

Las semillas oscuras del universo: una pista sobre los primeros segundos

Elizabeth América Flores Frías y Tadeo Dariney Gómez Aguilar

La Dra. Flores Frías es Ingeniera Química egresada de la FCQel de la UAE-Mor. Posteriormente, cursó la Maestría y Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la UAEmor. Actualmente, se encuentra haciendo su posdoctorado en el Instituto de Ciencias Físicas (ICF) de la UNAM, desarrollando síntesis de inhibidores de corrosión mediante plasma. El Mtro. Gómez Aguilar es Ingeniero en Sistemas Computacionales, egresado de la Universidad Valle del Grijalva. Posteriormente, obtuvo la Maestría en Física en la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la Universidad Autónoma de Chiapas. Actualmente, es alumno del programa de Doctorado en Ciencias Físicas en el ICF-UNAM. Su investigación se enfoca en la cosmología del universo temprano, con especial atención al estudio de Agujeros Negros Primordiales y Ondas Gravitacionales.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

¿Qué había antes del Big Bang?

Las grandes preguntas suelen tener breves respuestas [1]. En este sentido, a lo largo de nuestra historia, nos hemos planteado preguntas como: ¿De dónde venimos? ¿Cuál es el origen de nuestro Universo? ¿Cómo llegamos aquí? ¿Cómo terminará la historia de todo lo que sabemos? Son estas mismas preguntas las que nos han llevado a un proceso de reflexión personal sobre nuestra propia existencia y el papel que como seres conscientes podemos tener, si decidimos aventurarnos a buscar las pistas que nos lleven a develar los misterios de nuestro universo.

La astronomía, la astrofísica y la cosmología son las disciplinas científicas donde investigadores e investigadores se dedican al estudio del cosmos, más allá de un enfoque puramente filosófico. A través de su trabajo de investigación, buscan dar con las respuestas a las preguntas fundamentales sobre el universo, explorando fenómenos que ocurren no solo en nuestro planeta o en nuestro sistema solar, sino a escalas realmente grandes. Para darnos una idea sobre el tamaño del universo, tenemos que considerar los siguientes datos. La Tierra tiene un diámetro de aproximadamente 12,742 km: como la distancia entre la Tierra y la Luna es de 384,400 km, nuestro planeta podría caber 30 veces en fila en esta distancia. Nuestro sistema solar tiene un diámetro de aproximadamente 9,000 millones de km, pero nuestro sistema solar es pequeño a comparación del diámetro de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Para darnos una idea de cuán inmenso es el universo, consideremos que nuestra galaxia tiene aproximadamente 100,000 años luz de diámetro. Esto significa que, incluso viajando a la velocidad de la luz

(300,000 km/s), nos tomaría 100,000 años llegar de un extremo a otro. Sin embargo, la Vía Láctea no es la única, más bien es solo una de los aproximadamente 200,000 millones de galaxias en el universo. Para darnos una idea de la inmensidad del cosmos, podríamos comparar la Tierra con una mota de polvo o un grano de arena, entonces la Vía Láctea sería del tamaño de una ciudad como Cuernavaca, y el universo abarcaría el tamaño de todo un continente. Todo el trabajo que hacen este tipo particular de científicos se basa en proponer teorías, fundamentadas con modelos matemáticos, que expliquen cada una de las observaciones realizadas por diversos experimentos y observatorios, frecuentemente a través de colaboraciones internacionales.

Uno de los experimentos más destacados fue la misión del satélite Planck, cuya última medición fue en 2018. Esta misión nos proporcionó información valiosa sobre el fondo cósmico de microondas (CMB del inglés *Cosmic Microwave Background*), que es la fuente de luz más antigua que hemos podido medir. Esta “luz” es la radiación remanente del Big Bang, el evento que marcó el inicio de la historia de nuestro universo hace aproximadamente 13,800 millones de años. Esta radiación, emitida en forma de ondas, nos permite estudiar cómo era el universo en sus primeras etapas, aproximadamente 380,000 años después del Big Bang. Antes de esta época, el universo podría considerarse como un entorno extremadamente caliente, compuesto de muchas partículas interactuantes [2]. El estudio detallado de esta radiación ha permitido a los científicos concluir que el universo debió haberse expandido de manera acelerada en un periodo de tiempo muy corto, lo que respalda la teoría de la *inflación cosmológica*. Según esta teoría, una fracción de segundo después del Big Bang, el universo experimentó una expansión acelerada, lo que hizo multiplicar su tamaño en un periodo extremadamente corto de tiempo. La evidencia de esta rápida expansión se encuentra en la distribución observada en el CMB, que muestra fluctuaciones de temperatura y densidad en diferentes regiones del universo, exactamente como lo predicen los modelos de inflación. Esta etapa temprana, aunque dura solo “unos segundos” en la escala del universo, es fundamental para entender la evolución cósmica, pues sentó las condiciones iniciales para la formación de las galaxias [3].

Aunque existen muchos modelos teóricos que describen esta evolución temprana del Universo, todavía no se tienen datos suficientes para describir con precisión los eventos que ocurrieron en los primeros segundos de existencia de nuestro Universo. Es por esta razón que los científicos exploran otros fenómenos que pueden ser observables hoy en día, para obtener pistas sobre lo que realmente sucedió en el Universo temprano.

¿Qué es el universo temprano?

El universo temprano o fase primitiva del

universo se refiere al periodo que abarca los primeros instantes de su existencia, cuando las condiciones eran extremadamente energéticas. Actualmente, se considera que esta fase inicia al final del periodo inflacionario (Fig. 1) [4].

permitieron la formación de núcleos atómicos ligeros, como el hidrógeno y el helio [5]. Este proceso, conocido como nucleosíntesis primordial, fue crucial en la evolución cósmica, pues estableció las

EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO TEMPRANO

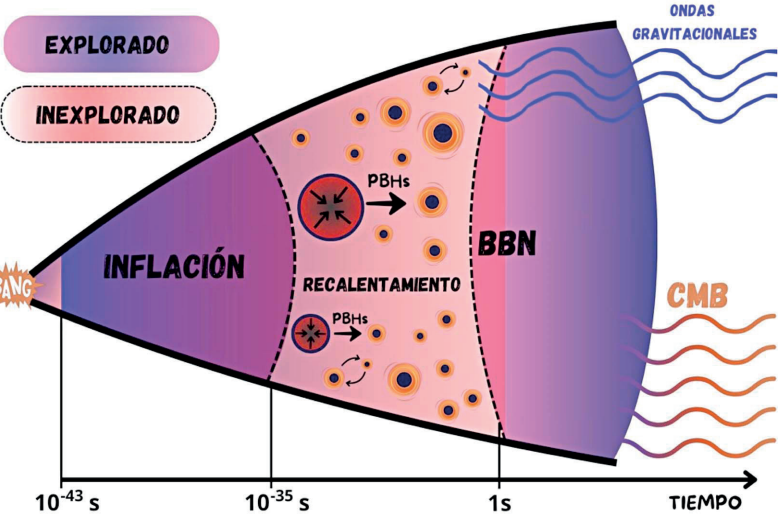


FIG. 1. ILUSTRACIÓN del universo temprano. Las regiones de color morado son aquellas que se han explorado a través de modelos (época de inflación), o por observaciones (época de la nucleosíntesis primordial o el CMB). Entre el final de inflación y la nucleosíntesis primordial hay un periodo, conocido como recalentamiento, donde la energía liberada por la inflación cosmológica se transforma en las primeras partículas. Este periodo aún no está bien restringido, debido a la falta de observaciones y modelos que predigan la correcta transición de una fase a otra (ilustración inspirada de <https://www.itp.uni-hannover.de/en/ag/domenech#69345>).

¿Qué es el periodo inflacionario?

El periodo inflacionario es una fase de expansión extremadamente rápida que, según los modelos cosmológicos, ocurrió en una fracción de segundo después del Big Bang. Durante esta etapa, el universo aumentó su tamaño exponencialmente en un tiempo increíblemente corto, mucho más corto que un microsegundo (un segundo dividido entre un millón). Esta rápida expansión explica varias características observadas en el universo actual, como la distribución de las fluctuaciones de temperatura en el CMB [2, 4].

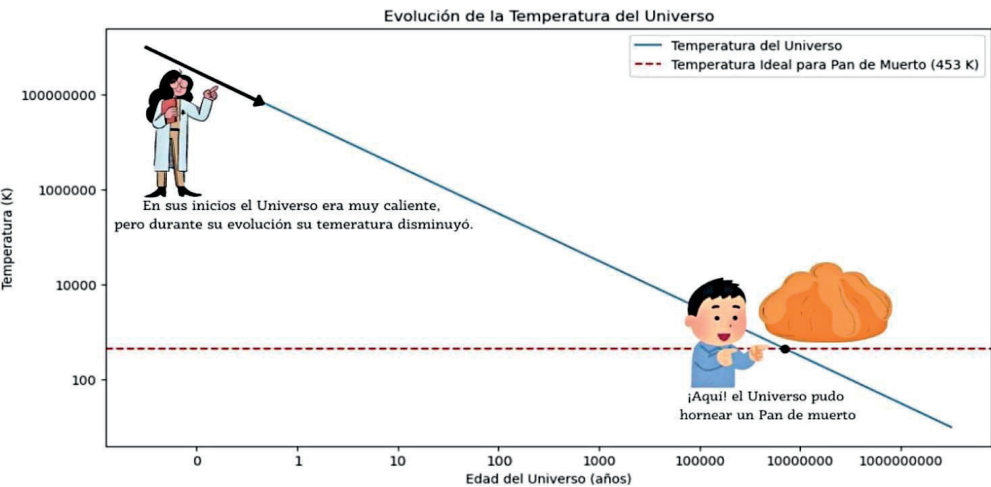
Una vez que terminó la inflación, el universo continuó expandiéndose, pero a un ritmo más moderado. La energía liberada por el proceso inflacionario se convirtió en partículas y radiación, dando origen a la fase que llamamos recalentamiento (Fig. 1). En ella, el universo estaba compuesto por un plasma denso y caliente de partículas subatómicas como protones, neutrones, electrones y fotones, interactuando entre sí: un plasma primordial [5].

¿Por qué comenzaron a fusionarse estas partículas?

A medida que el universo se expandía, su temperatura descendía progresivamente. Inicialmente, era tan caliente que ninguna estructura estable podía formarse, ya que la energía térmica era suficiente para descomponer cualquier combinación de partículas. Sin embargo, cuando la temperatura cayó por debajo de 1,000 millones de grados Kelvin, aproximadamente tres minutos después del Big Bang, las colisiones entre protones y neutrones

bases para la posterior formación de los primeros núcleos atómicos, estrellas y galaxias. La cantidad de cada elemento producido en esta fase es consistente con las observaciones actuales del universo, proporcionando evidencia sólida de la teoría del Big Bang. La temperatura del universo en sus primeros momentos era tan alta que podría describirse como una especie de niebla muy espesa y caliente [5].

Como dato curioso para nuestros lectores, cuando el universo tenía unos 8 millones de años, tuvo la temperatura perfecta como para hornear un delicioso pan de muerto (Fig. 2). Es decir, que nuestro universo llegó a tener una temperatura de 180 grados Celsius (equivalente a 453.15 grados Kelvin). Actualmente la temperatura de nuestro universo es de unos 2.73 Kelvin (equivalente a -270.42 grados Celsius) [6], lo que hace que nuestro universo sea bastante frío.



Aunque las y los científicos tienen buena información sobre el universo primitivo, como su temperatura o el número de partículas que se crearon, todavía no se tiene una buena descripción sobre las condiciones necesarias para describir la evolución entre el final de la era inflacionaria y el principio de la

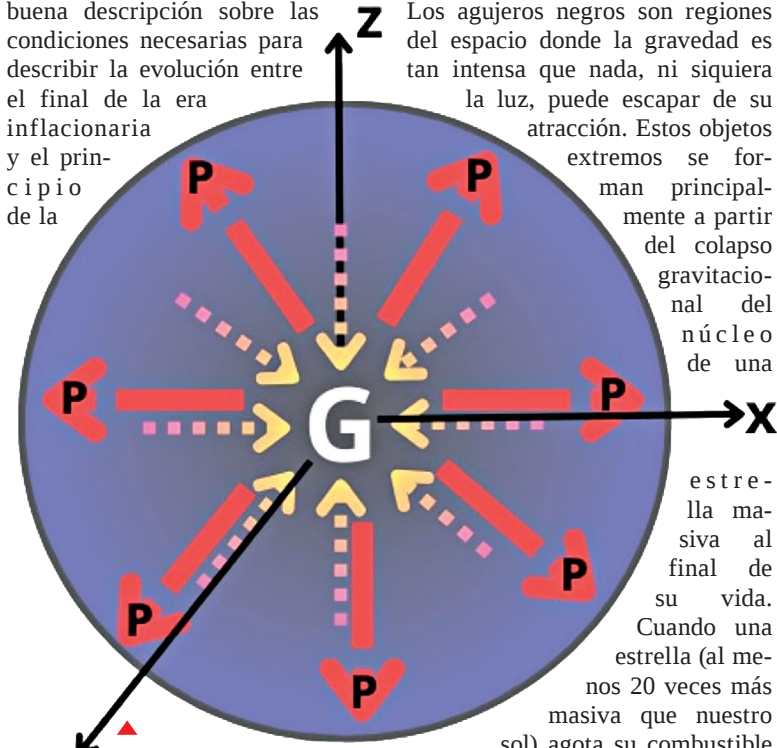


FIG. 3. IMAGEN de las fuerzas que interactúan en una región esférica que está a punto de colapsar. Las flechas marcadas con la letra “P” representan las fuerzas de presión, generadas por las interacciones de los núcleos atómicos dentro de la estrella, mientras que las flechas internas que apuntan al centro representan la fuerza de gravedad “G”. Los ejes “x, y, z” representan un plano en tres dimensiones).

nucleosíntesis primordial. Por eso, a partir de estos observables y su impacto hipotético, se proponen mecanismos que pueden explicar dicha historia cósmica y así conocer indirectamente otras características del universo temprano. Es aquí donde los agujeros negros primordiales podrían desempeñar un papel fundamental, ya que su formación y evolución están intrínsecamente ligadas a las condiciones extremas que imperaban en esos

primeros instantes. Sin embargo, para hablar un poco más sobre este tipo particular de agujeros negros, tenemos que aclarar primeramente qué son los agujeros negros.

Los agujeros negros son regiones del espacio donde la gravedad es tan intensa que nada, ni siquiera la luz, puede escapar de su atracción. Estos objetos extremos se forman principalmente a partir del colapso gravitacional del núcleo de una estrella masiva al final de su vida. Cuando una estrella (al menos 20 veces más masiva que nuestro sol) agota su combustible nuclear, su presión interna (producida por toda la energía liberada por las interacciones de los átomos en su interior) ya no puede contrarrestar la gravedad, en ese caso, se dice que el núcleo es inestable (Fig. 3) lo cual llevaría a comprimir el tamaño de la estrella hasta convertirla en una estrella de neutrones, o bien, podría estallar en una supernova y posteriormente colapsar para formar un agujero negro [7].

Cuando un agujero negro se forma, éste cuenta con una frontera, conocida como horizonte de eventos u horizonte de sucesos. Más allá de esta superficie, la velocidad de escape necesaria para superar la gravedad de este objeto excede la velocidad de la luz, por lo que nada, ni siquiera la luz puede salir [7]. Una vez formado, un agujero negro es sorprendentemente simple en términos de las propiedades físicas que lo caracterizan. De acuerdo con el *teorema de no-pelo o de calvicie*, cualquier información sobre la materia que lo originó (como su composición química, estructura interna o cualquier otra característica) se pierde tras el colapso gravitacional. Esto significa que un agujero negro

FIG. 2. LA TEMPERATURA del Universo ha ido disminuyendo desde sus inicios extremadamente calientes hasta los tiempos actuales. Durante esa transición de temperaturas, el universo tuvo la temperatura ideal para hornear un delicioso pan de muerto (Idea inspirada de la página “@porelamoralaciencia”).

se describe únicamente por tres parámetros fundamentales: su masa, su carga eléctrica y su rotación [8]. Es debido a esto, que los agujeros negros pueden encontrarse en distintos tamaños, desde los *agujeros negros estelares* (con masas entre unas pocas hasta decenas de veces la masa del Sol), hasta los *agujeros negros supermasivos*, que pueden tener millones o incluso miles de millones de veces la masa solar. Estos últimos suelen encontrarse en el centro de la mayoría de las galaxias, como por ejemplo la nuestra (Fig. 4) [9].

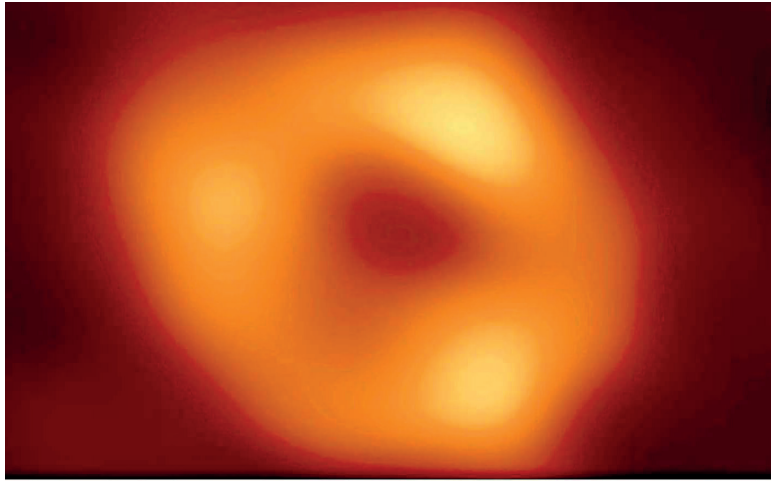


FIG. 4. IMAGEN del agujero negro supermasivo Sagitario A*, el cual se encuentra en el centro de nuestra galaxia y tiene una masa de aproximadamente cuatro millones de veces mayor que la de nuestro Sol. Imagen de EHT Collaboration.

¿Qué son los agujeros negros primordiales?

Un *agujero negro primordial* (PBH, del inglés *Primordial Black Hole*) es un agujero negro hipotético que pudo haberse formado debido a un colapso gravitacional durante los primeros segundos de existencia de nuestro universo [10]. Como hemos comentado, el mecanismo más conocido para la formación de agujeros negros es el colapso estelar. Sin embargo, en el caso de los PBHs, no podemos escapar que este mecanismo ocurra, ya que en los primeros segundos del universo aún no existían estrellas! Incluso si estas hubieran existido, se requeriría un tiempo muy prolongado para que el núcleo estelar se volviera inestable y permitiera el colapso gravitacional. Para formar PBHs se requieren regiones donde se haya acumulado una gran densidad de energía proveniente de la época de inflación, lo que permitiría la formación de un PBH por colapso gravitacional. Haciendo una analogía, imagina que el proceso de inflación es similar a cuando extiendes las sábanas sobre tu colchón (el universo se expande rápidamente en una fracción de segundo); la sábana ahora está sobre tu cama, y notas al mirar de cerca, que hay regiones donde quedan arrugas. Esas arrugas en la sábana pueden ser una analogía de una región que tiene una sobre densidad en el universo temprano y

la cual podría colapsar para formar un PBH con una cierta cantidad de masa. De acuerdo al tamaño de la región sobre-densa, se podrían formar PBHs con diferentes masas. Dentro de los aspectos más interesantes sobre los agujeros negros, ya sean primordiales o astrofísicos, es que pueden evolucionar a lo largo del tiempo a través de dos procesos fundamentales: la acreción de materia y la evaporación por radiación de Hawking.

¿Qué es la radiación de Hawking?

En 1974, el físico Stephen Hawking

gieren que la radiación emitida por estos PBHs pudo haber contribuido durante la nucleosíntesis primordial. Por otro lado, la búsqueda de PBHs ha cobrado un gran interés desde el descubrimiento de ondas gravitacionales en 2015.

¿Qué son las ondas gravitacionales?

Las ondas gravitacionales son un tipo de onda invisible que viaja a la velocidad de la luz, predichas por Albert Einstein en su teoría de la relatividad general en 1916. ¡Hace más de cien años! Y estas ondas se producen cuando objetos masivos, como agujeros negros o estrellas de neutrones, se aceleran o colisionan entre sí [11, 12].

Una analogía útil para entenderlas es imaginar que el espacio-tiempo es como una superficie de agua tranquila. Si arrojamus una piedra, se generan ondas que se propagan en todas direcciones. De manera similar, cuando dos agujeros negros giran uno alrededor del otro o chocan, crean perturbaciones (ondas) en el espacio-tiempo, que se propagan como ondas gravitacionales por el universo. No obstante, estas ondas son extremadamente difíciles de detectar, porque al llegar a la Tierra son increíblemente débiles. Sin embargo, en 2015 el observatorio LIGO logró detectarlas por primera vez, confirmando su existencia y abriendo una nueva era en la astronomía [13].

De esta manera, desde el descubrimiento de ondas gravitacionales, los científicos han utilizado observatorios como LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) para estudiar la fusión de objetos compactos. Hasta ahora, las señales detectadas provienen de colisiones de agujeros negros estelares y estrellas de neutrones [13, 14]. Sin embargo, algunos investigadores han planteado la hipótesis de que ciertas señales podrían deberse a la fusión de PBHs, o bien que la fusión de estos PBHs pudo dar origen a los Agujeros Negros estelares, los cuales tienen un rango de masa superior al esperado por la muerte (o colapso) estelar. En este sentido, los PBHs podrían representar las semillas oscuras que nos proporcionan pistas cruciales sobre la evolución del universo en sus primeros instantes. Si se llegara a confirmar que algunas ondas gravitacionales provienen de PBHs o fusiones de estos, esto sería una prueba indirecta de su existencia y ayudaría a resolver uno de los mayores enigmas de la cosmología: el origen de la materia oscura. Pero eso es material para otro artículo.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos.

ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org

¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTACTANOS: coord.comite.editorial.acmor@gmail.com

Referencias

- [1] Hawking, S. (2018). *Breves respuestas a las grandes preguntas*. Crítica.
- [2] Astrobitos. (2018, 23 de julio). Planck 2018: lo mejor de ambos mundos. Recuperado de <https://astrobitos.org/2018/07/23/planck-2018-lo-mejor-de-ambos-mundos>
- [3] Matos, T. (2021). *La radiación de fondo del universo*. Colofón Ediciones.
- [4] Kolb, E. W., & Turner, M. S. (1990). *The Early Universe*. Addison-Wesley.
- [5] Weinberg, S. (1977). *Los tres primeros minutos del universo*. Alianza Editorial.

- [6] Ramírez Solís, Alejandro. *El Premio Nobel de Física 2019: Cosmología, física y exoplanetas*. La Unión de Morelos, 21 de octubre de 2019. <https://acmor.org/publicaciones/el-premio-nobel-de-f-sica-2019-cosmolog-a-f-sica-y-exoplanetas>
- [7] Hawking, S. (2013). *Agujeros negros y pequeños universos*. Crítica.
- [8] Hawking, S., & Penrose, R. (2012). *La naturaleza del espacio y el tiempo*. Debate.
- [9] Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM. (2022). *Hoyos negros: ¿Por qué es importante la imagen de Sagitario A?** Ciencia UNAM. Recuperado de <https://ciencia.unam.mx/leer/1287/hoyos-negros-por-que-es-importante-la-imagen-de-sagitario-a>
- [10] Carr, B. J.; Hawking, S. W. (1 de agosto de 1974). «Black Holes in the Early Universe».

- Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (en inglés) 168 (2): 399-415. doi:10.1093/mnras/168.2.399
- [11] Hawking, S. (1988). *Historia del tiempo: del Big Bang a los agujeros negros*. Grijalbo.
 - [12] NASA Space Place. *Ondas gravitacionales*. Recuperado el 20 de marzo de 2025, de <https://spaceplace.nasa.gov/gravitational-waves/sp/>
 - [13] Hacyan, S. (2019). *Ondas gravitacionales: Las olas invisibles del universo*. Fondo de Cultura Económica.
 - [14] LIGO Scientific Collaboration. (2024). *Resumen científico en español: Ondas gravitacionales*. Recuperado de <https://ligo.org/wp-content/uploads/2024/04/science-summary-spanish-13.pdf>