

Cosmología

Julietta Fierro, Beatriz García, Susana Deustua

International Astronomical Union, Universidad Nacional Autónoma de México (Méjico DF, Méjico), Universidad Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina), Space Telescope Science Institute (Baltimore, Estados Unidos)

Resumen

Aún cuando cada objeto celeste tiene encantos particulares, comprender la evolución del Universo suele ser un tema fascinante pues engloba la totalidad. Pensar que estando anclados a la vecindad terrestre podemos saber tanto - de tanto - resulta cautivador.

La astronomía en el siglo XIX se centró en la catalogación de las propiedades de los objetos celestes individuales: planetas, estrellas, nebulosas y galaxias. A finales del siglo XX en cambio, se focalizó en las propiedades de las categorías de objetos: cúmulos de estrellas, formación de galaxias y estructura del Universo. Ahora sabemos la edad y la historia del Universo y que su expansión se está acelerando, pero todavía no conocemos la naturaleza de la materia oscura. Y nuevos descubrimientos se siguen realizando.

Primero vamos a describir algunas propiedades de las galaxias que forman parte de las grandes estructuras del universo. Más adelante nos referiremos a lo que se conoce como el modelo estándar del Big Bang y la evidencia que apoya el modelo.

Objetivos

- Comprender cómo ha evolucionado el Universo desde el Big Bang a nuestros días
- Conocer cómo se organizan la materia y la energía en el Universo
- Analizar de qué manera los astrónomos pueden conocer la historia del Universo

Introducción

El Universo, que está formado por materia, radiación, espacio y energía, evoluciona con el tiempo. Sus dimensiones temporales y espaciales son mucho más grandes que las que empleamos en nuestra vida cotidiana y, en general, imaginarlo no es algo intuitivo.

La cosmología nos ofrece respuestas a preguntas fundamentales sobre el Universo ¿De dónde venimos? ¿Hacia dónde vamos? ¿Dónde nos encontramos? ¿Desde cuándo?

Las representaciones de la Historia Térmica del Universo (Fig. 1), que equivale a su evolución en el tiempo, nos permiten visualizar lo que ha ocurrido a lo largo de la vida del Cosmos, pero, sin lugar a duda, no nos transmiten el real sentido del espacio y del tiempo.

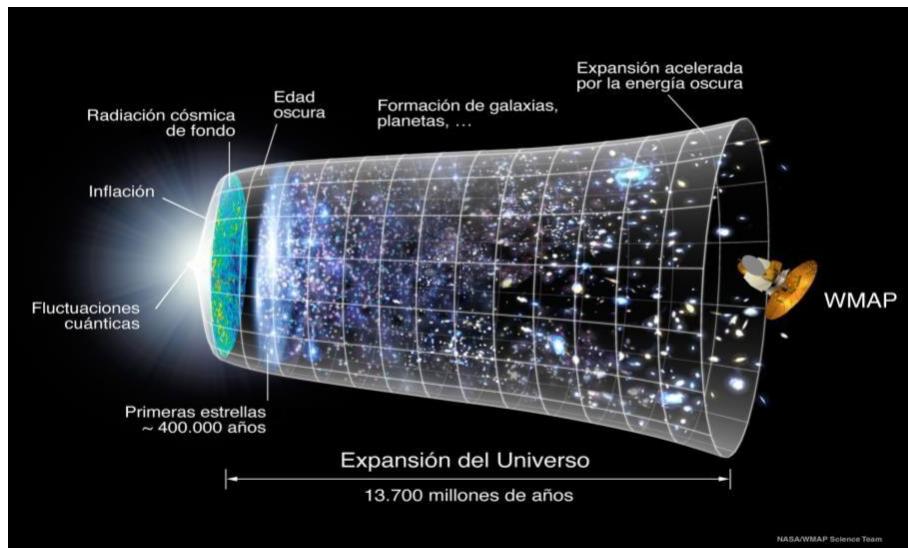


Fig. 1: Expansión del Universo. (Foto: NASA).

En las siguientes secciones de este artículo, describiremos algunas de las propiedades del universo, el único sistema aislado de la naturaleza.

Las Galaxias

Las galaxias están compuestas de estrellas, gas, polvo y materia oscura, y pueden ser muy grandes, de más de 300.000 años luz de diámetro. La galaxia a la que pertenece el Sol tiene cien mil millones (100.000.000.000) de estrellas. En el universo hay miles de millones de esas galaxias.



Fig. 2a: Galaxia de Andrómeda. Galaxia espiral muy similar a la nuestra: la Vía Láctea. El Sol se encuentra en el borde exterior de uno de los brazos de nuestra galaxia. (Foto: Bill Schoening, Vanessa Harvey/REU program/NOAO/AURA/NSF) Fig. 2b: Nube Grande de Magallanes. Galaxia irregular, satélite de la Vía Láctea que se puede observar a simple vista desde el hemisferio sur. (Foto: ESA and Eckhard Slawik).

Nuestra galaxia es una gran galaxia espiral, similar a la de Andrómeda (figura 2a). El Sol tarda 200 millones años en orbitar alrededor de su centro, y viaja a 250 kilómetros por segundo. Debido a que nuestro sistema solar se encuentra inmerso en el disco de la galaxia, no podemos ver toda la galaxia, es como tratar de imaginar un bosque cuando se está en medio de él. Nuestra galaxia se llama Vía Láctea. A simple vista desde la Tierra, podemos ver muchas estrellas individuales y un ancho cinturón formado por un enorme número de estrellas y por las nubes interestelares de gas y polvo. La estructura de nuestra galaxia fue descubierta a través de observaciones con telescopios en el visible y en radio, y mediante la observación de otras galaxias (si no hubiera espejos, nos podríamos imaginar lo que nuestro propio rostro es mirando a otros rostros) Utilizamos las ondas de radio, ya que pueden pasar a través de las nubes que son opacas a la luz visible, de forma similar a la manera en que podemos recibir llamadas en el teléfono móvil dentro de un edificio.

Clasificamos las galaxias en tres tipos: irregulares, espirales y elípticas.

Las galaxias irregulares son más pequeñas y abundantes y suelen ser ricas en gas, y forman nuevas estrellas. Muchas de estas galaxias son satélites de otras galaxias. La Vía Láctea tiene 30 galaxias satélite, y la primera que fueron descubiertas son las Nubes de Magallanes (Fig. 2b), que se ven desde el hemisferio sur.

Las galaxias espirales, como la nuestra, tienen, en general, dos brazos fuertemente o débilmente retorcidos en espiral que emanan de la parte central llamada núcleo. Los núcleos de las galaxias tienden a tener un agujero negro de millones de veces la masa del Sol. Las nuevas estrellas nacen principalmente en los brazos, debido a la mayor densidad de la materia interestelar cuya contracción da nacimiento a las estrellas.

La primera imagen de un agujero negro supermasivo en el núcleo de una galaxia, se dio a conocer en 2019. Un equipo de más de 200 científicos de 60 instituciones de 18 países en 6 continentes, usando un arreglo de 8 radiotelescopios distribuidos en todo el planeta Tierra (Telescopio Event Horizon¹, EHT), lograron obtener la imagen en color falso del centro de Messier 87, una galaxia situada a 53.5 millones de años luz del Sol.

En las figuras 3a y 3b vemos la "sombra" y el horizonte de evento del agujero negro supermasivo en el centro de M87, 6.500 millones de veces más masivo que nuestra estrella.

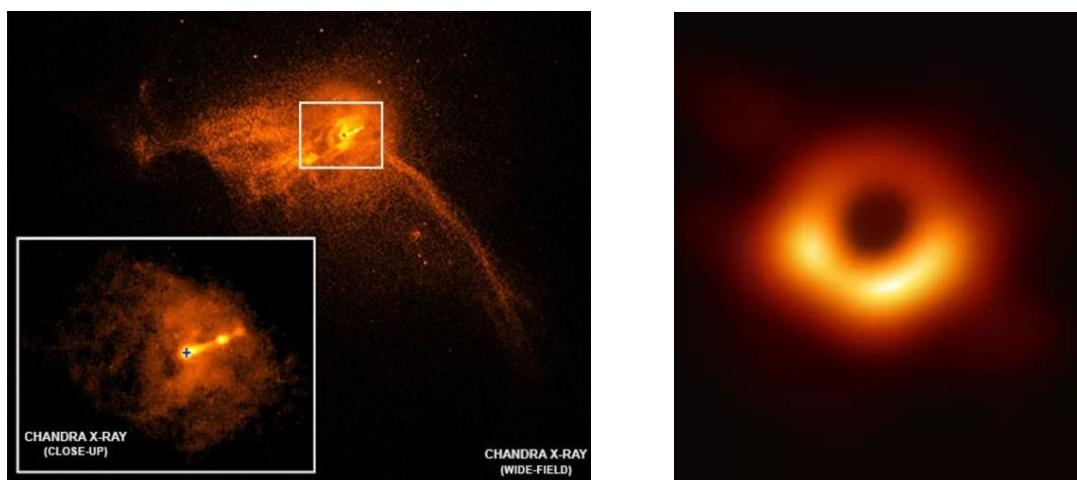


Fig. 3a: Imagen rayos X del centro de M87. Fig. 3b: "sombra del agujero negro en el centro de M87 en ondas de radio (Crédito: EHT).

El 12 de mayo de 2022, la Colaboración EHT reveló una imagen de Sagitario A*, el agujero negro supermasivo en el centro de la Vía Láctea. El agujero negro se encuentra a 27.000 años luz de la Tierra; es miles de veces más pequeño que M87.

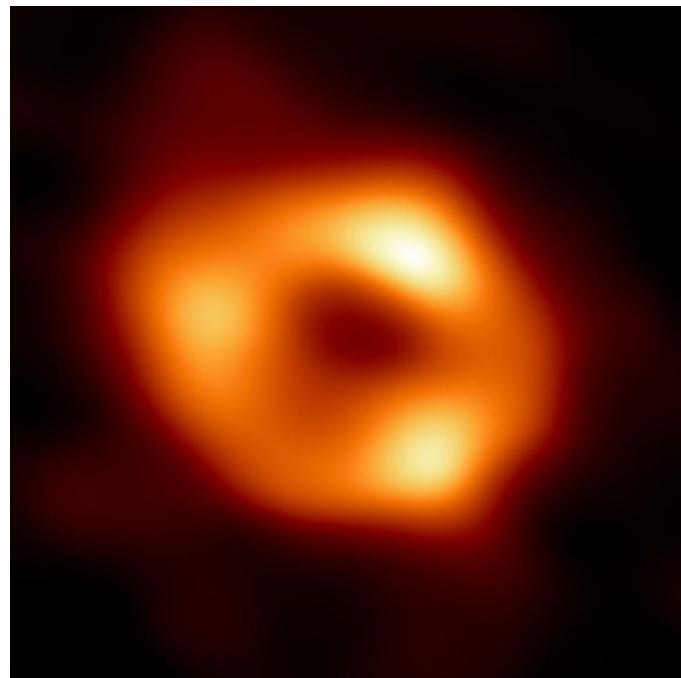


Fig. 3c: Image of the black hole at the center of our Galaxy (Credit: EHT Collaboration).

Cuando los agujeros negros en los núcleos de galaxias atraen nubes de gas o estrellas, la materia se calienta y antes de caer en el agujero negro, parte de ella emerge en forma de chorros de gas incandescente que se mueven a través del espacio y el medio intergaláctico (Fig. 4a y 4b). Son conocidos como núcleos galácticos activos y existen en un gran número de galaxias espirales.

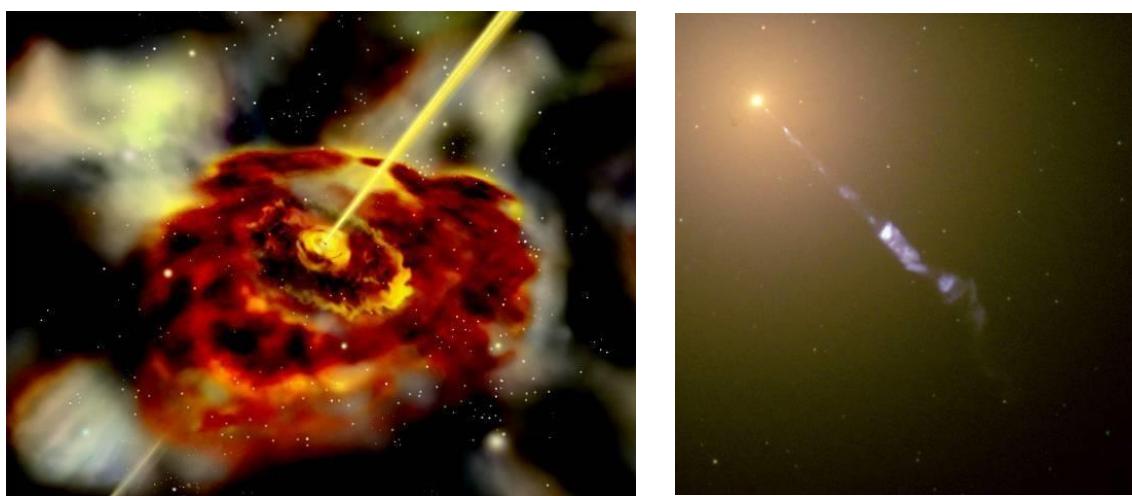


Fig. 4a: Representación artística de un agujero negro en el centro de una galaxia. (Foto: NASA E/PO - Sonoma State University, Aurore Simonnet) Fig. 4b: Galaxia M87, ejemplo de galaxia real con un chorro que la acompaña. (Foto: [NASA and The Hubble Heritage Team \(STScI/AURA\)](#)).

Las galaxias más grandes son las elípticas (aunque también hay elípticas pequeñas). Se cree que estas, así como las espirales gigantes, se forman cuando las galaxias más pequeñas se fusionan (fig. 5a y 5b). Alguna evidencia de esto proviene de la diversidad de edades y composición química de los diversos grupos de estrellas en la galaxia fusionada.

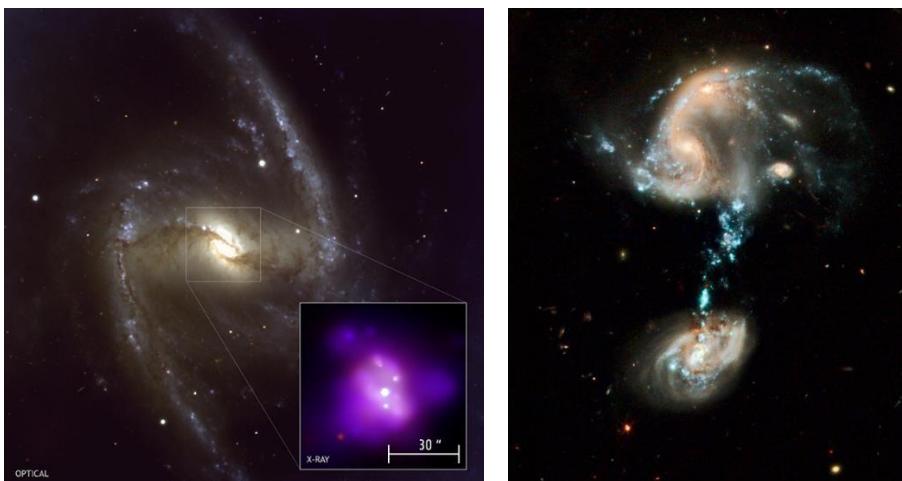


Fig. 5a: Imagen óptica de la Galaxia NGC 1365 tomada con el VLT de ESO y la imagen de Chandra de rayos X del material cercano al agujero negro central. Fig. 5b: Muestra de canibalismo galáctico donde interactúan dos galaxias fusionándose en un proceso muy espectacular. (Foto: [NASA](#), [ESA](#), the [Hubble Heritage \(STScI/AURA\)](#)-[ESA/Hubble Collaboration](#), and A. Evans (Univ. of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University)).

Las galaxias forman cúmulos de galaxias, con miles de componentes (Fig. 6). Elípticas gigantes se encuentran generalmente en los centros de los conglomerados y algunos de ellos tienen dos núcleos como resultado de una reciente fusión de dos galaxias.

Los cúmulos y supercúmulos de galaxias se distribuyen en el Universo formando estructuras filamentosas que rodean inmensos huecos desprovistos de galaxias. Es como si el Universo a gran escala fuera un baño de burbujas, donde las galaxias se encuentran en la superficie de la burbuja.

Estudio de Universo como un todo

A continuación, describiremos algunas propiedades del Universo en que vivimos. El Universo, que está formado por materia, radiación, espacio y energía, evoluciona con el tiempo. Sus dimensiones temporales y espaciales son mucho más grandes que las que empleamos en nuestra vida cotidiana y, en general, imaginarlo no es algo intuitivo.

La cosmología nos ofrece respuestas a preguntas fundamentales sobre el Universo ¿De dónde venimos? ¿Hacia dónde vamos? ¿Dónde nos encontramos? ¿Desde cuándo?

Vale la pena mencionar que la ciencia evoluciona. Cuanto más sabemos, más nos damos cuenta de lo mucho que no conocemos. Un mapa es útil incluso si es sólo es una representación de un sitio, así es como la ciencia nos permite disponer de una representación de la naturaleza, ver algunos de sus aspectos y predecir los acontecimientos, todos ellos basados en la razón supuestos que tienen necesariamente que ser apoyados con mediciones y datos.

El modelo de universo al que adherimos es el llamado Modelo Standard Cosmológico, propuesto por George Lemaitre en 1927. Es un modelo exitoso porque las observaciones verifican sus producciones, tales como la expansión: propuesta por Edwin Hubble y George Lemaitre y verificada en 1936; la existencia de la radiación de fondo en microondas: predicha en 1948 por George Gamow, descubierta observacionalmente por Arno Penzias y Robert Wilson en 1964 (descubrimiento que les valió el premio Nobel en 1978, ver su artículo original: Penzias y Wilson 1965) y luego observada con gran resolución por los telescopios COBE² y WMAP³ (John Mather y George Smoot de la misión COBE fueron galardonados con el Nobel de Física en 2006; la abundancia de elementos, a partir de la nucleosíntesis: tema desarrollado por Hans Bethe (Nobel de Física 1967 por sus trabajos en el tema; la estructura a gran escala: cuya verificación requirió un telescopio en el espacio: el Hubble.

Si embargo, el mal llamado Big Bang, es un modelo que fue actualizado. En 1981 Alan Guth propuso formalmente la idea de la inflación cósmica, que consistía en que en sus momentos iniciales el universo pasó por una fase de expansión exponencial que fue impulsada por una positiva densidad de energía de vacío. Los resultados de la misión de la WMAP en 2006 hicieron el caso de inflación cósmica muy convincente. Este hecho es de fundamental importancia, pues la inflación sería responsable de la geometría del universo (plana) y de las fluctuaciones en la densidad de materia del universo primitivo, responsables de la posterior aparición de las galaxias.

Las dimensiones del universo

Las distancias entre las estrellas son enormes. La Tierra está a 150.000.000 de kilómetros del Sol, Plutón está 40 veces más lejos. La estrella más cercana está 280.000 veces más distante, y la galaxia más cercana está diez mil millones (10.000.000.000) veces más lejos. La estructura de filamentos de galaxias es diez billones (un uno seguido de 12 ceros) de veces mayor que la distancia de la Tierra al Sol.

La edad del universo

Nuestro Universo comenzó hace 13,7 mil millones (13.700.000.000) de años. El sistema solar se formó mucho más tarde, hace 4,6 millones de (4.600.000.000) de años. La vida en la Tierra surgió hace 3,8 mil millones (3.800.000.000) de años y los dinosaurios se extinguieron hace 6,5 millones (6.500.000) de años. Los seres humanos modernos sólo han aparecido hace unos 150.000 años.

Razonamos que nuestro universo tuvo un origen en el tiempo porque se observa que se está expandiendo rápidamente. Esto significa que todos los grupos de galaxias se están alejando unos de otros y las galaxias más distantes se están alejando más rápido. Si medimos la tasa de expansión se puede estimar cuándo todo el espacio estaba junto. Este cálculo da una edad de 13,7 millones de años. Esta edad no contradice la evolución estelar, ya que no observamos estrellas ni las galaxias mayores de 13,5 millones de años. El evento que inició la expansión del Universo se conoce como Big Bang. Sin embargo, la edad del universo está en permanente discusión y su determinación precisa no es algo simple: al depender de observaciones precisas para determinarla, también dependemos de la tecnología.

2 <https://science.nasa.gov/mission/cobe/>

3 <https://science.nasa.gov/mission/wmap/>

Medición de velocidad

Se puede medir la velocidad de una estrella o galaxia utilizando el efecto Doppler. En la vida diaria experimentamos el efecto Doppler cuando escuchamos el cambio de tono de una ambulancia o sirena de la policía, que se acerca y luego se aleja. Un experimento simple es colocar un reloj de alarma en una bolsa con un mango largo. Si otra persona hace girar la bolsa por el asa con su brazo extendido por encima de su cabeza, podemos detectar que el tono cambia cuando se mueve del reloj hacia o alejándose de nosotros. Podríamos calcular la velocidad del reloj al escuchar el cambio del tono, que es más alto si la velocidad es mayor.

La luz emitida por los objetos celestes también pasa por un cambio de frecuencia o cambio de color que se puede medir en función de la velocidad con que éstos se aproximan o salen. La longitud de onda es más larga (más rojo) cuando se alejan de nosotros y más corta (azul) cuando se mueven hacia nosotros.

Cuando el Universo era más compacto, las ondas sonoras pasando a través de él produjeron regiones de mayor y menor densidad. Los supercúmulos de galaxias se formaron cuando la densidad de la materia era más alta. A medida que el Universo se expandió, el espacio entre las regiones de alta densidad aumentó en tamaño y volumen. La estructura filamentosa del Universo es el resultado de su expansión.

Las ondas de sonido

El sonido viaja a través de un medio, como el aire, el agua o la madera. Cuando producimos un sonido, generamos una onda que comprime el material de su entorno. Esta onda de compresión se desplaza a través del material hasta nuestro oído y comprime el tímpano, que envía el sonido a nuestras células nerviosas sensibles. No oímos las explosiones del Sol o de las tormentas de Júpiter debido a que el espacio entre los objetos celestes está casi vacío y por lo tanto la compresión de sonido no puede propagarse.

Centro, borde del Universo y ondas de luz

Es de destacar que no existe un centro de expansión del Universo. Usando una analogía bidimensional, imaginemos que estábamos en París, en la sede de la UNESCO y la Tierra se está expandiendo. Observaríamos que todas las ciudades se alejarían las unas de las otras, y de nosotros, pero no tendríamos razón para decir que estamos en el centro de la expansión, porque todos los habitantes de otras ciudades observarían la expansión de la misma manera.



Fig. 6: Hasta la fecha se han localizado más de 300 nubes oscuras y densas de polvo y gas donde están ocurriendo procesos de formación estelar. Super Cúmulo Abell 90/902. (Foto: Hubble Space Telescope, NASA, ESA, C. Heymans (University of British Columbia) y M. Gray (University of Nottingham)).

Aunque desde nuestro punto de vista la velocidad de la luz de 300.000 kilómetros por segundo es muy rápida, no es infinitamente rápida. La luz de las estrellas tarda cientos de años en llegar a la Tierra y la luz de las galaxias lleva viajando millones de años. Toda la información del cosmos tarda mucho tiempo en llegar por lo que siempre vemos las estrellas como fueron en el pasado, no como son ahora.

Hay objetos tan distantes que su luz no ha tenido tiempo de llegar hasta nosotros, sin embargo aunque no podemos verlos, no es que no estén allí, simplemente que se formaron después que la radiación procedente de esa región del cielo nos ha alcanzado.

La velocidad finita de la luz tiene varias implicaciones para la astronomía. Las distorsiones en el espacio afectan a la trayectoria de la luz, por lo que vemos una galaxia en un lugar dado donde en realidad no puede estar allí ahora, porque la curvatura del espacio cambia su posición. Además, una estrella ya no está en el lugar donde se observa debido a que las estrellas se mueven. Tampoco son como las vemos ahora. Siempre vemos los objetos celestes como eran, y cuanto más distantes estén, los vemos más atrás en su pasado. El análisis de objetos similares a diferentes distancias es equivalente a ver el mismo objeto en diferentes momentos de su evolución. En otras palabras, podemos ver la historia de las estrellas, si nos fijamos en aquellos que asumimos son tipos similares, pero a diferentes distancias.

No podemos ver el borde del Universo, porque su luz no ha tenido tiempo de llegar a la Tierra. Nuestro Universo es infinito en tamaño, por lo que sólo se ve una sección de 13,7 mil millones de años luz de radio, es decir, donde la luz ha tenido tiempo de llegar hasta nosotros desde el Big Bang. Una fuente emite luz en todas las direcciones, por lo que las diferentes partes del Universo son coincidentes de su existencia en tiempos diferentes. Vemos todos los objetos celestes como lo eran en el momento de emitirse la luz que ahora observamos, porque toma un tiempo finito para la luz llegar hasta nosotros. Esto no significa que tenemos una posición privilegiada en el universo, cualquier observador de otra galaxia observaría algo equivalente a lo que detectamos nosotros.

Composición del Universo

Al igual que todas las ciencias, en astronomía y astrofísica cuanto más aprendemos acerca de nuestro Universo, más preguntas descubrimos. Ahora hablemos de la materia oscura y la energía oscura, para dar una idea de lo mucho que aún no sabemos sobre el Universo.

La composición del universo, cómo está distribuida materia y energía, determina la llamada constante cosmológica y a ésta define la geometría del cosmos.

También sabemos ahora que la expansión del Universo se está acelerando. Esto significa que hay una fuerza que contrarresta el efecto de la gravedad. Energía oscura es el nombre dado por los astrónomos para este fenómeno recientemente descubierto. En ausencia de la energía oscura, la expansión del universo se ralentiza.



Fig. 7: Galaxia MRG M0138 W, captada por el Hubble con una lente gravitacional. Foto: NASA, ESA, Newman, Akhshik, Whita.

Nuestro conocimiento actual del contenido de la materia-energía del universo, a partir de las observaciones del telescopio espacial Plack⁴, indica que el 74 por ciento es energía oscura, el 22 por ciento es materia oscura y sólo el 4 por ciento es normal, la materia luminosa (todas las galaxias, estrellas, planetas, gas, polvo) Básicamente, la naturaleza y las propiedades de un 96 por ciento del universo aún no se han descubierto

Esta distribución de materia y energía en el cosmos, define su geometría, el Universo es plano, no en términos de una hoja de papel, sino en términos de geometría espacial: en el universo se cumple la geometría euclídea, aquella que nos dice que la suma de los ángulos interiores de un triángulo es de 180°.

El futuro de nuestro Universo depende de las cantidades de materia visible, la materia oscura y la energía oscura. Antes del descubrimiento de la materia oscura y la energía oscura, se pensaba que la expansión cesaría, y la gravedad podría revertir la expansión resultante en el Big Crunch, en el que todo volvería a un solo punto. Pero una vez que se estableció la existencia de la materia oscura, se modificó la teoría. Ahora, la expansión podría alcanzar un valor constante en un tiempo infinito en el futuro. Pero, ahora que sabemos de la energía oscura, el futuro esperado es que la expansión se acelerará, al igual que el incremento de volumen del universo. En ese escenario, el universo será muy frío y muy oscuro por un tiempo infinito.

Bibliografía

- Berenguer, A., Cosmología: La Ciencia ante el reto del Universo. Ed. Guadamatlan, España, 2023
- Fabregat, J. Cosmología: historia y futuro del Universo. Universidad de Valencia. <https://www.uv.es/fabregat/CEFIRE/cosmo.pdf>. (consultado: mayo de 2025)
- Fierro, J., *La Astronomía de México*, Lectorum, México, 2001.

- Fierro, J, Montoya, L., *La esfera celeste en una pecera*, El Correo del Maestro, México, 2000.
- Fierro J, Domínguez, H, *Albert Einstein: un científico de nuestro tiempo*, Lectorum, México, 2005.
- Fierro J, Domínguez, H, *La luz de las estrellas*, Lectorum, El Correo del Maestro, México, 2006.
- Fierro J, Sánchez Valenzuela, A, *Cartas Astrales, Un romance científico del tercer tipo*, Alfaguara, 2006.
- Gangui, A; Cosmología dirigido por Juan Manuel Kirschenbaum. - 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2009. 172 p. ; 24x19 cm. (Las ciencias naturales y la matemática) ISBN 978-950-00-0709-2. <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002895.pdf>, 2009.
- Greene, B., The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality (2006)/El tejido del cosmos (2010)
- Thuan, Trinh Xuan, El destino del universo: Despues del big bang (Biblioteca ilustrada)(2012) / The Changing Universe: Big Bang and After (New Horizons) (1993)
- Weinberg, Steven, The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe. Weinberg, Steven y Nestor Miguez, Los tres primeros minutos del universo (2009)

Fuentes de Internet

- History and Fate of the Universe, Contemporary Physics Education Project <https://newsite.cpepphysics.org/history-and-fate-of-the-universe/> (consultado: mayo de 2025), en inglés
- Ned Wright's Cosmology Tutorial (in English, French and Italian) <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>