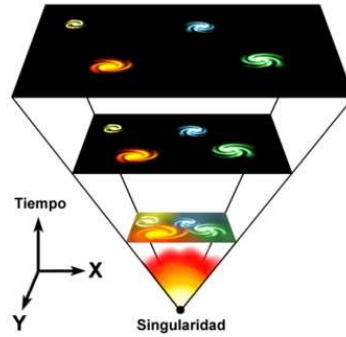


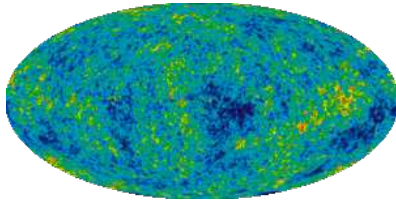
- La **teoría del Big Bang (Gran explosión)** es el **modelo cosmológico** predominante para los **períodos conocidos más antiguos del Universo** y su posterior evolución a gran escala.
- Afirma que el universo estaba en un estado de muy alta densidad y luego se **expandió**, enfriándose.
- Mediciones modernas datan este momento aproximadamente a 13,8 mil millones de años atrás, que sería por tanto la **edad del universo**.
- Después de la expansión inicial, el universo se enfrió lo suficiente para permitir la formación de las **partículas subatómicas** y más tarde simples **átomos**.
- Nubes gigantes de estos elementos primordiales más tarde se unieron a través de la **gravedad** para formar **estrellas** y **galaxias**.



**Figura 1.**

De acuerdo con el modelo del Big Bang, el **Universo** se expandió a partir de un estado extremadamente denso y caliente y continúa expandiéndose hasta el día de hoy.

- En 1929, a partir de análisis de **corrimiento al rojo** de las galaxias, **Edwin Hubble** concluyó que las galaxias se estaban distanciando, una prueba observacional importante consistente con la hipótesis de un universo en expansión.
- En 1964 se descubrió la **radiación de fondo cósmico de microondas**, lo que es una prueba crucial en favor del modelo del Big Bang, ya que esta teoría predijo la existencia de la radiación de fondo en todo el universo antes de ser descubierta.



**Figura 2.**

Fondo de Radiación Cósmica

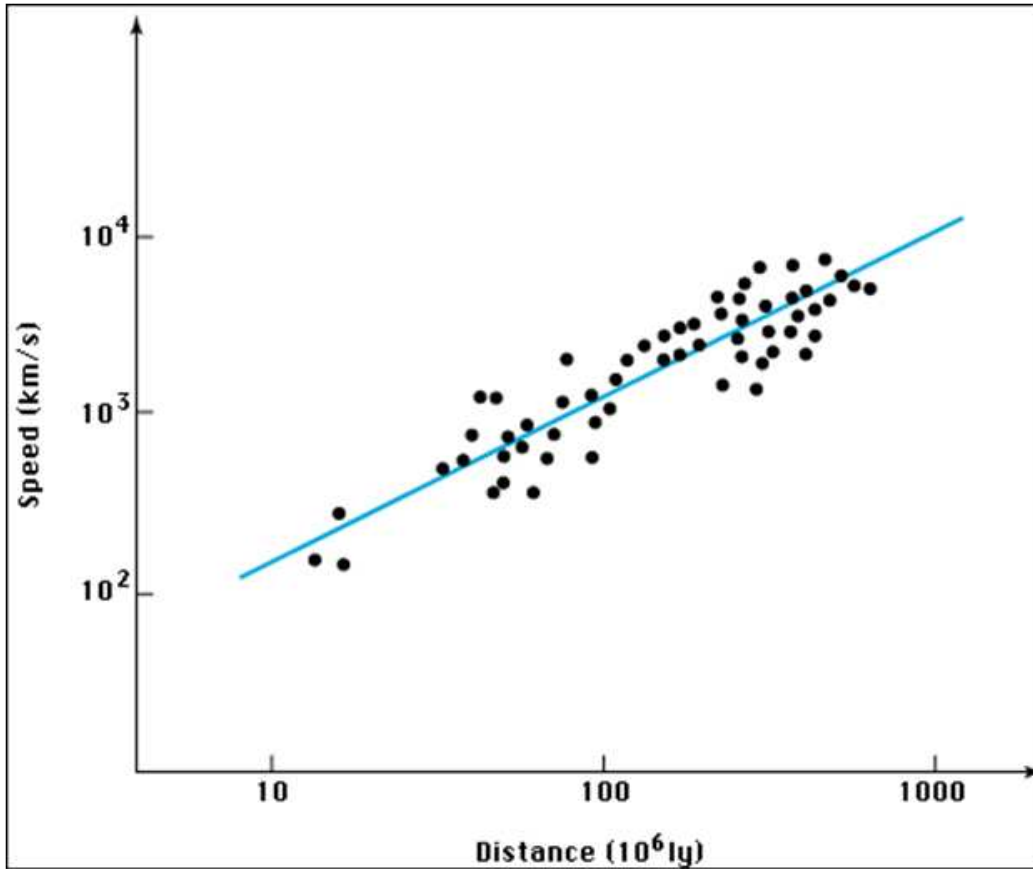
- Recientemente, las mediciones del corrimiento al rojo de las **supernovas** indican que la **expansión del universo se está acelerando**, observación atribuida a la **energía oscura**.

# 1 Hacia el modelo cosmológico estándar

**Cielo Nocturno es oscuro.** Paradoja de Olbers.

Si el universo se supone infinito, y que contiene un número infinito de estrellas luminosas uniformemente distribuidas, entonces cada línea visual debería acabar terminando en la superficie de una estrella. El brillo observado de la superficie es independiente de la distancia a la que esté, el área aparente de una estrella disminuye con el cuadrado de la distancia y el número de estrellas esperado aumenta con el cuadrado de la distancia. Así, cada punto en el cielo debería ser tan brillante como la superficie de una estrella. *La noche sería brillante!!*

**Solución:** Universo es finito en tiempo y espacio. Además se expande.



## 2 Big Bang

La Cosmología moderna se inicia en 1915 con Einstein. La Teoría general de la Relatividad predice la expansión del Universo(sin embargo, Einstein no creyó en esta predicción. Por este

motivo introdujo la constante cosmológica).

La expansión explica el corrimiento al rojo cosmológico. Cuantitativamente se tiene la Ley de Hubble  $V = HD$ .  $H$  es la constante de Hubble,  $D$  es la distancia y  $V$  es la velocidad de recesión de una galaxia.

**Principio Cosmológico:** El Universo es homogéneo e isotrópo. Si miramos hacia atrás en el tiempo, el Universo en expansión probablemente se originó en una explosión llamada Big Bang. La Edad del Universo es,  $\frac{1}{H} = 13.7$  mil millones de años ( $H=70$  km./s/Mpc).

Se supone un universo isotrópico. El único parámetro dinámico es el factor de escala  $a(t)$ . Es esencialmente el radio del Universo en el instante  $t$  después del Big Bang. Se introducen las siguientes definiciones:

**Densidad  $\rho$ .** Consiste de:

- Densidad de masa de la materia ordinaria
- Energía Cinética de partículas y radiación
- Energía asociada a campos
- Energía asociada al vacío

**Curvatura:**  $\frac{k}{a^2}$

A medida que el universo se expande, este término se hace menos importante ( $k$  es una constante que mide la curvatura del espacio.  $k = 0$  corresponde a un espacio plano).

El universo está compuesto de:

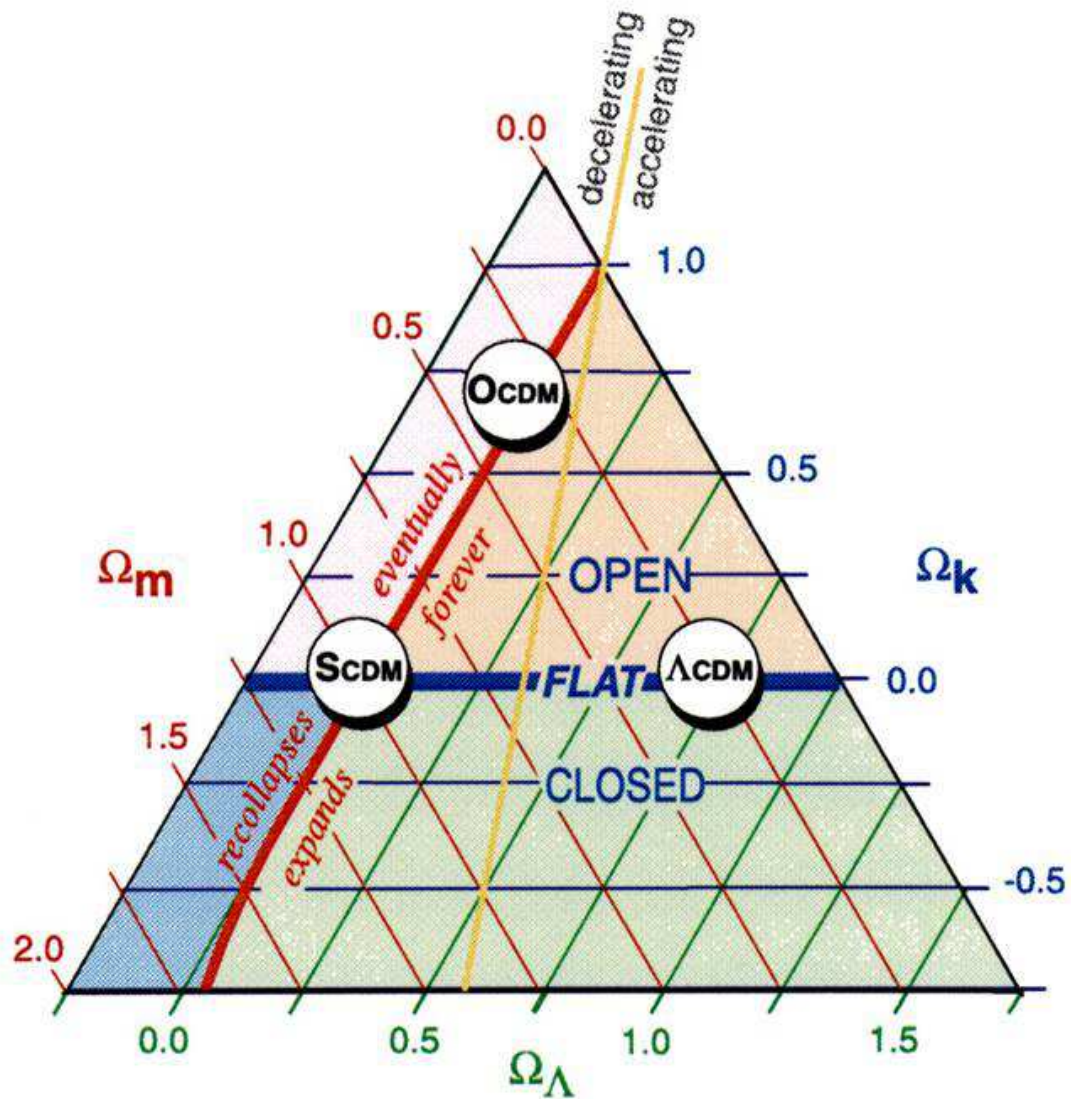
- Materia bariónica (ordinaria) y oscura (exótica),  $\rho_m$
- Curvatura,  $\rho_k$
- Energía del vacío (constante cosmológica),  $\rho_\Lambda$

Las ecuaciones de la Relatividad General implican:

$$H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_m + \rho_\Lambda) - \frac{k}{a^2}$$

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$
$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{8\pi G \rho}{3H^2}, \Omega_k = -\frac{k}{a^2 H^2}$$
$$1 = \Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda.$$





La gravedad es siempre atractiva. Por lo tanto, la expansión del Universo debe estar frenando. Sin embargo, observaciones recientes indican que el Universo se está acelerando. Esto se deduce del estudio de Supernovas y de la Estructura de la Radiación de Fondo. Dado que no conocemos el agente que provoca la aceleración de la expansión se le da el nombre de *Energía Cósmica Oscura*.

**Tres etapas en la evolución del Universo.** Dominación por: Radiación, Materia, Energía Oscura

## Relación $d_L$ vs $z$

- Patrones de luminosidad determinan  $d_L$ . Se compara  $L$  conocida al flujo observado en la Tierra,  $f_{\text{obs}} = \frac{L}{4\pi d_L^2}$
- Se mide  $z$  por efecto Doppler.
- Para  $d_L$  pequeño  $d_L = \alpha z$
- Para  $d_L$  grandes la relación  $d_L$  vs  $z$  ya no es lineal ya que la aceleración o desaceleración de la expansión se hace importante.  $d_L$  vs  $z$  es función de  $\Omega_m$  y  $\Omega_\Lambda$

## 2.1 Supernovas Ia

### SN II - Espectro con líneas de hidrógeno

- Brillo máximo -18
- Decaen en 1 año
- Frecuencia media, una en 44 años

### SN I - No tienen líneas de hidrógeno

- Ia - Línea de SiII (6152Å). Explosión de una enana blanca de carbono-oxígeno en un sistema binario. Tienen una curva de luminosidad característica.

- Ib y Ic - Líneas de He. Son como tipos II pero sin hidrógeno
- Frecuencia media, una en 36 años

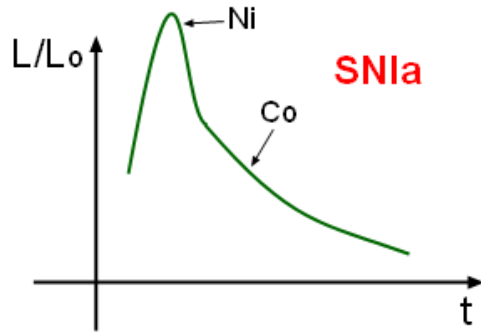
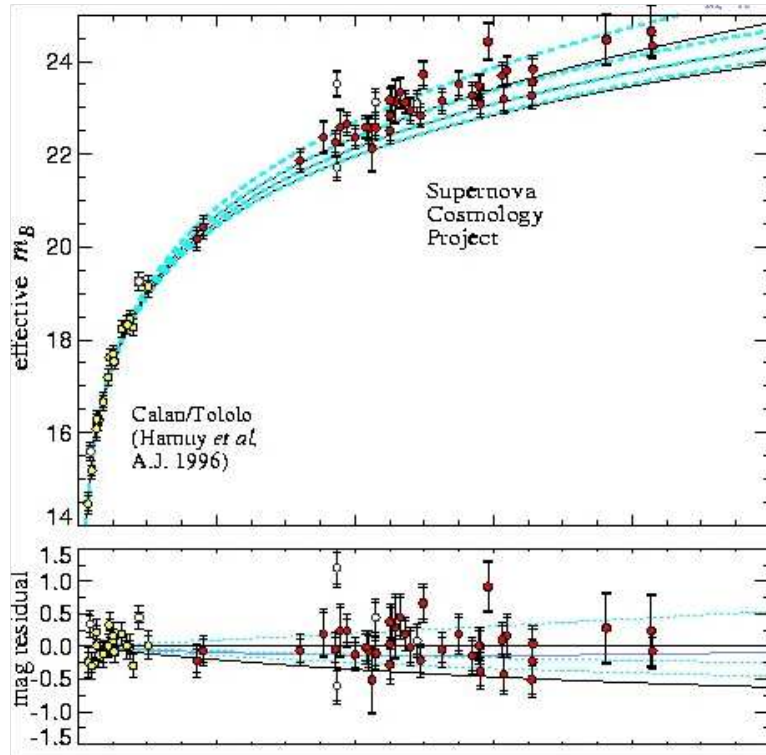
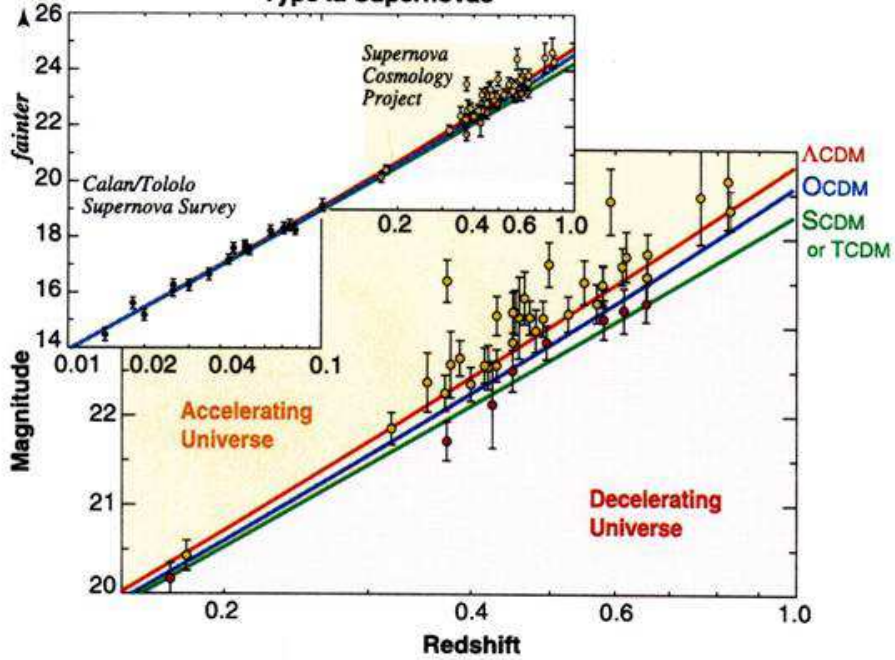


Gráfico de luminosidad (relativa al Sol) como función del tiempo, para una Supernova Ia. El máximo se debe al decaimiento del Niquel (Ni), subsecuentemente la luminosidad se debe al Cobalto (Co).

# Aceleración de la Expansión



# Type Ia Supernovae



A medida que el Universo se expande y enfría, protones y neutrones colisionan formando núcleos.

En los primeros tres minutos aproximadamente, alrededor de una cuarta parte del material bariónico primordial se convirtió en núcleos de helio, compuestos cada uno por dos protones y dos neutrones. Menos del 1% del material bariónico primordial se convirtió mediante nucleosíntesis en pequeñas cantidades de otros elementos ligeros, en particular deuterio y litio. Esta mezcla constituyó la materia prima a partir de la cual se formaron las primeras estrellas.

300,000 años después los fotones (radiación) ya no tienen suficiente energía para ionizar los átomos. Los electrones libres desaparecen, formando átomos eléctricamente neutros. Dado que los electrones son las principales partículas que desvían la luz, a partir de este momento el universo se volvió transparente.

Penzias y Wilson, 1965, la radiación llena el Universo.

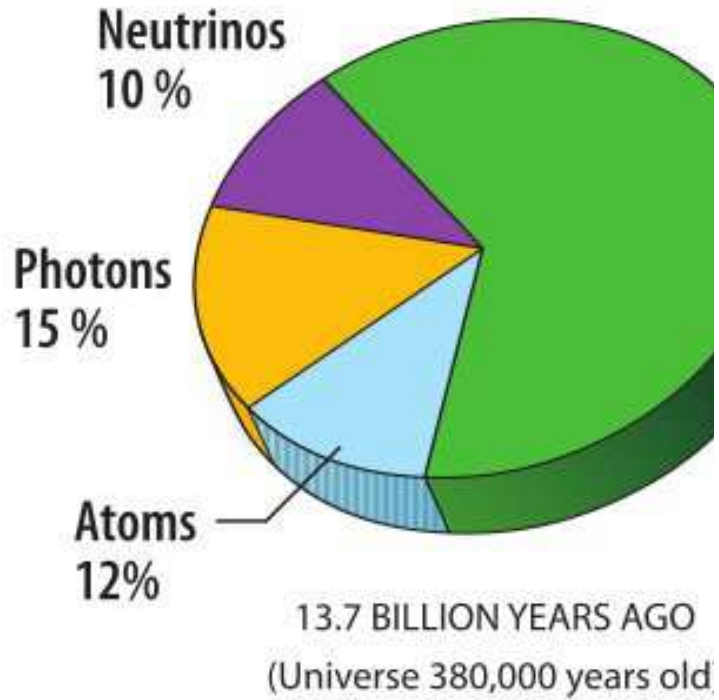
- Evidencia del Big Bang
- 1991, observaciones con COBE. Cuerpo negro,  $T = 2.73$  K, Radiación casi perfectamente isotrópica
- Levemente más caliente hacia constelación de Leo Resultado del movimiento general de la Tierra con una velocidad de  $\sim 390$  km./s hacia Leo
- Vía Láctea se mueve hacia Centauros con 600 km./s.
- 1999, observaciones con BOOMERANG

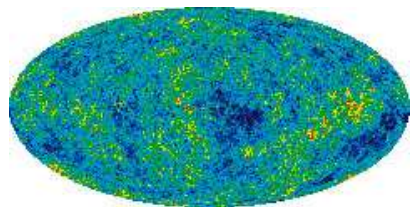


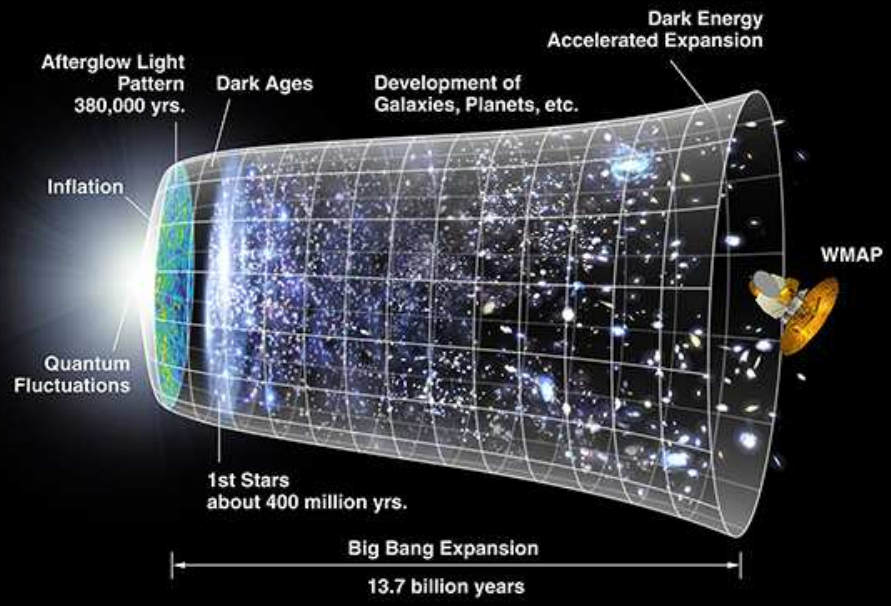
- WMAP



TODAY







La isotropía resulta ser un problema en la teoría anterior. Dos extremos opuestos a nosotros están separados por 26 mil millones de años. Entonces por qué tienen la misma temperatura? Inflación, ocurre cuando el Universo tenía una edad de  $10^{-23}$ s. Una pequeña parte del espacio crece para convertirse en nuestro Universo. Qué genera la Inflación? ? ? constante cosmológica, energía cósmica oscura...

- Basándose en medidas de la expansión del Universo utilizando observaciones de las **supernovas tipo 1a**, en función de la variación de la temperatura en diferentes escalas en la radiación de fondo de microondas y en función de la **correlación** de las galaxias, la **edad del Universo** es de aproximadamente  $13,7 \pm 0,2$  miles de millones de años. Es notable el hecho de que tres mediciones independientes sean consistentes, por lo que se consideran una fuerte evidencia del llamado **modelo de concordancia** que describe la naturaleza detallada del Universo.
- El universo en sus primeros momentos estaba lleno **homogénea** e **isótopamente** de una **energía** muy densa y tenía una temperatura y presión concomitantes. Se expandió y se enfrió, experimentando **cambios de fase** análogos a la **condensación** del vapor o a la congelación del agua, pero relacionados con las **partículas elementales**.
- Aproximadamente  $10^{-35}$  segundos después del **tiempo de Planck** un cambio de fase causó que el Universo se expandiese de forma **exponencial** durante un período llamado **inflación cósmica**.
- Al terminar la **inflación**, los componentes materiales del Universo quedaron en la forma de un **plasma de quarks-gluones**, en donde todas las partes que lo formaban estaban en movimiento en forma **relativista**.
- Con el crecimiento en tamaño del Universo, la temperatura descendió, y debido a un cambio aún desconocido denominado **bariogénesis**, los **quarks** y los **gluones** se combinaron en **bariones** tales como el **protón** y el **neutrón**, produciendo de alguna manera la **asimetría**

observada actualmente entre la **materia** y la **antimateria**. Las temperaturas aún más bajas condujeron a nuevos cambios de fase, que rompieron la **simetría**, así que les dieron su forma actual a las **fuerzas fundamentales de la física** y a las **partículas elementales**.

- Más tarde, protones y neutrones se combinaron para formar los núcleos de deuterio y de helio, en un proceso llamado nucleosíntesis primordial. Al enfriarse el Universo, la materia gradualmente dejó de moverse de forma relativista y su densidad de energía comenzó a dominar gravitacionalmente sobre la radiación.
- Pasados 300 000 años, los electrones y los núcleos se combinaron para formar los átomos (mayoritariamente de hidrógeno). Por eso, la radiación se desacopló de los átomos y continuó por el espacio prácticamente sin obstáculos. Ésta es la radiación de fondo de microondas.
- Al pasar el tiempo, algunas regiones ligeramente más densas de la materia casi uniformemente distribuida crecieron gravitacionalmente, haciéndose más densas, formando nubes, estrellas, galaxias y el resto de las estructuras astronómicas que actualmente se observan. Los detalles de este proceso dependen de la cantidad y tipo de materia que hay en el Universo. Los tres tipos posibles se denominan materia oscura fría, materia oscura caliente y materia bariónica. Las mejores medidas disponibles (provenientes del WMAP) muestran que la forma más común de materia en el universo es la materia oscura fría. Los otros dos tipos de materia sólo representarían el 20 por ciento de la materia del Universo.
- El Universo actual parece estar dominado por una forma misteriosa de energía conocida como energía oscura. Aproximadamente el 70 por ciento de la densidad de energía del universo actual está en esa forma. Una de las propiedades características de este componente del universo es el hecho de que provoca que la expansión del universo varíe de una relación lineal entre velocidad y distancia, haciendo que el espacio-tiempo se

expanda más rápidamente que lo esperado a grandes distancias. La energía oscura toma la forma de una **constante cosmológica** en las **ecuaciones de campo de Einstein** de la relatividad general, pero los detalles de esta **ecuación de estado** y su relación con el **modelo estándar** de la física de partículas continúan siendo investigados tanto en el ámbito de la física teórica como por medio de observaciones.



Más misterios aparecen cuando se investiga más cerca del principio, cuando las energías de las partículas eran más altas de lo que ahora se puede estudiar mediante experimentos. No hay ningún modelo físico convincente para el primer  $10^{-33}$  segundo del universo, antes del cambio de fase que forma parte de la [teoría de la gran unificación](#). En el "primer instante", la teoría gravitacional de Einstein predice una [singularidad](#) en donde las densidades son infinitas. Para resolver esta [paradoja física](#), hace falta una teoría de la [gravedad cuántica](#). La comprensión de este período de la historia del universo figura entre los mayores [problemas no resueltos de la física](#).

En general, se consideran tres las evidencias empíricas que apoyan la teoría cosmológica del *Big Bang*. Éstas son: la expansión del universo que se expresa en la Ley de Hubble y que se puede apreciar en el [corrimiento hacia el rojo](#) de las galaxias, las medidas detalladas del fondo cósmico de microondas, y la [abundancia de elementos ligeros](#). Además, la [función de correlación](#) de la [estructura a gran escala del Universo](#) encaja con la teoría del *Big Bang*.

De la observación de galaxias y **cuasares** lejanos se desprende la idea de que estos objetos experimentan un **corrimiento hacia el rojo**, lo que quiere decir que la **luz** que emiten se ha desplazado proporcionalmente hacia longitudes de onda más largas. Esto se comprueba tomando el **espectro** de los objetos y comparando, después, el patrón **espectroscópico** de las **líneas de emisión** o **absorción** correspondientes a átomos de los **elementos** que interactúan con la **radiación**. En este análisis se puede apreciar cierto corrimiento hacia el rojo, lo que se explica por una velocidad recesional correspondiente al **efecto Doppler** en la radiación. Al representar estas velocidades recesionales frente a las distancias respecto a los objetos, se observa que guardan una **relación lineal**, conocida como **Ley de Hubble**:

$$V = H D$$

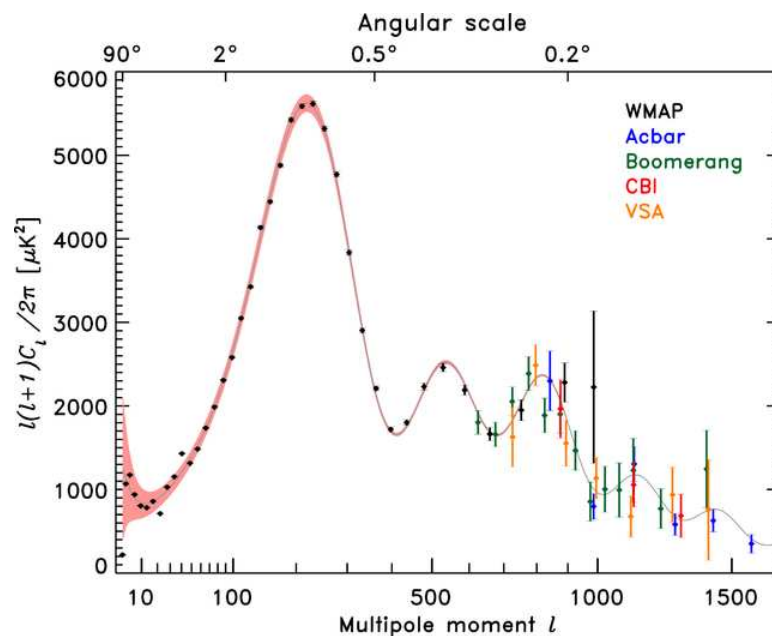
donde  $V$  es la **velocidad recesional**,  $D$  es la distancia al objeto y  $H$  es la **constante de Hubble**, que el satélite WMAP estimó en  $71 \pm 4$  **km/s/Mpc**.

Una de las predicciones de la teoría del *Big Bang* es la existencia de la radiación cósmica de fondo, **radiación de fondo de microondas** o CMB (*Cosmic microwave background*). El universo temprano, debido a su alta temperatura, se habría llenado de luz emitida por sus otros componentes. Mientras el universo se enfriaba debido a la expansión, su temperatura habría caído por debajo de 3000 K. Por encima de esta temperatura, los electrones y protones están separados, haciendo el universo opaco a la luz. Por debajo de los 3000 K se forman los átomos, permitiendo el paso de la luz a través del gas del universo. Esto es lo que se conoce como **disociación de fotones**.

La radiación en este momento habría tenido el espectro del **cuerpo negro** y habría viajado libremente durante el resto de vida del universo, sufriendo un corrimiento hacia el rojo como consecuencia de la expansión de Hubble. Esto hace variar el espectro del cuerpo negro de 3345 K a un espectro del cuerpo negro con una temperatura mucho menor. La radiación, vista desde cualquier punto del universo, parecerá provenir de todas las direcciones en el espacio.

En 1965, **Arno Penzias** y **Robert Wilson**, mientras desarrollaban una serie de observaciones de diagnóstico con un receptor de **microondas** propiedad de los **Laboratorios Bell**, descubrieron la radiación cósmica de fondo. Ello proporcionó una confirmación sustancial de las predicciones generales respecto al CMB —la radiación resultó ser isótropa y constante, con un espectro del cuerpo negro de cerca de 3 K— e inclinó la balanza hacia la hipótesis del *Big Bang*. Penzias y Wilson recibieron el **Premio Nobel** por su descubrimiento.

Dos de los grandes éxitos de la teoría del Big Bang son sus predicciones de este espectro de **cuerpo negro** casi perfecto y su predicción detallada de las **anisotropías** en el fondo cósmico de microondas. El reciente **WMAP** ha medido precisamente estas anisotropías sobre el cielo por completo a escalas angulares de  $0,2^\circ$ . Estas se pueden utilizar para estimar los parámetros del **Modelo Lambda-CDM** estándar del Big Bang. Alguna información, como la **forma del Universo**, se puede obtener directamente del CMB, mientras otros, como la **constante de Hubble**, no están restringidos y tienen que ser inferidos de otras medidas.



**Figura 3.**

El espectro de potencia de la anisotropía de la temperatura del fondo de radiación de microondas en función de de la escala angular (o **momento multipolar**). Los datos mostrados son del **WMAP** (2006), **Acbar** (2004) **Boomerang** (2005), **CBI** (2004) y **VSA** (2004).



Se puede calcular, usando la teoría del *Big Bang*, la concentración de helio-4, helio-3, deuterio y litio-7.1 en el universo como proporciones con respecto a la cantidad de hidrógeno normal, H. Todas las abundancias dependen de un solo parámetro: la razón entre fotones y bariones, que por su parte puede calcularse independientemente a partir de la estructura detallada de la radiación cósmica de fondo. Las proporciones predichas (en masa, no volumen) son de cerca de 0,25 para la razón  ${}^4\text{He}/\text{H}$ , alrededor de  $10^{-3}$  para  ${}^2\text{He}/\text{H}$ , y alrededor de  $10^{-4}$  para  ${}^3\text{He}/\text{H}$ .

Estas abundancias medidas concuerdan, al menos aproximadamente, con las predichas a partir de un valor determinado de la razón de bariones a fotones, y se considera una prueba sólida en favor del *Big Bang*, ya que esta teoría es la única explicación conocida para la abundancia relativa de elementos ligeros. De hecho no hay, fuera de la teoría del *Big Bang*, ninguna otra razón obvia por la que el universo debiera, por ejemplo, tener más o menos helio en proporción al hidrógeno.





El problema del horizonte, también llamado **problema de la causalidad**, resulta del hecho de que la información no puede viajar más rápido que la luz, de manera que dos regiones en el espacio separadas por una distancia mayor que la velocidad de la luz multiplicada por la edad del universo no pueden estar **causalmente** conectadas. En este sentido, la isotropía observada de la radiación de fondo de microondas (CMB) resulta problemática, debido a que el tamaño del **horizonte de partículas** en ese tiempo corresponde a un tamaño de cerca de dos grados en el cielo. Si el universo hubiera tenido la misma historia de expansión desde la época de Planck, no habría mecanismo que pudiera hacer que estas regiones tuvieran la misma temperatura.

Esta aparente inconsistencia se resuelve con la **teoría inflacionista**, según la cual un campo de energía escalar isótropo domina el universo al transcurrir un tiempo de Planck luego de la época de Planck. Durante la inflación, el universo sufre una expansión exponencial, y regiones que se afectan mutuamente se expanden más allá de sus respectivos horizontes. El **principio de incertidumbre de Heisenberg** predice que durante la fase inflacionista habrá **fluctuaciones primordiales**, que se simplificarán hasta la escala cósmica. Estas fluctuaciones sirven de semilla para toda la estructura actual del universo. Al pasar la inflación, el universo se expande siguiendo la ley de Hubble, y las regiones que estaban demasiado lejos para afectarse mutuamente vuelven al horizonte. Esto explica la isotropía observada de la CMB. La inflación predice que las fluctuaciones primordiales son casi invariantes según la escala y que tienen una **distribución normal** o gaussiana, lo cual ha sido confirmado con precisión por medidas de la CMB.

El problema de la planaridad (*flatness problem* en inglés) es un problema observacional que resulta de las consecuencias que la métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker tiene para con la geometría del universo. En general, se considera que existen tres tipos de geometrías posibles para nuestro universo según su curvatura espacial: geometría elíptica (curvatura positiva), geometría hiperbólica (negativa) y geometría euclidiana o plana (curvatura nula).

Dicha geometría viene determinada por la cantidad total de densidad de energía del universo (medida mediante el tensor de tensión-energía). Siendo  $\Omega$  el cociente entre la densidad de energía  $\rho$  medida observacionalmente y la densidad crítica  $\rho_c$ , se tiene que para cada geometría las relaciones entre ambos parámetros han de ser :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega > 1 \text{ Curvatura positiva} \\ \Omega = 1 \text{ Curvatura nula} \\ \Omega < 1 \text{ Curvatura negativa} \end{array} \right.$$

La densidad en el presente es muy cercana a la densidad crítica, o lo que es lo mismo, el universo hoy es espacialmente plano, dentro de una buena aproximación. Sin embargo, las diferencias con respecto a la densidad crítica crecen con el tiempo, luego en el pasado la densidad tuvo que ser aún más cercana a esta. Se ha medido que en los primeros momentos del universo la densidad era diferente a la crítica tan sólo en una parte en  $10^{15}$  (una milbillonésima parte). Cualquier desviación mayor hubiese conducido a una muerte térmica o un Big Crunch y el universo no sería como ahora.

Una solución a este problema viene de nuevo de la [teoría inflacionaria](#). Durante el periodo inflacionario el [espacio-tiempo](#) se expandió tan rápido que provocó una especie de *estiramiento* del universo acabando con cualquier curvatura residual que pudiese haber. Así la inflación pudo hacer al universo plano.

La objeción de los monopolos magnéticos fue propuesta a finales de la década de 1970. Las teorías de la gran unificación predicen defectos topológicos en el espacio que se manifestarían como monopolos magnéticos encontrándose en el espacio con una densidad mucho mayor a la observada. De hecho, hasta ahora, no se ha dado con ningún monopolo. Este problema también queda resuelto mediante la inflación cósmica, dado que ésta elimina todos los puntos defectuosos del universo observable de la misma forma que conduce la geometría hacia su forma plana. Es posible que aun así pueda haber monopolos pero se ha calculado que apenas si habría uno por cada universo visible, una cantidad ínfima y no observable en todo caso.



**Figura 4.**

Imagen compuesta del cúmulo de galaxias CL0024+17 tomada por el telescopio espacial Hubble muestra la creación de un efecto de lente gravitacional. Se supone que este efecto se debe, en gran parte, a la interacción gravitatoria con la materia oscura.

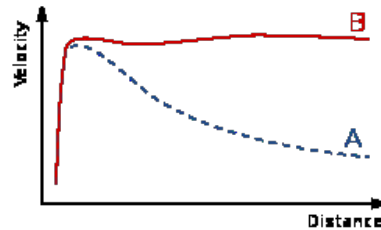
En astrofísica y cosmología física se denomina **materia oscura** a la hipotética materia que no emite suficiente radiación electromagnética para ser detectada con los medios técnicos actuales, pero cuya existencia se puede deducir a partir de los efectos gravitacionales que causa en la materia visible, tales como las estrellas o las galaxias, así como en las anisotropías del fondo cósmico de microondas presente en el universo.

La materia oscura fue propuesta por [Fritz Zwicky](#) en 1933 ante la evidencia de una «masa no visible» que influía en las velocidades orbitales de las galaxias en los cúmulos. Posteriormente, otras observaciones han indicado la presencia de materia oscura en el universo: estas observaciones incluyen la citada velocidad de rotación de las galaxias, las [lentes gravitacionales](#) de los objetos de fondo por los cúmulos de galaxias, tales como el [Cúmulo Bala](#) (1E 0657-56) y la distribución de la temperatura del gas caliente en galaxias y cúmulos de galaxias.

La materia oscura también desempeña un papel central en la [formación de estructuras](#) y la [evolución de galaxias](#) y tiene efectos medibles en la [anisotropía](#) de la [radiación de fondo de microondas](#). Todas estas pruebas sugieren que las galaxias, los cúmulos de galaxias y todo el Universo contiene mucha más materia que la que interactúa con la radiación electromagnética: lo restante es llamado "el componente de materia oscura".

La composición de la materia oscura se desconoce, pero puede incluir **neutrinos** ordinarios y pesados, partículas elementales recientemente postuladas como los **WIMPs** y los **axiones**, cuerpos astronómicos como las **estrellas enanas**, los **planetas** (colectivamente llamados **MACHO**) y las nubes de gases no luminosos. Las pruebas actuales favorecen los modelos en que el componente primario de la materia oscura son las nuevas partículas elementales llamadas colectivamente materia oscura no bariónica.

La determinación de la naturaleza de esta masa no visible es una de las cuestiones más importantes de la cosmología moderna y la **física de partículas**.



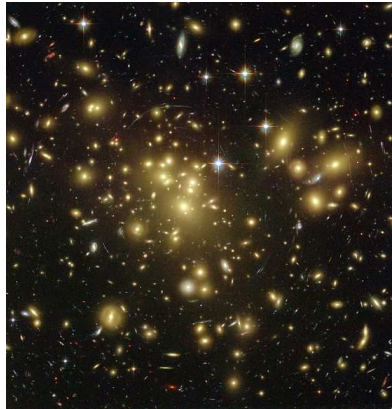
**Figura 5.**

Curva de rotación de una galaxia espiral típica: predicho (A) y observado (B). La materia oscura explicaría la apariencia plana de la curva de rotación en radios grandes.

El componente de materia oscura tiene bastante más masa que el componente "visible" del **Universo**. En el presente, la densidad de **bariones** ordinarios y la radiación en el Universo se estima que son equivalentes aproximadamente a un átomo de hidrógeno por metro cúbico de espacio. Sólo aproximadamente el 5% de la densidad de energía total en el Universo (inferido de los efectos gravitacionales) se puede observar directamente. Se estima que en torno al 23% está compuesto de materia oscura. El 72% restante se piensa que consiste de **energía oscura**,



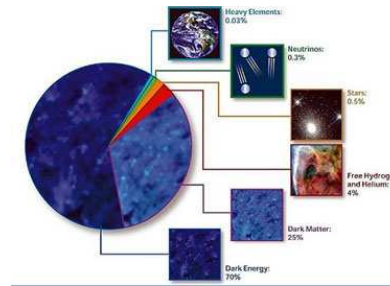
un componente incluso más extraño, distribuido difusamente en el espacio. Alguna materia bariónica difícil de detectar realiza una contribución a la materia oscura, aunque algunos autores defienden que constituye sólo una pequeña porción. Aún así, hay que tener en cuenta que del 5% de **materia bariónica** estimada (la mitad de ella todavía no se ha detectado) se puede considerar **materia oscura bariónica**: Todas las estrellas, galaxias y gas observable forman menos de la mitad de los bariones (que se supone debería haber) y se cree que toda esta materia puede estar distribuida en filamentos gaseosos de baja densidad formando una red por todo el universo y en cuyos nodos se encuentran los diversos cúmulos de galaxias. En mayo de 2008, el telescopio **XMM-Newton** de la **agencia espacial europea** ha encontrado pruebas de la existencia de dicha red de filamentos.



**Figura 6.** Efecto de las lentes gravitacionales fuertes observado por el **Telescopio espacial Hubble** en **Abell 1689** que indica la presencia de materia oscura. Agrandar la imagen para ver las curvaturas producidas por las lentes gravitacionales. Créditos: **NASA/ESA**



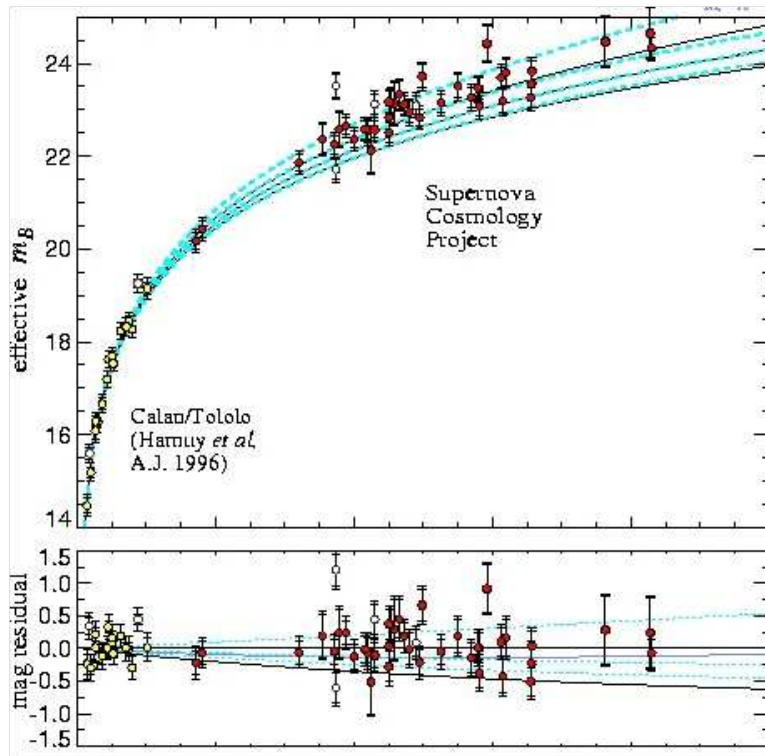
La **energía oscura** es una forma de energía que estaría presente en todo el espacio, produciendo una presión que tiende a acelerar la **expansión del Universo**, resultando en una fuerza gravitacional repulsiva. Considerar la existencia de la energía oscura es la manera más frecuente de explicar las observaciones recientes de que el Universo parece estar en **expansión** acelerada. En el **modelo estándar de la cosmología**, la energía oscura aporta casi tres cuartas partes de la masa-energía total del Universo.



**Figura 7.**

Según estimaciones, resumidas en este gráfico de la **NASA**, alrededor del 70% del contenido energético del Universo consiste en **energía oscura**, cuya presencia se infiere en su efecto sobre la expansión del Universo pero sobre cuya naturaleza última se desconoce casi todo.

En 1998 las observaciones de supernovas de tipo 1a muy lejanas, realizadas por parte del Supernova Cosmology Project en el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley y el High-z Supernova Search Team, sugirieron que la expansión del Universo se estaba acelerando. Desde entonces, esta aceleración se ha confirmado por varias fuentes independientes: medidas de la radiación de fondo de microondas, las lentes gravitacionales, nucleosíntesis primigenia de elementos ligeros y la estructura a gran escala del Universo, así como una mejora en las medidas de las supernovas han sido consistentes con el modelo Lambda-CDM.





La explicación más simple para la energía oscura es que simplemente es el "coste de tener espacio"; es decir, un volumen de espacio tiene alguna energía fundamental intrínseca. Esto es la constante cosmológica, algunas veces llamada Lambda (de ahí el [modelo Lambda-CDM](#)) por la letra griega  $\Lambda$ , el símbolo utilizado matemáticamente para representar esta cantidad. Como la energía y la masa están relacionadas por la ecuación  $E = mc^2$ , la teoría de la [relatividad general](#) predice que tendrá un efecto gravitacional. Algunas veces es llamada [energía del vacío](#) porque su densidad de energía es la misma que la del [vacío](#). De hecho, muchas teorías de la [física de partículas](#) predicen [fluctuaciones del vacío](#) que darían al vacío exactamente este tipo de energía. Los cosmólogos estiman que la constante cosmológica es del orden de  $10^{-29} \text{g/cm}^3$  o unos  $10^{-120}$  en [unidades de Planck](#).

La constante cosmológica tiene una presión negativa igual a su densidad de energía, y así causa que la expansión del Universo se acelere.

Un gran problema pendiente es que muchas [teorías cuánticas de campos](#) predicen una gran constante cosmológica a partir de la energía del vacío cuántico, superior a 120 órdenes de magnitud. Esto casi se necesitaría cancelar, pero no exactamente, por un término igualmente grande de signo opuesto. Algunas teorías [supersimétricas](#) necesitan una constante cosmológica que sea exactamente cero, lo que no ayuda.