

Estos pretenden ser unos apuntes de teoría, que son al mismo tiempo “resumen” por el nivel bachillerato y amplios por el tema tratado, que es complejo y sobre el que se puede profundizar mucho, por lo que se intentan citar ideas que animen y orienten a saber más. Ver recursos en [www.fiquipedia.es](http://www.fiquipedia.es). Se trata la parte de cosmología del bloque de 2º Bachillerato LOMCE “Física del siglo XX” que se implanta en el curso 2016-2017, cubriendo contenidos, y a veces citando criterios de evaluación y estándares de aprendizaje evaluables.

## 1. Cosmología

El nombre elegido para este bloque enlaza con tratar la historia y composición del Universo, el Big Bang y la cronología del universo, ya que la cosmología trata el origen, evolución y destino del Universo. Dentro de la astrofísica (física aplicada a la astronomía) la cosmología física estudia la estructura a gran escala y la dinámica del Universo. Este bloque enlaza con física de partículas y gravitación; se plantea como un bloque separado aunque están relacionados. La parte de Fronteras de la Física se trata en ambos.

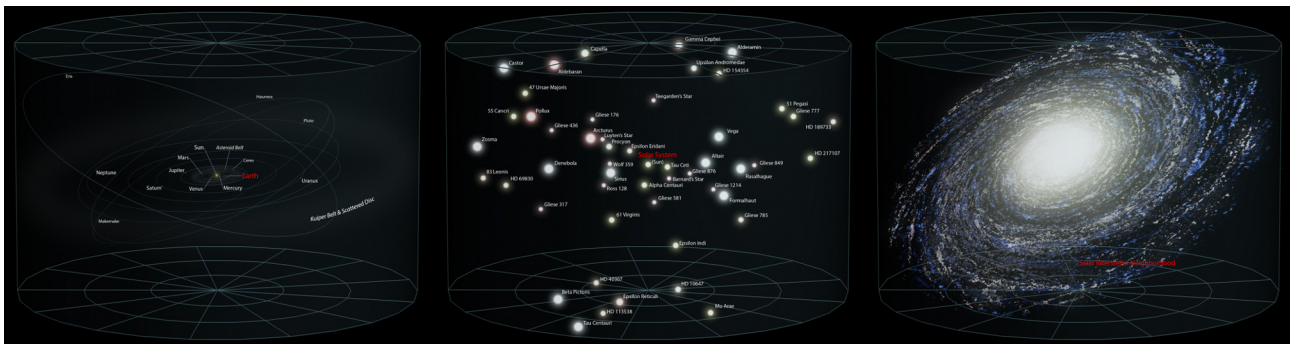
### 1.1 Historia de la cosmología física

La historia se puede ver desde dos perspectivas: observacional y teórica, a veces entremezcladas.

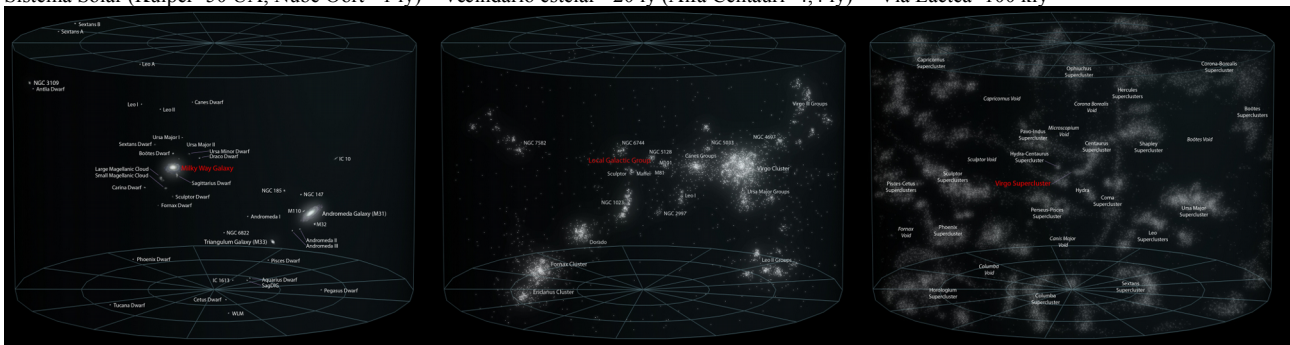
A nivel **observacional** es esencial qué y cómo conocemos el Universo; la base de conocer algo es medirlo.

Hasta sXX se usaba luz visible, pero ahora también espectro infrarrojo, radio (microondas), rayos X y rayos  $\gamma$ . Los telescopios y la observación ha evolucionado: uso de fotografía, interferómetros como ALMA, procesado para reducir efectos atmósfera, y observación desde el espacio como Hubble. La detección de primer exoplaneta fue posible en 1992 a través del método de velocidad radial que actualmente permite precisiones de 1 m/s, y actualmente hay miles, la mayor parte detectados por el método de tránsito.

Las distancias se miden con técnicas como paralaje, cefeidas, supernovas, cada una válida en ciertos rangos. Se usan unidades como pársec(pc) $\approx 3 \cdot 10^{16}$  m, año-luz(ly) $\approx 9,5 \cdot 10^{15}$  m y unidad astronómica (UA $\approx 1,5 \cdot 10^{11}$  m) Movimiento, composición y temperatura se mide con Doppler y análisis de espectro. Con ley de Hubble se puede medir distancia a partir del desplazamiento hacia el rojo (z): hay varios proyectos de redshift survey.



Sistema Solar (Kuiper $\approx 50$  UA, Nube Oort  $\approx 1$  ly) Vecindario estelar  $\approx 20$  ly (Alfa Centauri $\approx 4,4$  ly) Vía Láctea $\approx 100$  kly



Grupo local $\approx 10$  Mly Supercúmulo de Virgo $\approx 100$  Mly Supercúmulos $\approx 500$  Mly (Laniakea)  
[Tierra en el Universo](#), [Andrew Z. Corvin](#), cc-by-sa, Distancias son diámetros.

Se incluyen imágenes que dan una visión aproximada citando estructuras y escalas; a gran escala hay otras como vacíos, filamentos y muros, aunque globalmente se considera homogéneo (principio cosmológico). Es importante tener presente que hasta 1920 (Gran Debate) se pensaba que el universo se limitaba a la Vía Láctea; el primer paralaje lo hizo Bessel en 1938, y la técnica de paralaje está limitada a medir distancias menores que el diámetro de la Vía Láctea. La mayor precisión actual en paralaje es de  $\mu$ s de arco, conseguida por la sonda Gaia de ESA lanzada en 2013, y sigue limitando medidas al interior de la Vía Láctea. Gracias a la relación periodo-luminosidad de las Cefeidas descubierta por Henrietta Swan Leawit en 1912, Hubble confirmó objetos más allá de la Vía Láctea. En 1929 relacionó desplazamiento hacia el rojo (z) y distancia y



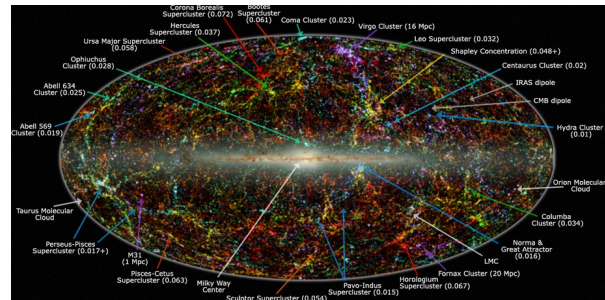
formuló la ley de Hubble y la expansión del universo; el valor de la constante de Hubble es  $\approx 70$  (km/s)/Mpc. Durante tiempo se consideró un Universo “estático”, infinito en el espacio y en el tiempo, aunque planteaba problemas: siendo la gravedad solamente atractiva implica que deben moverse si es finito; Halley comprobó en 1718 que algunas estrellas tenían movimiento. En 1823 se plantea la paradoja de Olbers: el cielo no debería ser oscuro si es estático e infinito.

Se llama **Universo observable** al que podemos observar a través de la recepción de luz en la Tierra en el momento actual, que nos muestra cómo era la estructura en el momento en el que se emitió la luz; está limitado por el momento en el que el universo se hizo transparente a la luz. Con otras vías de observación, como neutrinos y ondas gravitacionales, se podrían observar momentos anteriores. El diámetro del universo observable es de 93 Gly, mayor que el asociado a la distancia que puede recorrer la luz en los 13,8 G años de edad del universo; debido a la expansión del espacio antes estaban más próximos. Observar usando luz nos muestra cómo era el universo, no cómo es ahora, y nos permite comprobar que el Universo evoluciona, que lo lejano (antiguo) es distinto a lo cercano (joven), con ejemplos como cuásares, y estructuras y composición. A nivel observacional es importante la detección de la **radiación cósmica de microondas** (CMB) en 1965 por Penzias y Wilson (Nobel 1978). Es una radiación isotrópica de unos 3K, que ha sido medida con mayor precisión con el paso del tiempo detectando anisotropías (diferencias de  $\mu\text{K}$ ) (COBE (COsmic Background Explorer) y WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) de NASA y Planck de ESA), y también midiendo otros detalles como la polarización y el efecto del polvo galáctico. El análisis de CMB da información sobre la composición del Universo: 5% materia bariónica, 27% materia oscura y 68% energía oscura. La edad estimada del Universo con el CMB es de 13800 millones de años.

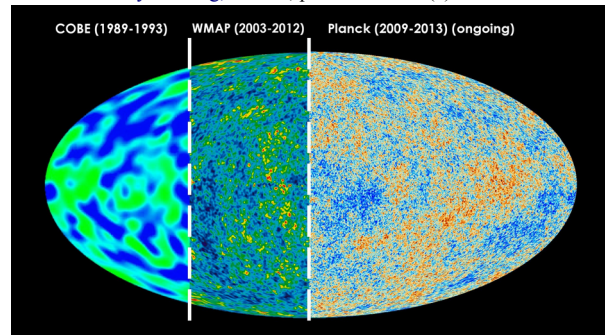
**La materia oscura y la energía oscura** son aspectos deducidos a nivel observacional pero que no son observables de manera directa. Además de a través del análisis del CMB, la materia oscura se deduce del comportamiento de cúmulos y estructuras a gran escala, de datos de velocidad de rotación de galaxias como NGC 3198 y lentes gravitacionales (en la lentes gravitacionales hay interacción entre la materia oscura y la luz, pero esa interacción es gravitatoria, asociada a la equivalencia entre energía y masa de la luz).

La energía oscura surge de un análisis de supernovas de 1998 (Nobel 2011) que muestra que la expansión es acelerada, por lo que hay una energía que compensa la atracción gravitatoria de materia ordinaria y oscura. La **cosmología teórica** surge con la relatividad general formulada por Einstein en 1915 en la que relaciona masa y geometría del espacio-tiempo. Plantea el Principio Cosmológico (a escalas grandes -cientos de Mpc- el Universo es isotrópico y homogéneo) y la aplica a todo el Universo, y surge un Universo en evolución (se expande o contrae); para conseguir un Universo “estático” Einstein introduce una constante cosmológica ( $\Lambda$ ), que luego consideraría “el peor error de su vida”.

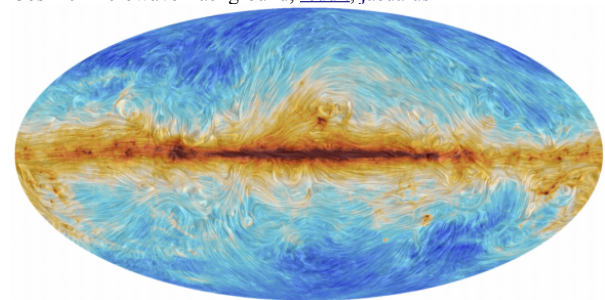
En 1924 Friedman publica soluciones en las que hay expansión; la interpretación inicial de Hubble de desplazamiento hacia el rojo como **Doppler relativista** por alejamiento en el espacio realmente es un **redshift** cosmológico: está asociado a la expansión del espacio-tiempo. La interpretación Doppler del **redshift** solamente es una aproximación válida cuando  $z$  es menor que la unidad; se observan valores  $z > 1$  que serían incompatibles con la relatividad con la interpretación Doppler, y de hecho el **redshift** asociado al CMB es de 1100.



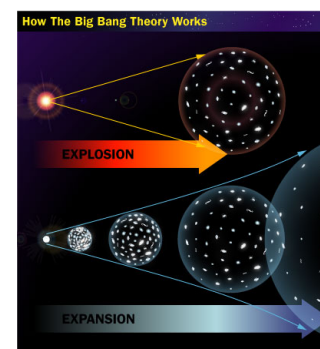
2MASS Galaxy Catalog, NASA, public domain (z)



Cosmic Microwave Background, reddit, jaedalus



Campos magnéticos y emisión polarizada, F. Villatoro, ESA Planck



How Suff Works, copyright



En 1931 Lemaître basándose en la idea de expansión pero retrocediendo en el tiempo propone el “átomo primitivo”, criticado inicialmente ya que era sacerdote y se asociaba a la idea religiosa de la creación. El nombre de **Big Bang** se debe a Hoyle, un defensor del Universo estacionario, y no es afortunado ya que sugiere explosión en un punto del espacio, cuando se trata de expansión del espacio.

La composición de materia ordinaria del Universo es fundamentalmente H (74% en masa) y He (24,0%), y se planteó inicialmente por Cecilia Payne para el Sol en 1925 mediante análisis espectral, ya que hasta ese momento se asumía que las estrellas tenían una composición similar a la Tierra. Ambos elementos son los más abundantes, y en astronomía se llama metales a todos los elementos más pesados que el Helio. Por la evolución estelar la metalicidad varía entre poblaciones de estrellas según su edad.

En 1948 Gamov plantea la nucleosíntesis primordial; en los primeros instantes tras el Big Bang con temperatura elevada se formaron elementos ligeros, y los porcentajes teóricos coinciden con los observados. Los elementos más pesados se forman mediante nucleosíntesis estelar, tras supernovas, por lo que la presencia de “metales” implica residuos estelares.

En 1981 Guth propone la inflación cósmica que resuelve el problema del horizonte: el Universo es homogéneo, pero debido a su tamaño no ha podido alcanzar el equilibrio térmico. La inflación supone que el espacio-tiempo se expandió muy rápidamente.

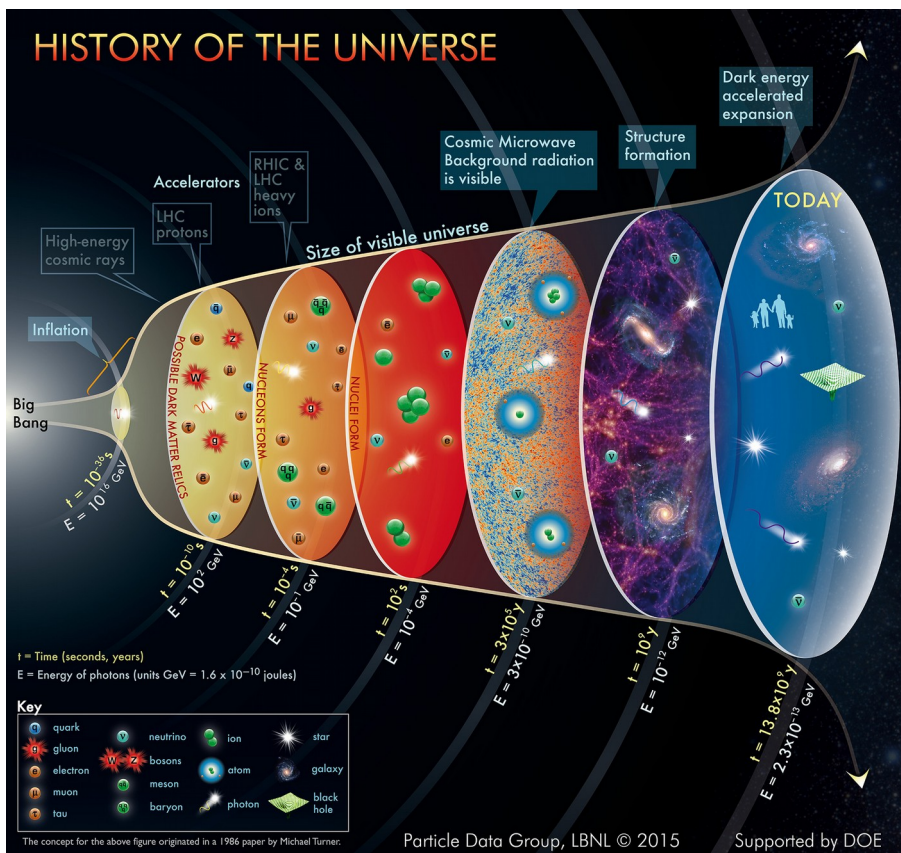
En década 1990 se plantea el modelo  $\Lambda$ CDM (Cold Dark Matter) que es el marco general aceptado actualmente, y que explica las observaciones: CMB, estructura a gran escala, y expansión acelerada.

## 2. Historia y composición del Universo

Tras la visión histórica de la cosmología física, se puede hacer una cronología del Universo a partir del Big Bang, explicando las distintas etapas y las partículas que lo formaban en cada periodo.

Además de cronología en función del tiempo, se puede realizar una cronología del universo en función de la temperatura y también en función de la energía (ambos decrecientes). En la representación el t creciente (E y T decrecientes) sería el eje horizontal (en escala no lineal), y verticalmente estaría el radio del Universo observable: se parte de 0 y en el periodo de inflación crece exponencialmente.

En inicio y fuera escala de Planck,  $t < 10^{-43}$  s,  $T > 10^{32}$  K, las leyes conocidas de la Física no son válidas (TOE)



Se indican algunas etapas:

- Época GUT  $< 10^{-36}$  s: tres fuerzas unificadas.
- Época inflacionaria  $< 10^{-32}$  s: aumenta tamaño Universo homogéneo en factor  $10^{26}$
- Época electrodébil  $< 10^{-10}$  s: se separa fuerza fuerte, E alta permite crear bosones W y Z.
- Época *quark*  $10^{-6}$  s: se separa fuerza débil, E alta permite plasma de *quarks*-gluones que no se combinan.
- Época hadrónica  $< 10^{-4}$  s: se produce bariogénesis.
- Nucleosíntesis  $< 3$  min: plasma, se fusionan nucleones y se forma H y He.
- Recombinación  $3 \cdot 10^5$  años: se forman átomos neutros y el Universo se hace transparente a los fotones y surge CMB
- Formación estructuras  $10^9$  años: se forman estrellas, galaxias y cúmulos. Sistema Solar a los  $9 \cdot 10^9$  años, hace unos 4,5 millones de años.

Historia del Universo, Particle Data Group

En el Universo hay asimetría entre materia y antimateria, pero en principio el Big Bang debería haber producido tantas partículas como antipartículas y se deberían haber eliminado. No hay una explicación clara





del origen de la asimetría de bariones; debe haber un comportamiento distinto de materia y antimateria que hizo que en algún momento hubiera un desequilibrio y predominara la materia, y una explicación posible es asociada a la violación de la simetría CP, descubierta en decaimiento mesones K en 1964 por Cronin y Fitch (Nobel 1980).

## **2.1 Evidencias experimentales en las que se apoya la teoría del Big Bang**

Las evidencias experimentales están asociadas con aspectos comentados en cosmología observacional:

- La expansión del Universo a través de mediciones *redshift* (ley Hubble)
- La radiación de fondo de microondas (CMB)
- La abundancia de elementos químicos en el Universo y su evolución temporal.
- Evolución y distribución de las estructuras en el Universo como galaxias y cúasares
- Universo homogéneo a gran escala, de acuerdo al principio cosmológico

## **3. Fronteras de la Física del siglo XXI**

En bloque de física de partículas comentadas algunas, aquí centrado en cosmología, aunque hay aspectos comunes como la unificación de interacciones, que a altas energías permitiría estudiar instantes iniciales Big Bang y estudiar comportamiento de agujeros negros con gravedad cuántica, la materia oscura, la energía oscura y la asimetría entre materia y antimateria.

-Época inflacionaria: qué la generó, se podría comprobar detectando cierta polarización del CMB que se intenta medir con experimentos como BICEP (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization).

-Tamaño del Universo más allá del Universo observable: posibilidad de multiversos con una expansión acelerada.

-Cuál es la geometría y el futuro del Universo: abierto (Big Rip), cerrado (Big Crunch), muerte térmica. Depende de la densidad de energía tiene el vacío, y está asociada a la constante cosmológica que controla la expansión.

-Astronomía de rayos cósmicos, de neutrinos y de ondas gravitacionales.

A nivel de computación, simulaciones de la estructura del Universo a partir de oscilaciones cuánticas primordiales y la física conocida, que generen un Universo acorde a lo observado.

