

THE BIG BANG THEORY: UNA INTRODUCCIÓN

J. J. Ruiz-Lorenzo

Dep. Física, Universidad de Extremadura

http://www.eweb.unex.es/eweb/fisteor/juan/juan_talks.html

Badajoz, 6 de Mayo 2013



Plan de la Charla

- Expansión del Universo
- Teoría: Relatividad General y las Ecuaciones de Friedmann
- El Fondo Cósmico de Microondas (Sonda Planck)
- Parámetros Cosmológicos
- Nucleosíntesis
- Materia Oscura
- Problemas del modelo cosmológico estándar (Λ CDM):
 - ▶ Constante Cosmológica
 - ▶ Planitud
 - ▶ Monopolos
 - ▶ Horizontes
 - ▶ Antimateria

Expansión de Universo (I)

A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

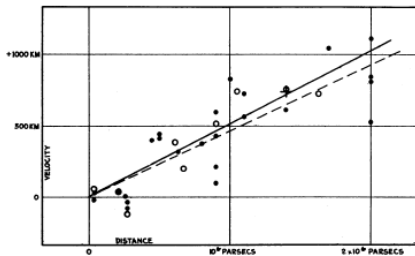
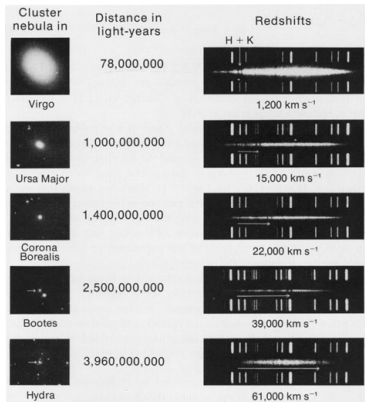


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

$$v = H_0 d, \quad H_0 \simeq 500 \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}}.$$

$$H_0^{-1} \simeq 2 \times 10^9 \text{ años.}$$

Expansión de Universo (II)



$$z = \frac{\lambda_g - \lambda_o}{\lambda_0}$$

Luminosidades Absoluta y Aparente de una estrella

- Luminosidad Absoluta (L): Potencia Total emitida por la estrella
 - ▶ Magnitud Absoluta (M): $L = 10^{-2M/5} \times 3 \times 10^{32} \text{ J/s}$
- Luminosidad Aparente (l): Potencia por unidad de superficie recibida en la Tierra
 - ▶ Magnitud Aparente (m): $l = 10^{-2m/5} \times 2.5 \times 10^{-8} \text{ J/m}^2/\text{s}$

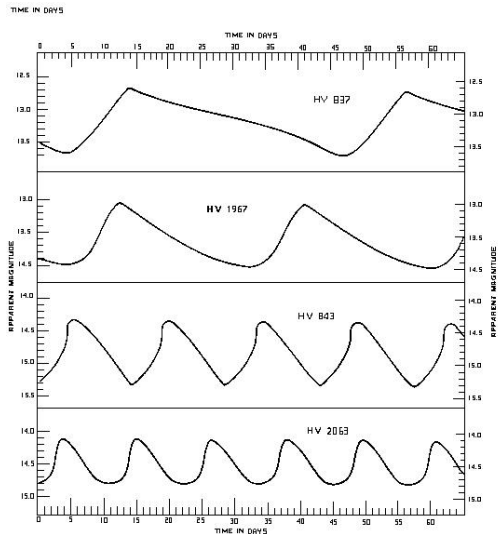
Relación:

$$l = \frac{L}{4\pi D_L^2}$$

$$5 \log_{10} \left(\frac{D_L}{10\text{pc}} \right) = m_B - M_B$$

Expansión de Universo (III)

Curvas de luz para Cefeidas.



Expansión de Universo (IV)

Cefeidas. Relación Periodo-Luminosidad:

$$M_v = -2.81 \log_{10}(P) - (1.43 \pm 0.1)$$

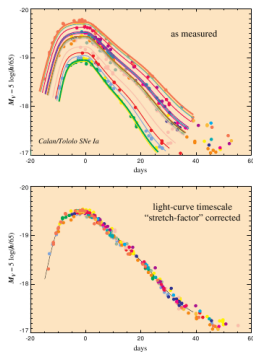
Descubierta por Henrietta Swan Leavitt.



$$5 \log_{10} \left(\frac{D_L}{10\text{pc}} \right) = m_B - M_B$$

Expansión de Universo (V)

Supernovas SNIa.



$$5 \log_{10} \left(\frac{D_L}{10 \text{pc}} \right) = m_B - M_B + \alpha(s - 1) - \beta c$$

Edwin Hubble

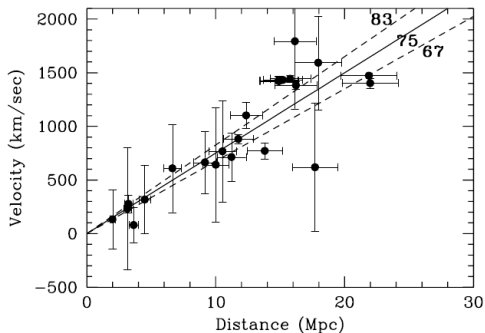


Hubble Space Telescope (NASA)



Expansión de Universo (VI)

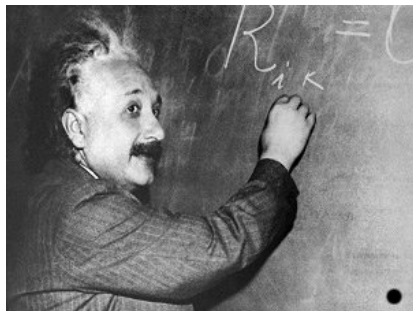
Hubble Diagram for Cepheids (flow-corrected)



$$v = H_0 d, \quad H_0 \simeq 75 \frac{\text{Km}}{\text{s Mpc}}.$$

$$H_0^{-1} \simeq 13 \times 10^9 \text{ años.}$$

Relatividad General



Geometría= Materia

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Ecuaciones de Friedmann (I)

- Principio Cosmológico Perfecto:
Todos los observadores del Universo ven la misma cosmohistoria.
- El universo es homogéneo e isótropo.
- Espacios maximalmente simétricos.
- Métrica de Robertson-Walker

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left[\frac{d\sigma^2}{1 - k\sigma^2} + \sigma^2 d\theta^2 + \sigma^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right]$$

- Tensor energía-momento de un fluido ideal:

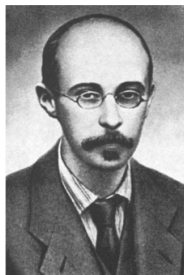
$$T_{\mu\nu} = pg_{\mu\nu} + \left(\frac{p}{c^2} + \rho \right) U_\mu U_\nu$$

Ecuaciones de Friedmann (II)

- Sustituyendo en las ecuaciones de Einstein, obtenemos las ecuaciones de Friedmann:

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi}{3}G\rho a^2 - kc^2$$

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi}{3}G\left(\rho + 3\frac{p}{c^2}\right)a$$



A. Friedmann

La densidad crítica

- La ecuación de Friedmann:

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi}{3}G\rho a^2 - kc^2$$

- $k = 0$, $H(t) \equiv \dot{a}/a$.
- La densidad crítica:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

- Expresaremos todas las densidades en función de la crítica:

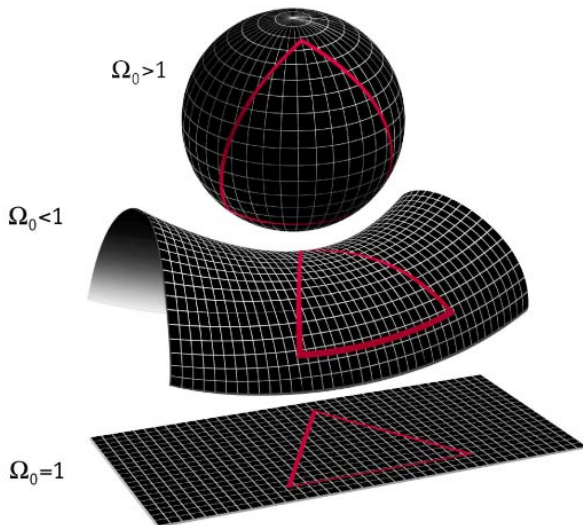
$$\Omega_i \equiv \frac{\rho_i}{\rho_c}$$

$$\Omega = \sum_i \Omega_i$$

- El escalar de Ricci (curvatura) está dado por:

$$R = 6H^2(\Omega - 1)$$

Curvatura



MAP990006

La constante Cosmológica como energía del vacío (I)

Ecuaciones de Friedmann con constante Cosmológica (Λ):

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi}{3}G\rho a^2 + \frac{1}{3}\Lambda c^2 a^2 - kc^2$$

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi}{3}G\left(\rho + 3\frac{p}{c^2}\right)a + \frac{1}{3}\Lambda c^2 a$$

Ecuaciones de Friedmann sin constante Cosmológica pero con densidad ($\rho + \rho_v$) y presión ($p + p_v$):

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi}{3}G(\rho + \rho_v)a^2 - kc^2$$

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi}{3}G\left(\rho + \rho_v + 3\frac{p}{c^2} + 3\frac{p_v}{c^2}\right)a$$

Obtenemos:

$$\rho_v = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}, p_v = -\frac{\Lambda}{8\pi G}$$

Por lo que:

$$p_v = -\rho_v c^2$$

La constante Cosmológica como energía del vacío (II)

Conservación de la energía:

$$\frac{d}{dt} (\rho_{\text{v}} c^2 R(t)^3) + p_{\text{v}} \frac{d}{d} (R(t)^3) = 0$$

Si la **densidad del vacío es constante**, obtenemos la ecuación de estado:

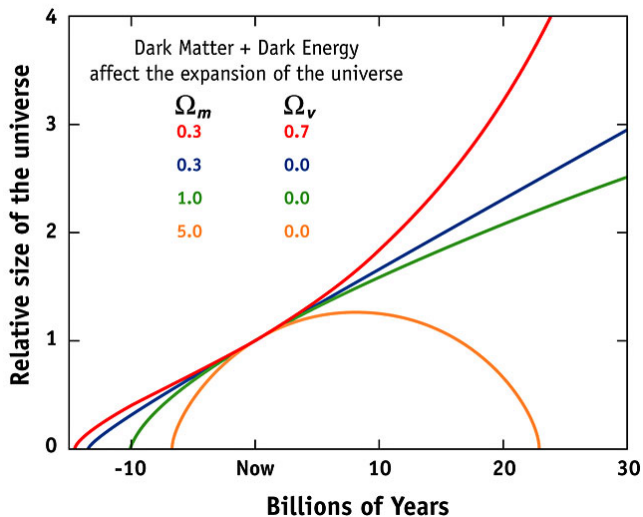
$$p_{\text{v}} = w \rho_{\text{v}} c^2, \text{ con } w = -1.$$

Vacío cuántico:

- Estado Fundamental del “Universo”.
- Cuánticamente esta compuesto por pares de partículas-antipartículas **virtuales** ($\Delta E \Delta t \simeq \hbar$). **Efecto Casimir**.
- Suma de todas las energías de punto cero de todos los campos cuánticos presentes en el Universo.

Evolución del tamaño relativo del universo

EXPANSION OF THE UNIVERSE

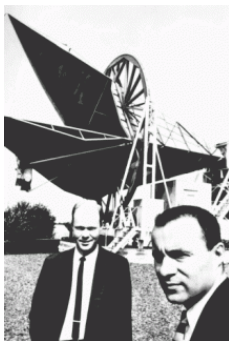


El Fondo Cósmico de Microondas (FCM) (I)

Descubierto por A. Penzias y R. Wilson 1964.

A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5° K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and



FCM (II): CN Cósmico

COSMIC MICROWAVE RADIATION AT 2.63 mm FROM OBSERVATIONS OF INTERSTELLAR CN

Patrick Thaddeus

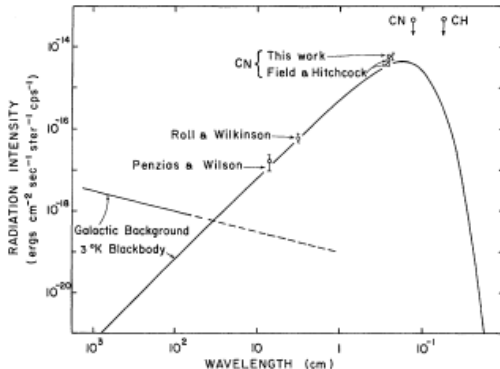
Goddard Institute for Space Studies, New York, New York

and

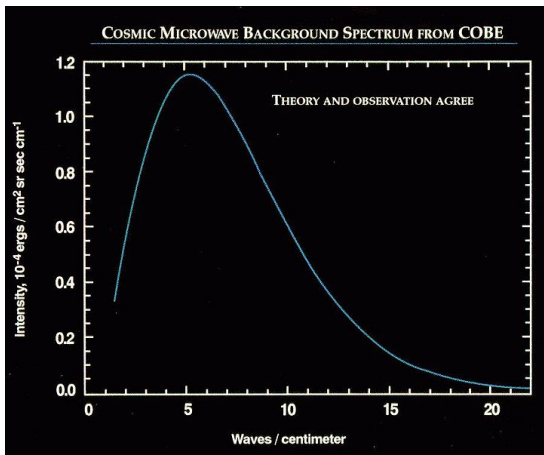
John F. Clauser

Department of Physics, Columbia University, New York, New York

(Received 25 March 1966)



FCM (III)

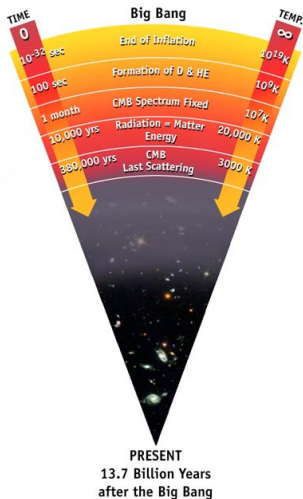


$$T = 2.725 \pm 0.001\text{K}(1\sigma)$$

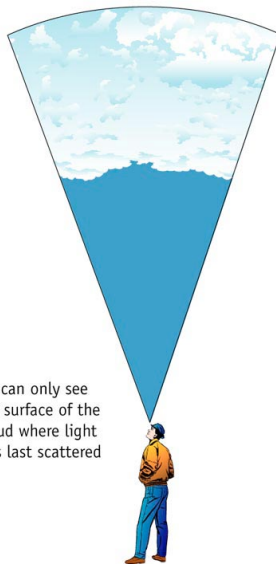
Origen del FCM (“Recombinación”)

- El Universo tenía unos 10^5 años.
- “Sopa” de protones, electrones, fotones y núcleos ligeros.
- La energía de ligadura atómica es aprox. 1 eV [Que equivale a unos 10^4 K].
- La expansión del Universo hace que se enfríe: $T \propto 1/R$.
- Presencia de un 50 % de protones y un 50% de Hidrógeno a $T \simeq 0.3$ eV.
- Ocurrió unos 400 mil años después del BB.
- El universo era unos 1200 veces más pequeño que en la actualidad.
- **El Universo se hizo TRANSPARENTE** (neutro!!).
- Ocurrió después del equilibrio materia-radiación (unos 100 mil años después de BB): $\rho_{\text{materia}} = \rho_{\text{radiación}}$.

Superficie de la última dispersión (LSS)



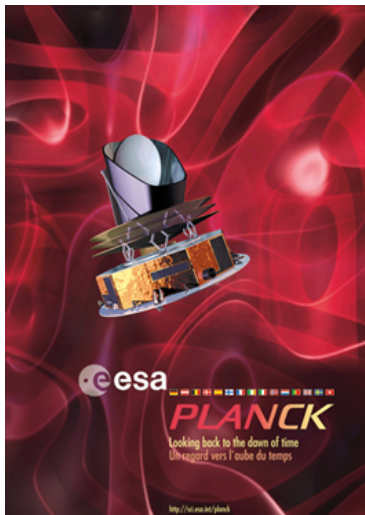
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatterer" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



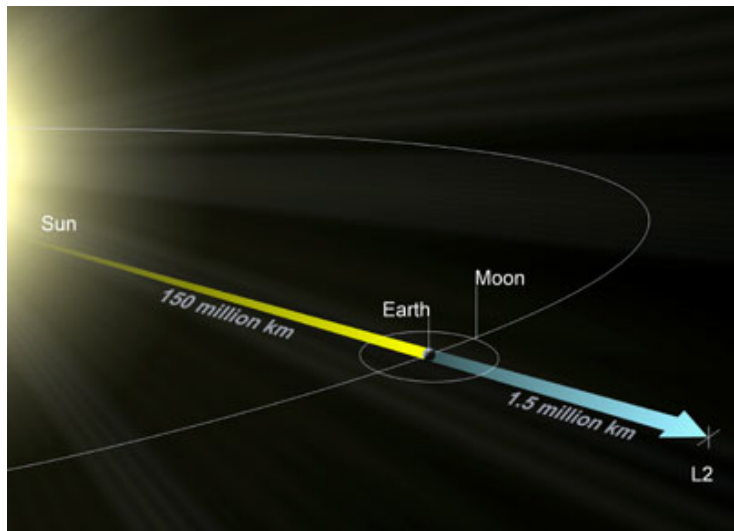
We can only see the surface of the cloud where light was last scattered

Sonda Planck (I) (Agencia Espacial Europea)

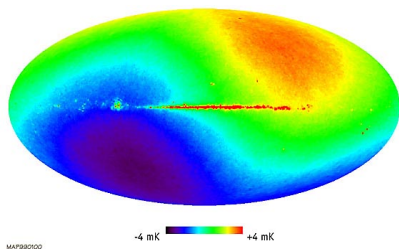
Lanzada en Mayo de 2009.



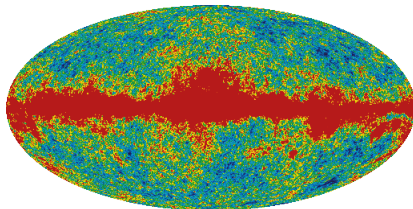
Sonda Planck (II)



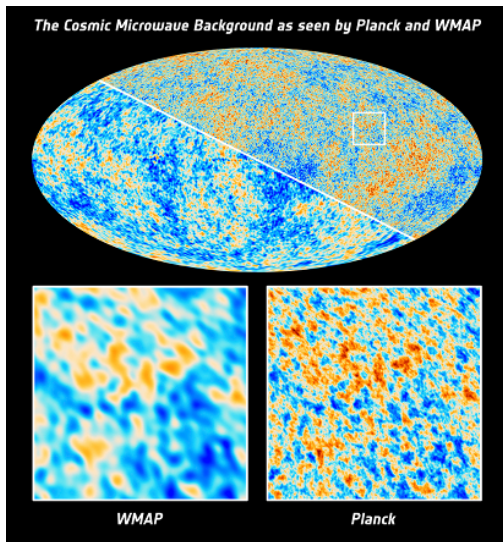
Fluctuaciones en Temperatura del FCM (I) [WMAP]



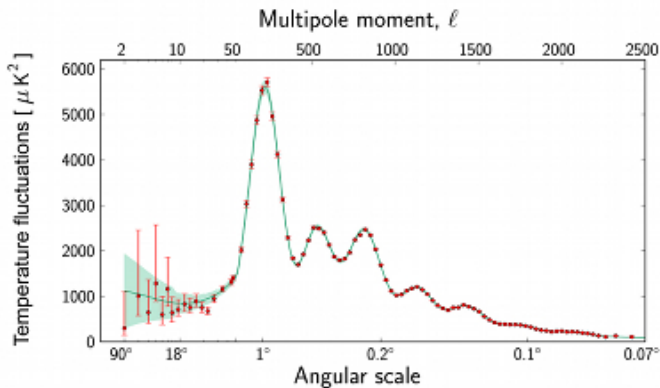
Movimiento del Sistema Solar hacia [Datos Planck] (**Eppur si muove**)
 $(l, b) = (263.99^\circ \pm 0.14^\circ, 48.26^\circ \pm 0.03^\circ)$ con $v = 369.0 \pm 0.9 \text{ km s}^{-1}$.



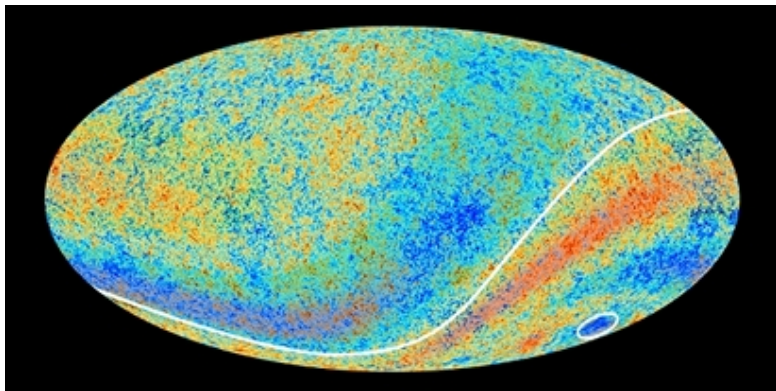
Fluctuaciones en Temperatura del FCM (II): Comparación Planck y WMAP



Análisis de las Fluctuaciones del FCM (III) [Planck]



“Anomalías” en Temperatura del FCM



Parámetros Cosmológicos (Planck+WMAP)

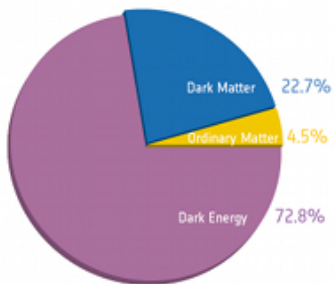
Datos de Planck: Marzo de 2013. Ajuste a Λ CDM.

- Parámetro de Hubble: $h = 0.673 \pm 0.012$.
- Densidad Total de Materia: $\Omega_m h^2 = 0.14195 \pm 0.0025$.
 - ① Densidad bariónica: $\Omega_b h^2 = 0.02205 \pm 0.00028$.
 - ② Densidad de la materia oscura fría: $\Omega_c h^2 = 0.1199 \pm 0.0027$.
- Densidad Total de Materia: $\Omega_m = 0.3115 \pm 0.0018$.
- Constante Cosmológica: $\Omega_\Lambda = 0.685 \pm 0.0018$
- Densidad Total: $\Omega_{\text{tot}} = 1.000 \pm 0.0025$.

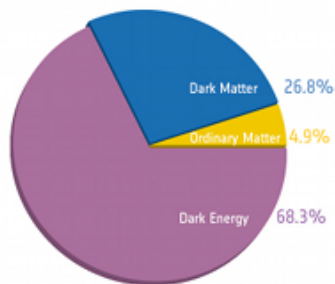
$$H_0 t_0 \simeq \frac{2}{3} (0.7\Omega_m + 0.3 - 0.3\Omega_\Lambda)^{-0.3}$$

$$t_0 = (13817 \pm 48) \times 10^6 \text{ años.}$$

La Receta de Nuestro Universo

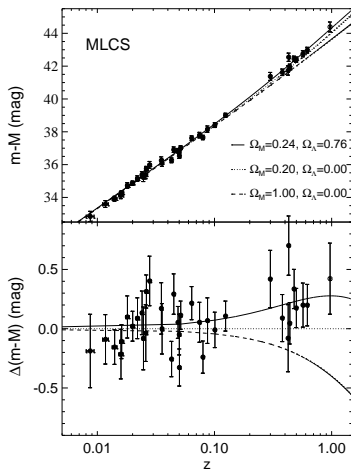


Before Planck

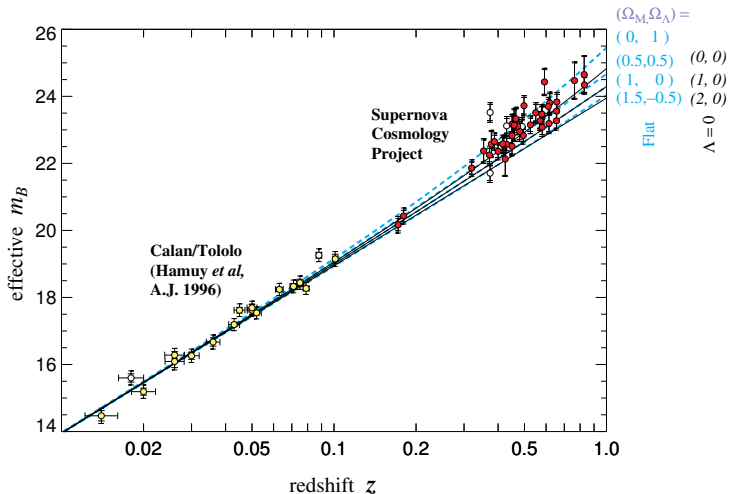


After Planck

Parámetros Cosmológicos de SNIa (I)

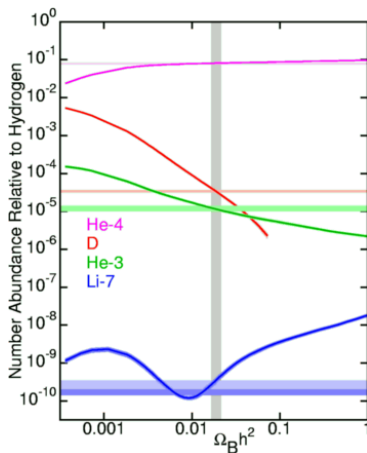


Parámetros Cosmológicos de SNIa (II)

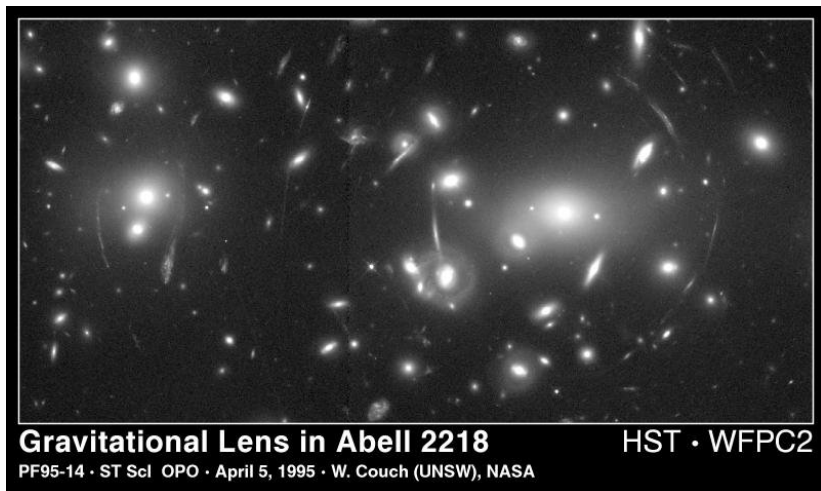


Nucleosíntesis

Durante los tres primeros minutos del Universo se formaron núcleos de H,D, He y Li.



Materia Oscura (Lente Gravitacional) (I)




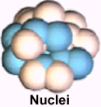

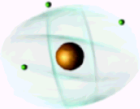



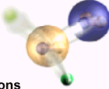


Materia Oscura (II)

La materia oscura puede ser:

- Materia oscura “normal” (bariónica): enanas marrones, polvo interestelar, Massive Astrophysical Compact Halo Object (MACHO), etc. 15% del total de materia oscura.
- Materia oscura exótica (85% del total) . Candidatos:
 - 1 Weakly Interacting Massive Particles (WIMP)
 - 2 Neutrinos pesados.
 - 3 Axiones.
 - 4 ...

Las Cuatro Fuerzas

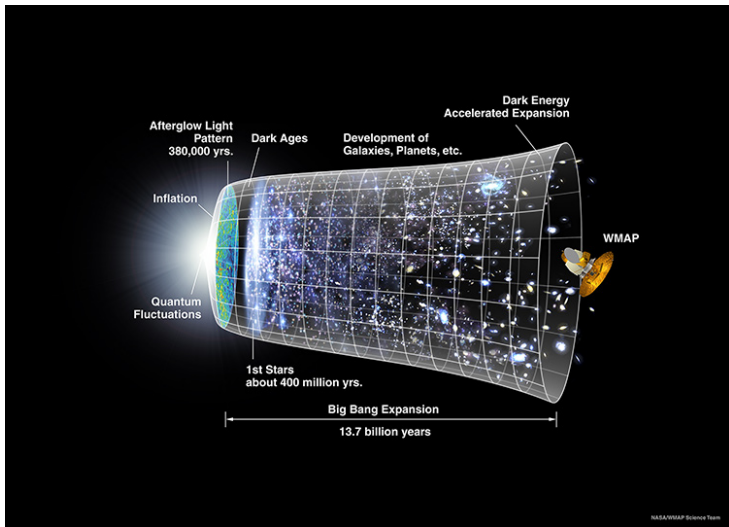
Strong	Electromagnetic
<p data-bbox="344 256 467 280">Gluons (8)</p>  <p data-bbox="362 322 430 379">Quarks</p>  <p data-bbox="353 401 447 490">Mesons Baryons</p>  <p data-bbox="504 339 646 490">Nuclei</p> 	<p data-bbox="724 256 810 280">Photon</p>  <p data-bbox="724 405 828 487">Atoms Light Chemistry Electronics</p> 
Gravitational	Weak
<p data-bbox="344 622 467 646">Graviton ?</p>  <p data-bbox="344 788 467 850">Solar system Galaxies Black holes</p> 	<p data-bbox="724 617 879 641">Bosons (W,Z)</p>  <p data-bbox="724 788 916 871">Neutron decay Beta radioactivity Neutrino interactions Burning of the sun</p> 

Partículas Elementales

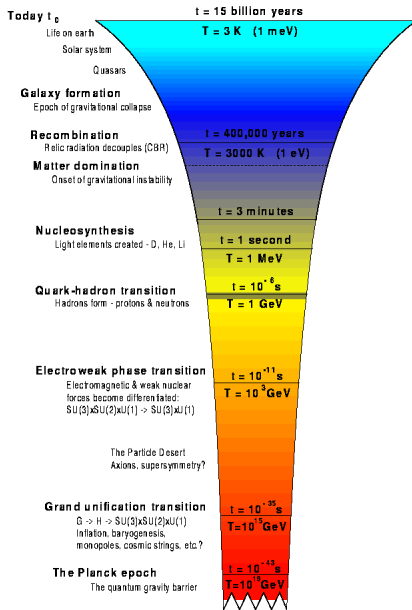
Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force
				Bosons (Forces)

Historia del Universo



Historia del Universo “Bebé”



El (gran) Problema de la Constante Cosmológica

Podemos construir las siguientes cantidades usando \hbar , c y G_N .

- Longitud de Planck: $l_P = \left(\frac{\hbar G_N}{c^3}\right)^{1/2} \simeq 10^{-35}\text{m}$
- Energía de Planck: $E_P = \left(\frac{\hbar c^5}{G_N}\right)^{1/2} \simeq 10^{19}\text{GeV}$

Una estimación *naive* de la Constante Cosmológica podría ser:

$$\Lambda \simeq l_P^{-2} \simeq 10^{70}\text{m}^{-2}$$

Pero la medida observacional:

$$\Lambda_{\text{exp}} = \frac{3H^2\Omega_\Lambda}{c^2} \simeq 10^{-52}\text{m}^{-2}$$

Si suponemos que la escala la marca la QCD (10^{-15} m), obtendríamos:

$$\Lambda \simeq 10^{30}\text{m}^{-2}$$

Otros Problemas del modelo Λ CDM

- Problema de los horizontes
- Planitud: “Fine Tuning” de Ω
 - ▶ $|\Omega(t_{\text{ini}}) - 1| < 10^{-22} (E_{\text{init}}/\text{GeV})^{-2}$
 - ▶ Escala de Planck: Una parte en 10^{60}
- Monopolos Magnéticos
- Antimateria
 - ▶ Hoy $N_p/N_\gamma \sim 10^{-9}$ pero $N_{\bar{p}}/N_\gamma \simeq 0$.
 - ▶ Conservación del número bariónico: $N_p/N_{\bar{p}} = 1 + O(10^{-9})$ cuando $k_B T \gg m_p c^2$. Origen de esta asimetría inicial?
- Formación de estructuras

Solución: **Inflación+....**