de GW, que se denominan "[sirenas estándar](#)". Si la distancia directa medida a una sirena estándar puede combinarse con información independiente sobre la velocidad a la que la fuente se aleja de nosotros -que podemos deducir del [desplazamiento al rojo](#) de la galaxia anfitriona de la fuente-, podemos medir la constante de Hubble.

## Girando hacia el lado oscuro

En el caso de una fusión binaria de estrellas de neutrones con una contrapartida electromagnética (por ejemplo, óptica), el desplazamiento al rojo de la galaxia anfitriona es fácil de medir. La primera estrella de neutrones binaria que se descubrió en GWs, [GW170817](#), venía con una contrapartida electromagnética brillante. Esto condujo a la pronta identificación de la galaxia ([NGC4993](#)) que albergaba la fusión de la binaria de estrellas de neutrones, y su desplazamiento al rojo se combinó con la distancia GW directa medida a GW170817 para obtener la [primera medición de la constante de Hubble con ondas gravitacionales como sirenas estándar](#).

Por desgracia, la mayoría de las fusiones binarias, y en particular las de agujeros negros binarios (BBH), no tienen contrapartidas electromagnéticas asociadas. Sin embargo, en ausencia de tal contrapartida que indique directamente la galaxia anfitriona de cada fuente, aún podemos utilizar nuestras observaciones GW para obtener información sobre el desplazamiento al rojo de las fuentes.

En primer lugar, podemos aprovechar el hecho de que las masas de los BBH que medimos, en el marco de referencia de nuestros detectores LIGO y Virgo, están desplazadas al rojo por la expansión cósmica, es decir, las masas de los BBH parecen ser mayores de lo que realmente son, al igual que la luz de una galaxia que se aleja se desplaza de forma similar a longitudes de onda más largas (más rojas). Esto significa que la distribución estadística de las masas de los BBH que medimos también puede, en principio, proporcionar información sobre la distribución estadística de los desplazamientos al rojo de nuestra población de fuentes. Podemos combinar esta información con sus distancias medidas para inferir la constante de Hubble.

En segundo lugar, podemos utilizar las observaciones de GW para restringir la posición de la fuente en el cielo y, de este modo, reducir la potencial galaxia anfitriona a un conjunto de galaxias candidatas en esta región. La combinación de la información sobre el desplazamiento al rojo medida directamente para todas estas posibles galaxias anfitrionas nos permite inferir  $H_0$  estadísticamente, como se describió por primera vez en un [artículo seminal de 1986](#) de Bernard Schutz.

**Visita nuestras páginas web:**

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



**Saber más:**

Lea el artículo científico completo:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100185/public/main>

Cesión de datos de GWTC-3:

<https://www.gw-openscience.org/>

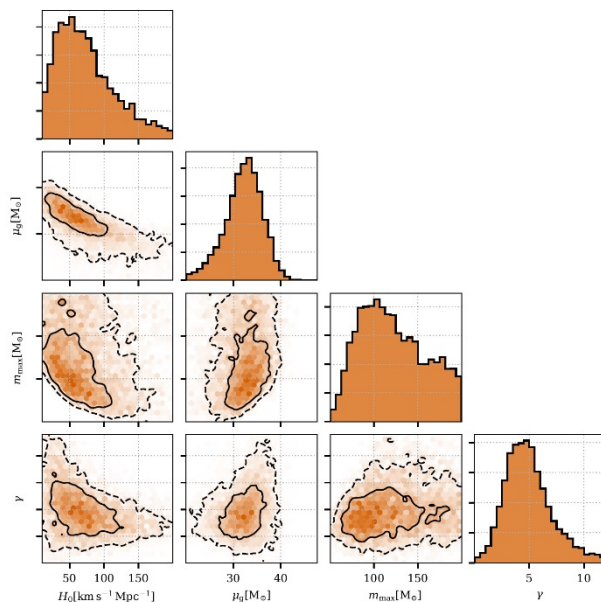
Por tanto, nuestras observaciones de GW, incluso sin contrapartidas electromagnéticas, pueden servir como "sirenas estándar oscuras".

## ¿Cómo funciona esto?

Para entender con más detalle cómo podemos utilizar las masas desplazadas al rojo de nuestra población de BBH para medir la constante de Hubble, supongamos que las masas de los agujeros negros de nuestro universo siguen una distribución con un claro pico, debido a algún proceso físico relacionado con su formación. (De hecho, existe cierto apoyo a la existencia de dicho pico, basado en la predicción teórica de que los remanentes de los agujeros negros estelares tienen una masa máxima permitida, ya que las estrellas más masivas explotarían de forma tan violenta que no quedaría nada detrás, un fenómeno conocido como [Supernova de Inestabilidad de Pares](#)). Aunque sólo podemos medir las masas desplazadas al rojo de cada BBH, podemos esperar no obstante que la distribución observada de estas masas desplazadas al rojo también tenga una huella de ese pico, aunque también desplazada al rojo por la expansión cósmica. Así pues, el pico observado en la distribución de masas nos indica los desplazamientos al rojo de los BBH, y podemos combinar esa información con nuestras distancias medidas de los BBH para inferir la tasa de expansión del Universo.

Nuestro segundo método estadístico para medir  $H_0$  consiste en utilizar un catálogo de galaxias, conocido como GLADE+, que recopila sistemáticamente información sobre el desplazamiento al rojo, el brillo, el color y otras propiedades de (¡literalmente!) millones de galaxias en nuestra región del Universo. Dado que los datos de GW nos indican la posición en el cielo y la distancia de cada sirena estándar, podemos correlacionar esa información con nuestro catálogo GLADE+ para identificar posibles galaxias anfitrionas en las que podría haberse producido la sirena. En la práctica, esta asociación se expresa como una probabilidad porque nuestra determinación de la ubicación en el cielo de la sirena suele ser no muy precisa, por lo que no se identifica una única galaxia huésped potencial. En su lugar, puede haber cientos, o incluso miles, de posibles anfitrionas, cada una con una probabilidad diferente de ser la verdadera. La asociación también depende del valor de la constante de Hubble, ya que ésta determina la relación entre la distancia y el desplazamiento al rojo.

También hay que tener en cuenta que los muestreos de galaxias son *incompletos*, es decir, no contienen todas las galaxias del volumen estudiado, ya que, por ejemplo, las galaxias más lejanas, más pequeñas o menos luminosas, pueden ser demasiado débiles para ser detectadas. Sin embargo, al promediar cuidadosamente los desplazamientos al rojo de sus posibles galaxias anfitrionas, podemos caracterizar el desplazamiento al rojo de cada sirena, y así combinar esa información con la distancia GW de la sirena para medir de nuevo el valor de  $H_0$ .



**Figura 2.** (Figura 5 de nuestra publicación). [Distribuciones de probabilidad posteriores](#) para los valores de la constante de Hubble ( $H_0$ ) y los parámetros de nuestro modelo para la distribución de masas en la población de BBH, inferidos conjuntamente de nuestro análisis basado en la población de las fuentes de BBH que seleccionamos de GWTC-3. El panel más a la derecha de cada fila muestra la distribución de probabilidad para un solo parámetro, con la distribución  $H_0$  mostrada en la parte superior de la figura. Los otros paneles muestran la distribución de probabilidad conjunta de cada par de parámetros. Las líneas continuas y discontinuas delimitan las regiones dentro de las cuales tenemos, respectivamente, un 90% y un 50% de confianza en los valores reales de los parámetros.

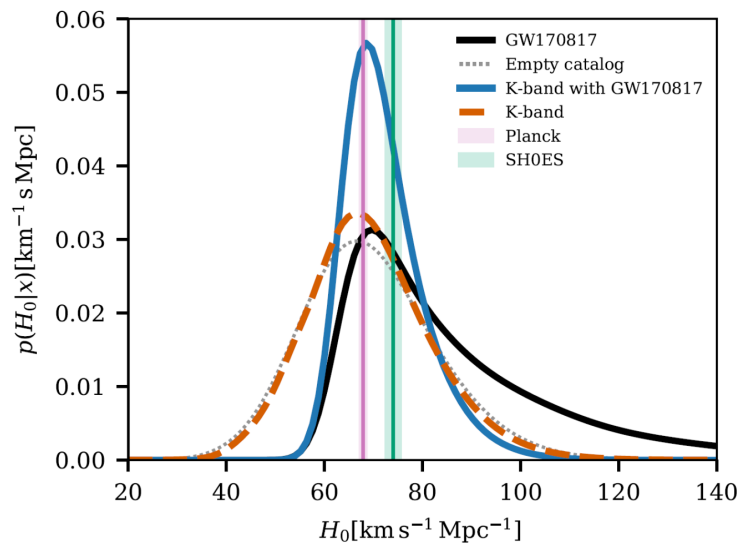
## ¿Cómo lo hicimos?

Nuestra publicación presenta los resultados de nuestros análisis utilizando los dos enfoques descritos en la sección anterior: el método basado en la población y el método del catálogo, aplicados a los eventos GW que seleccionamos de GWTC-3. En el caso de nuestro método basado en la población, que utiliza la distribución de masas de BBH desplazadas al rojo, es la primera vez que un análisis ha restringido simultáneamente las propiedades de la población de BBH y los parámetros cosmológicos que determinan la expansión del Universo. De hecho, nuestro análisis ajustó no sólo la constante de Hubble, sino también los parámetros adimensionales que determinan la cantidad de [materia oscura](#) y [energía oscura](#) en el Universo, contribuyendo a lo que se conoce como el "Modelo Estándar" de la cosmología – habitualmente llamado "[Lambda CDM](#)".

Descubrimos que los datos del GWTC-3 todavía no aportan ninguna restricción útil sobre el contenido de materia y energía oscuras del Universo. Esto no es sorprendente, ya que esos parámetros deberían ser más importantes para los BBHs observados a mayor distancia (y desplazamiento al rojo) que las fuentes del GWTC-3 que estudiamos. Por otro lado, nuestros resultados sugieren que las perspectivas futuras para aprender sobre la materia y la energía oscuras a partir de la población de BBH son alentadoras, a medida que nuestros detectores se vuelven más sensibles y observamos sirenas más lejanas.

Sin embargo, los resultados de la constante de Hubble derivados de la aplicación de nuestro método basado en la población son más informativos. La **Figura 2** muestra las restricciones combinadas que obtuvimos sobre  $H_0$  y los parámetros de nuestro modelo poblacional; esta figura indica que (al menos para este modelo poblacional en particular) nuestros datos parecen favorecer valores algo más bajos de la constante de Hubble. Cuando combinamos las restricciones poblacionales con la medición de  $H_0$  de [GW170817 y su contrapartida electromagnética](#), estimamos un valor de  $H_0 = 68^{+13.7}_{-7}$  km s<sup>-1</sup> Mpc<sup>-1</sup>, lo que representa una mejora del 13% respecto a nuestro [resultado previamente publicado](#) utilizando los BBHs de nuestro primer Catálogo de Transitorios de Ondas Gravitacionales, [GWTC-1](#). (Obsérvese que las propiedades de nuestras estimaciones de distancia a las ondas gravitacionales hacen que la incertidumbre sobre  $H_0$  sea "asimétrica").

Los resultados de nuestro segundo método, que utiliza el catálogo GLADE+, también son alentadores. En este caso, primero tenemos que asumir nuestro modelo para las propiedades de la población de BBH; adoptamos los parámetros del modelo (que comprende una [ley de potencia](#) más un [pico Gaussiano](#) para describir la distribución de las masas de los agujeros negros) que da el mejor ajuste [a la población de BBH observada](#). Combinando la información de GLADE+ con estos parámetros fijos del modelo de población de BBH, estimamos un valor de  $H_0 = 68^{+8}_{-6}$  km s<sup>-1</sup> Mpc<sup>-1</sup>, que representa una mejora del 41% respecto a nuestra [estimación correspondiente de GWTC-1](#). La **Figura 3** muestra este nuevo resultado, donde vemos que nuestro valor de la constante de Hubble es consistente con las estimaciones de  $H_0$  tanto del CMB como de las supernovas de tipo Ia más las Cefeidas (mostradas como las bandas verticales magenta y verde respectivamente), aunque todavía no es lo suficientemente preciso como para ayudar a resolver la "tensión de Hubble" entre esas mediciones.



**Figura 3.** (Figura 9 de nuestra publicación). [Distribuciones de probabilidad posteriores](#) para la constante de Hubble ( $H_0$ ) correspondientes a diferentes análisis. Cada distribución de probabilidad es una curva que representa nuestra mejor estimación del valor de  $H_0$  tras realizar nuestro análisis. La línea negra continua muestra el resultado utilizando sólo el evento BNS GW170817 y su contrapartida electromagnética. La línea de puntos azul muestra el resultado de nuestro análisis sin utilizar ninguna información del catálogo de galaxias. La línea azul continua y la naranja discontinua hacen referencia a los resultados de los análisis que consideran el catálogo de galaxias con y sin incluir también el evento BNS respectivamente. (Nótese que se utiliza el catálogo de galaxias en banda K, que coteja los datos de las galaxias para un rango particular de longitudes de onda centrado en el infrarrojo). Por último, las dos bandas verticales (magenta y verde) muestran las restricciones sobre  $H_0$  obtenidas a partir del CMB (Planck) y las Supernovas + Cefeidas (SH0ES) respectivamente.

## Resumen y perspectivas futuras

Aunque las restricciones sobre la constante de Hubble obtenidas en nuestra publicación mejoran los resultados publicados anteriormente, reconocemos que dependen de los detalles de cómo modelamos la población de BBH. Para casi todos los eventos de GWTC-3 que analizamos utilizando el método basado en el catálogo, nuestros resultados se ven fuertemente afectados por las suposiciones que hacemos sobre este modelo de población. El único evento en el que esto no fue así es [GW190814](#), que estaba mucho mejor localizado en el cielo que las otras sirenas oscuras, lo que significa que la coincidencia entre su volumen de localización y los datos de GLADE+ proporcionó alguna información útil sobre la constante de Hubble.

En los próximos años, los detectores [LIGO](#) y [Virgo](#) se someterán a nuevas actualizaciones para mejorar su sensibilidad y se les unirá primero [KAGRA](#) (para nuestro [cuarto periodo de observación O4](#), previsto provisionalmente para finales de 2022) y, más adelante en esta década, [LIGO India](#). Se espera que esta red de detectores mejorada proporcione un número mucho mayor de sirenas brillantes y oscuras bien localizadas, por lo que podemos anticipar que nuestras restricciones sobre la constante de Hubble a través de la aplicación del método del catálogo mejorarán, especialmente si se incluyen en nuestros análisis nuevos estudios de galaxias más profundos y más completos hasta un mayor desplazamiento al rojo.

Dado que en los próximos años se prevén tasas significativamente mayores de detecciones de BBH, también podemos esperar que mejoren los resultados de la futura aplicación de nuestro método basado en la población. Dentro de unos años podemos esperar análisis que restrinjan simultáneamente tanto las propiedades de la población de BBH (teniendo en cuenta modelos de población más generales que los que hemos considerado en esta publicación) como los parámetros de nuestro modelo cosmológico -incluyendo no sólo la constante de Hubble sino también la influencia de la materia oscura y la energía oscura en la expansión cósmica. ¡Las perspectivas de futuro de la cosmología GW con sirenas estándar parecen brillantes!

### GLOSARIO

**GLADE+:** Nueva y ampliada recopilación de catálogos de galaxias, que contiene datos de unos 22 millones de galaxias, utilizados para proporcionar información sobre el desplazamiento al rojo de las posibles galaxias anfitrionas de nuestros eventos de GW. Un artículo científico de libre acceso que describe el catálogo GLADE+ está disponible [aquí](#).

**Megaparsec:** Unidad de distancia comúnmente utilizada en cosmología. Un megaparsec equivale a un millón de parsecs, donde un [parsec](#) equivale a unos tres años luz y cuarto o  $3,086 \times 10^{16}$  metros.

**Constante de Hubble:** Parámetro utilizado para medir la velocidad de expansión del universo. Su valor actual se indica con el símbolo  $H_0$  y se mide en unos  $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

**Teoría del Big Bang:** Explicación del origen y la evolución del universo observable que describe cómo el universo comenzó hace unos 14.000 millones de años y se expandió a partir de un estado inicial muy caliente y denso. La teoría del Big Bang está ampliamente aceptada como explicación de muchas de las propiedades observadas del universo, incluida [la abundancia de los elementos químicos más ligeros](#) y la existencia de la [radiación cósmica de fondo de microondas](#).

**Fondo Cósmico de Microondas (CMB):** Radiación electromagnética procedente de una etapa temprana de la evolución del universo, cuando éste tenía unos 380.000 años de antigüedad. El CMB también se conoce como "radiación remanente" que queda del Big Bang. Para más información, consulte [aquí](#).

**Supernova de tipo Ia:** Mecanismo particular de explosión de una enana blanca, que acreta material de una estrella gigante roja compañera, cuya masa llega a ser mayor que el [límite de Chandrasekhar](#) de 1.4 veces la [masa solar](#). Las distancias de las supernovas de tipo Ia pueden estimarse de forma fiable, ya que todas ellas explotan con un pico de brillo intrínseco, o [luminosidad](#), bastante similar, lo que las convierte en útiles [candelas estándar](#).

**Cefeida:** Tipo de estrella variable pulsante que experimenta cambios periódicos de radio y temperatura, lo que provoca cambios regulares y periódicos en su luminosidad. Midiendo su período de pulsación, los astrónomos pueden estimar de forma fiable la distancia de las estrellas variables cefeidas.

**Escalera de distancias cósmicas:** Combinación de métodos mediante la cual la comunidad astronómica determina la distancia de los objetos en el universo. Las distancias a los objetos remotos, que suelen basarse en las relaciones empíricas entre sus propiedades se basan en mediciones geométricas más

directas de las distancias a los objetos cercanos, normalmente dentro de la Vía Láctea. Para más información, consulte [aquí](#).

**Agujero negro:** Región del espacio-tiempo causada por una masa extremadamente compacta donde la gravedad es tan intensa que impide la salida de cualquier cosa, incluida la luz.

**Estrella de neutrones:** Restos del proceso de supernova sufrido por una estrella con una masa entre 10 y 25 veces la de nuestro Sol. Las estrellas de neutrones típicas tienen una masa de alrededor de 1-2 masas solares y un radio de 10-15 kilómetros, siendo algunos de los objetos más compactos jamás descubiertos.

**Supernova de inestabilidad de pares (PISN):** Tipo de explosión de supernova que se prevé que ocurra en una estrella con una masa superior a unas 130 masas solares. La producción de [pares de electrones y positrones](#) en el núcleo provoca una drástica caída de la presión que soporta la estrella, lo que lleva a una explosión termonuclear desbocada que no deja ningún remanente estelar.

**Desplazamiento al rojo:** Aumento de la longitud de onda (del sonido, la luz o las ondas gravitacionales) debido al movimiento de la fuente con respecto al observador. Debido a la [expansión cosmológica del universo](#), objetos como las galaxias se alejan de nosotros y la luz y otras radiaciones electromagnéticas procedentes de ellas tienen una mayor longitud de onda.

**Materia oscura:** Misteriosa forma de materia que constituye aproximadamente el 85% de la masa del Universo. Es oscura porque no emite luz ni interactúa electromagnéticamente. Muchas teorías sobre la materia oscura predicen que se trata de algún tipo de partícula fundamental, pero también es interesante considerar la posibilidad de que los objetos más oscuros que conocemos (¡los agujeros negros!) puedan ser un componente de la materia oscura.

**Energía oscura:** Componente misterioso y desconocido del contenido de materia y energía del cosmos que domina el comportamiento del Universo en sus escalas más grandes y se cree que es la causa de la [aceleración de la expansión del Universo](#). El modelo más sencillo para la energía oscura es el de una llamada constante cosmológica que ejerce una presión negativa, lo que provoca una expansión acelerada.

**Distribución de probabilidad posterior:** Gráfico o diagrama que muestra la probabilidad de diferentes valores de una determinada propiedad física, tras analizar nuestros datos, estimados mediante un proceso conocido como [inferencia bayesiana](#).