

PRINCIPIO Y FIN DEL UNIVERSO

J. J. Ruiz-Lorenzo

Dep. Física, Universidad de Extremadura

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

<http://www.unex.es/eweb/astrono>

<http://www.astronomia2009.es>

Badajoz, 30 de Abril 2009



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

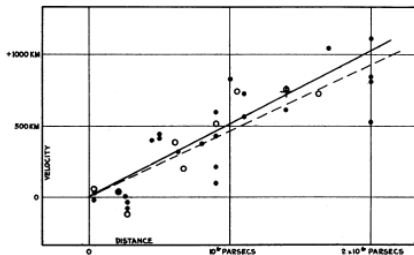


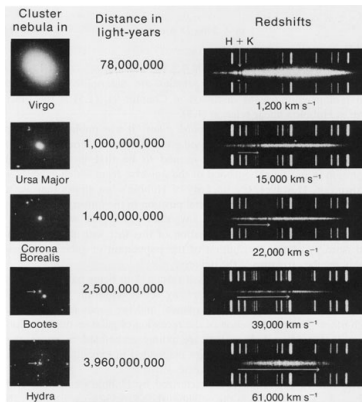
FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

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

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

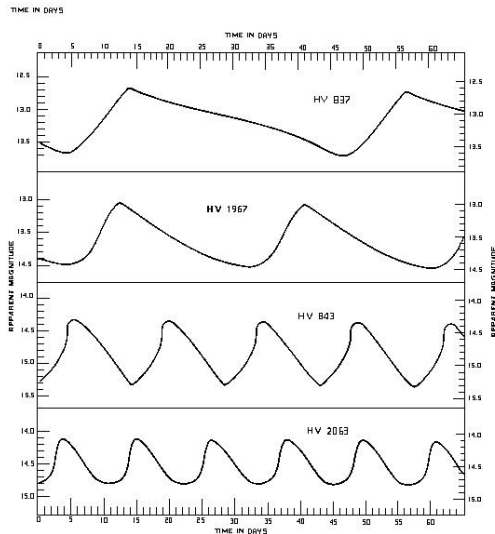
Expansión de Universo (II)



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

Expansión de Universo (III)

Curvas de luz para Cefeidas.



Expansión de Universo (IV)

Cefeidas. Relación Periodo-Luminosidad:

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

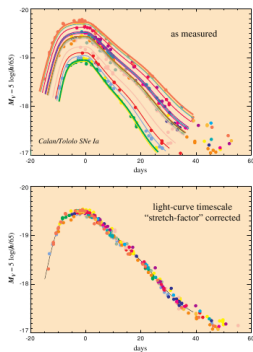
Descubierta por Henrietta Swan Leavitt.



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

Expansión de Universo (IV)

Supernovas SNIa.

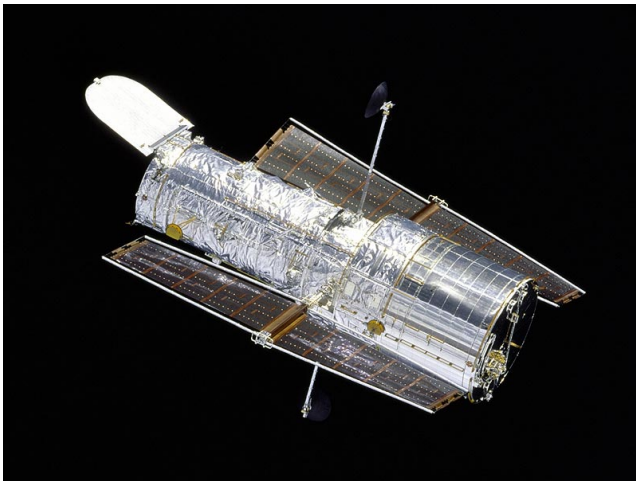


$$5 \log_{10} \left(\frac{D_L}{10 \text{ pc}} \right) = m_B - M_B + \alpha(s - 1) - \beta c$$

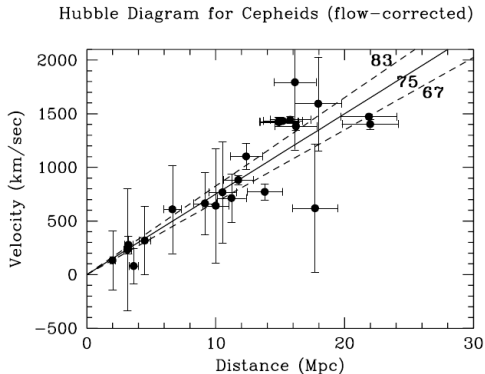
Edwin Hubble



Hubble Space Telescope (NASA)

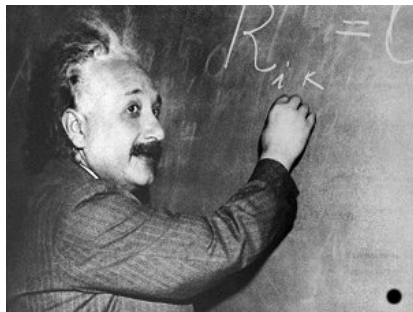


Expansión de Universo (V)



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

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



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:

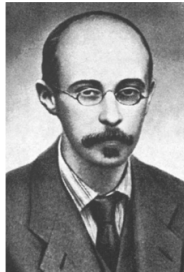
$$T_{\mu\nu} = \left(\frac{p}{c^2} + \rho \right) U_\mu U_\nu - p g_{\mu\nu}$$

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:

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

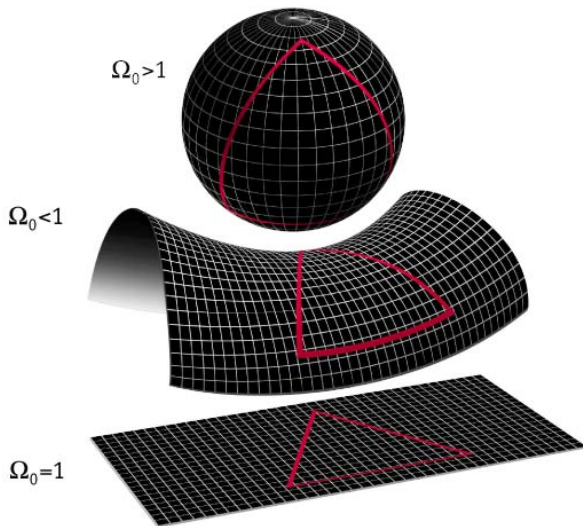
- Expresaremos todas las densidades en función de la crítica:

$$\Omega_i \equiv \frac{\rho_i}{\rho_c}$$
$$\Omega = \sum_i \Omega_i$$

- 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:

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

Conservación de la energía:

$$\frac{d}{dt} \left(\rho_v c^2 R(t)^3 \right) + \rho_v \frac{d}{dt} \left(R(t)^3 \right) = 0$$

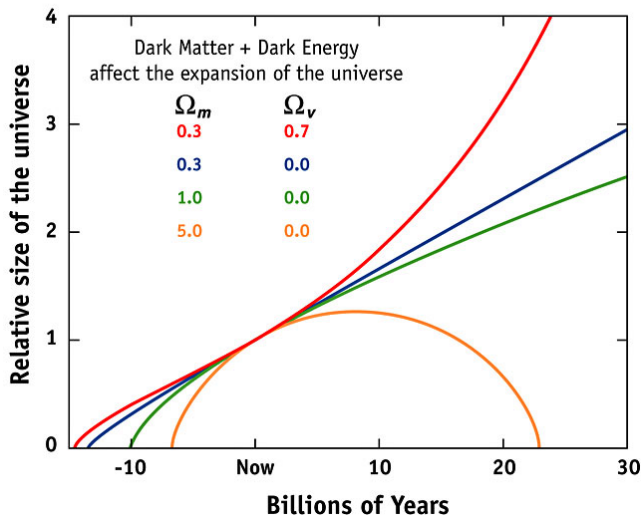
Si la **densidad del vacío es constante**, obtenemos la ecuación de estado:

$$\rho_v = w \rho_v c^2, \text{ con } w = -1.$$

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.

EXPANSION OF THE UNIVERSE

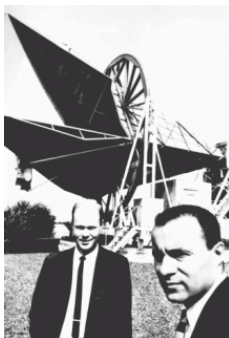


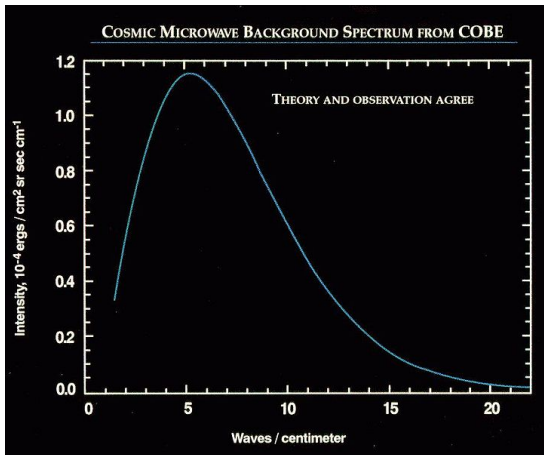
El Fondo Cósmico de Microondas (FCM) (I)

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





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

FCM (III): CN C3smico

COSMIC MICROWAVE RADIATION AT 2.63 mm
FROM OBSERVATIONS OF INTERSTELLAR CN

Patrick Thaddeus

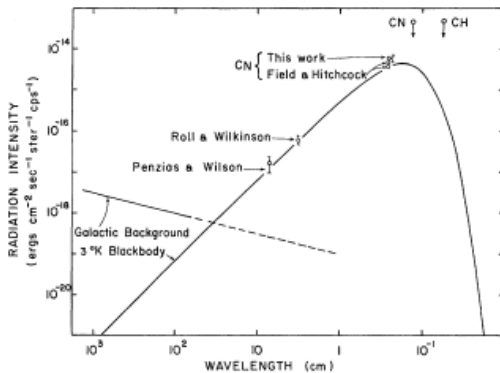
Goddard Institute for Space Studies, New York, New York

and

John F. Clauser

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

(Received 25 March 1966)



Origen del FCM (“Recombinación”)

- El Universo tenía unos 10^5 años.

Origen del FCM (“Recombinación”)

- El Universo tenía unos 10^5 años.
- “Sopa” de protones, electrones, fotones y núcleos ligeros.

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].

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.

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 de BB.

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 de BB.
- El universo era unos 1200 veces más pequeño que en la actualidad.

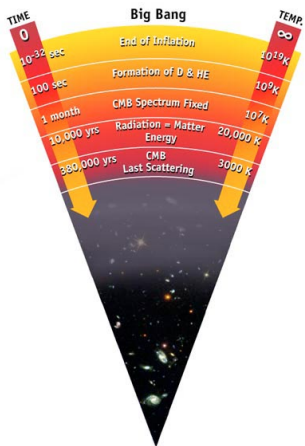
Origen del FCM (“Recombinación”)

- 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 de BB.
- El universo era unos 1200 veces más pequeño que en la actualidad.
- **El Universo se hizo TRANSPARENTE** (neutro!!).

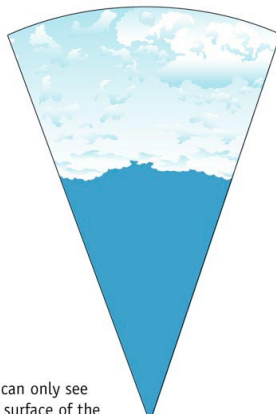
Origen del FCM (“Recombinación”)

- 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 de 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)



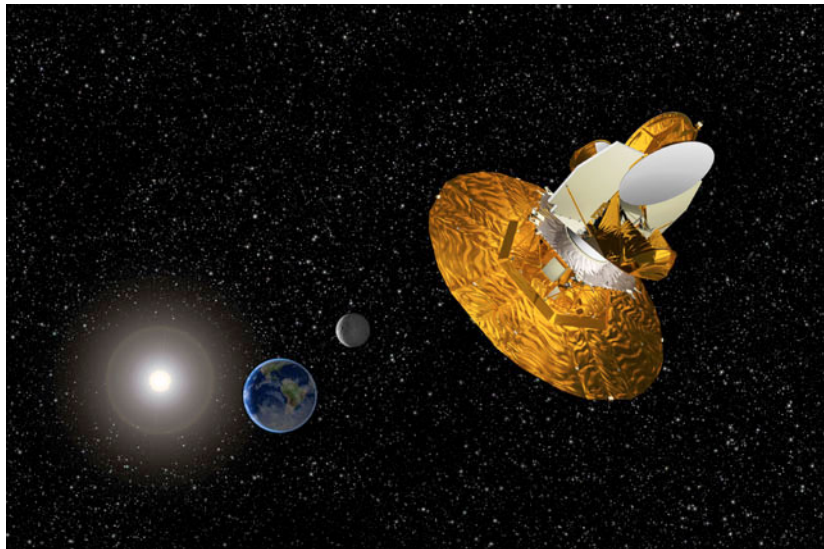
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



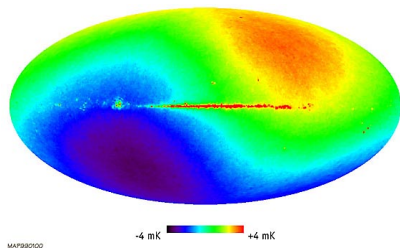
We can only see the surface of the cloud where light was last scattered



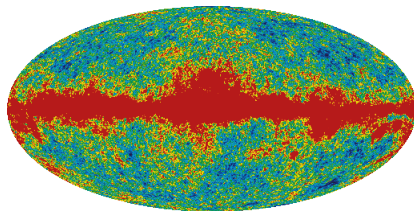
Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)



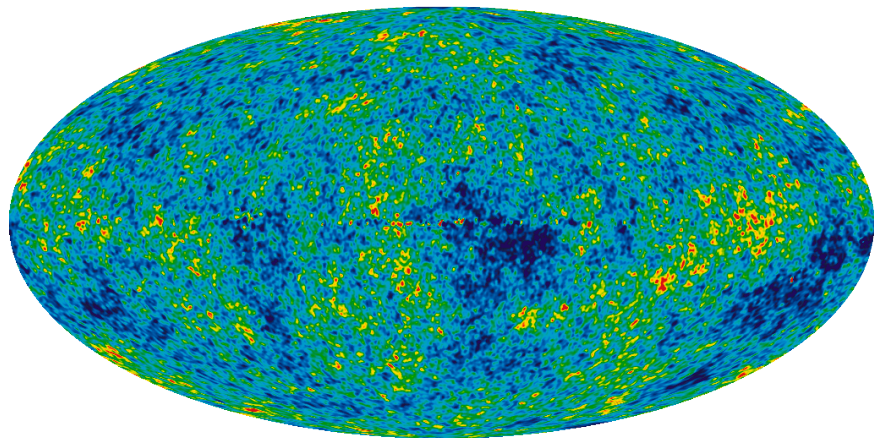
Fluctuaciones en Temperatura del FCM (I)



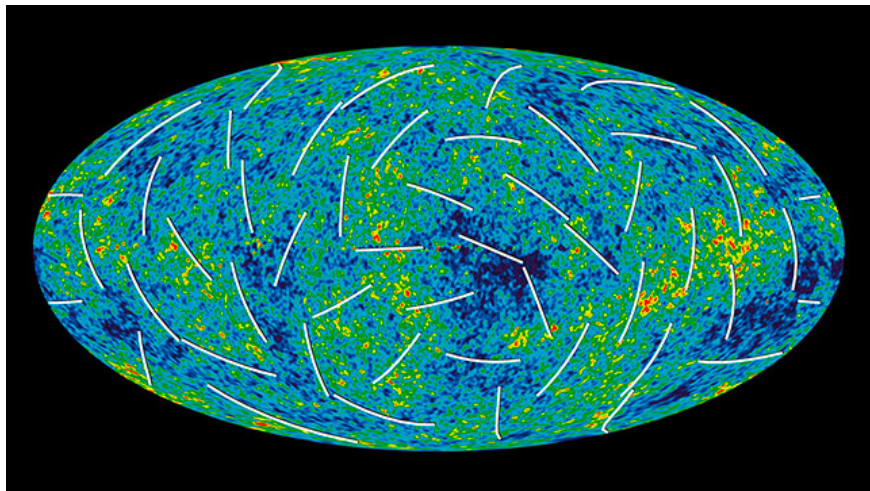
Movimiento Sistema Solar hacia
 $(l, b) = (263.68^\circ \pm 0.04^\circ, 48.24^\circ \pm 0.10^\circ)$ con $v = 369 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$.



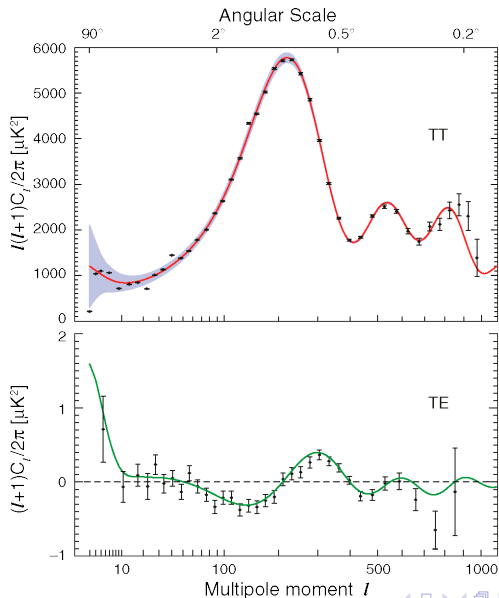
Fluctuaciones en Temperatura del FCM (II)



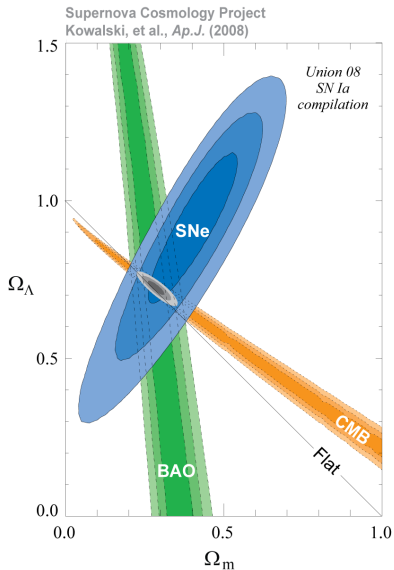
Polarización del FCM



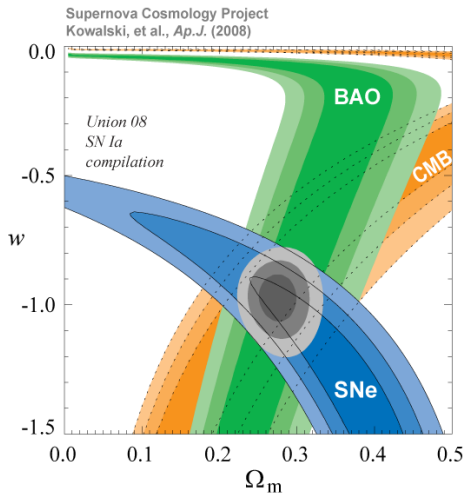
Análisis de las Fluctuaciones del FCM



Parámetros Cosmológicos (I)

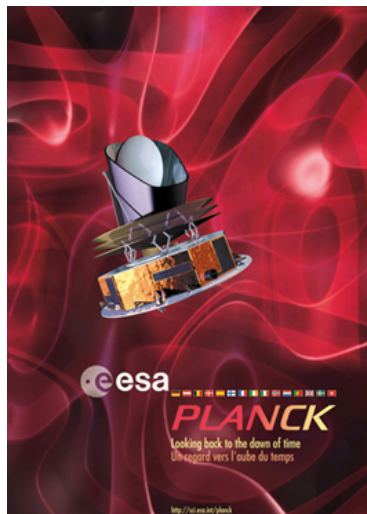


Parámetros Cosmológicos (II)

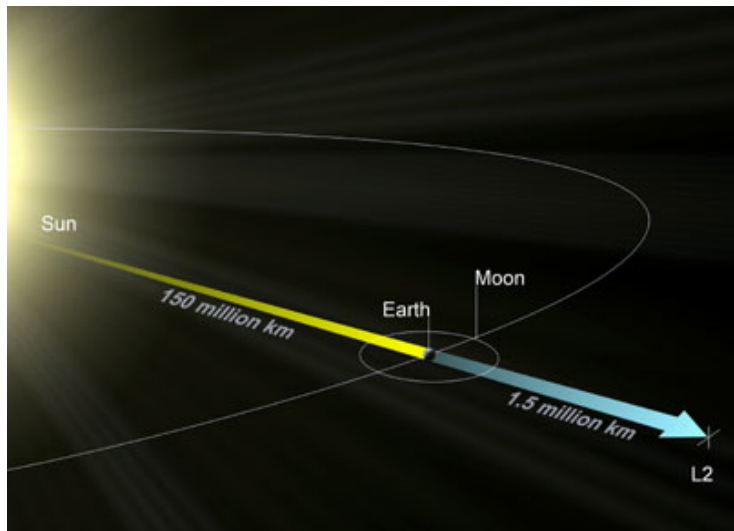


El futuro: la sonda Planck

Lanzamiento Mayo 2009!

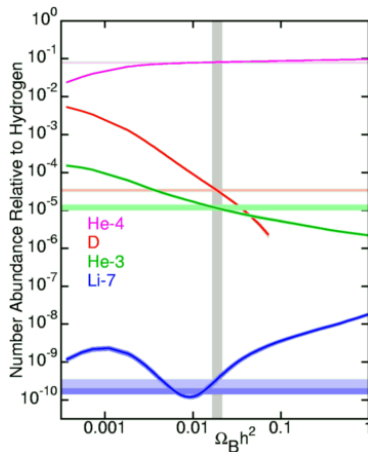


El futuro: la sonda Planck



Nucleosíntesis

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




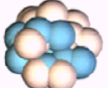

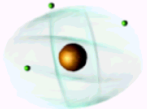



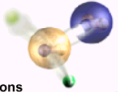




La materia oscura puede ser:

- Materia oscura “normal” (bariónica): enanas marrones, polvo interestelar, Massive Astrophysical Compact halo object (MACHO), etc. 20% del total de materia oscura.
- Materia oscura exótica (80% del total) . Candidatos:
 - 1 Weakly Interacting Massive Particles (WIMP)
 - 2 Neutrinos pesados.
 - 3 Axiones.
 - 4 ...

Las Cuatro Fuerzas

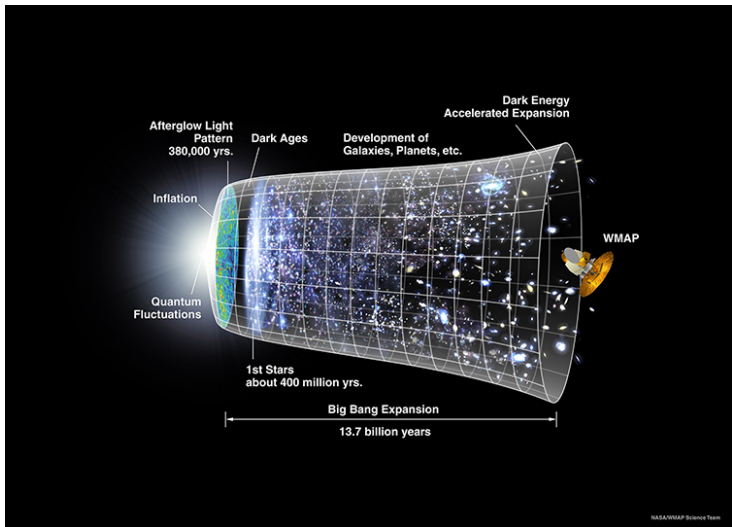
| Strong | Electromagnetic |
|--|---|
| <p data-bbox="343 269 466 295">Gluons (8)</p>  <p data-bbox="363 336 445 398">Quarks</p>  <p data-bbox="349 419 459 507">Mesons Baryons</p>  <p data-bbox="500 357 651 507">Nuclei</p>  | <p data-bbox="720 269 816 295">Photon</p>  <p data-bbox="720 419 830 507">Atoms Light Chemistry Electronics</p>  |
| Gravitational | Weak |
| <p data-bbox="343 637 473 663">Graviton ?</p>  <p data-bbox="343 802 473 870">Solar system Galaxies Black holes</p>  | <p data-bbox="720 631 884 657">Bosons (W,Z)</p>  <p data-bbox="720 802 926 890">Neutron decay Beta radioactivity Neutrino interactions Burning of the sun</p>  |

Partículas Elementales

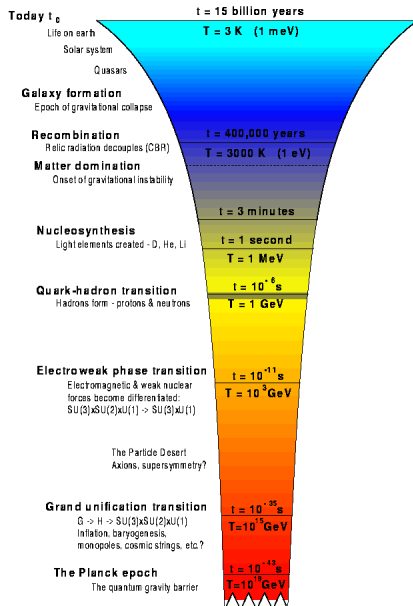
Three Generations
of Matter (Fermions)

| | 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 |
| | 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 |
| Quarks | d down | s strange | b bottom | g gluon |
| | <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 | Z⁰ 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 |
| Leptons | e electron | μ muon | τ tau | W[±] weak force |

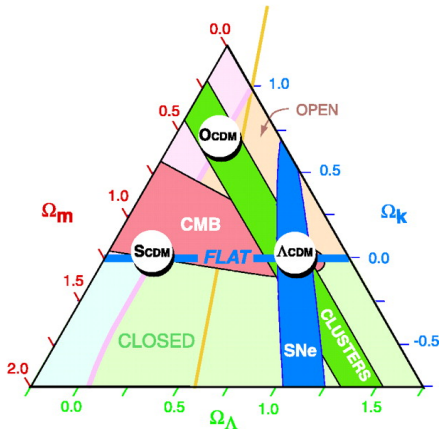
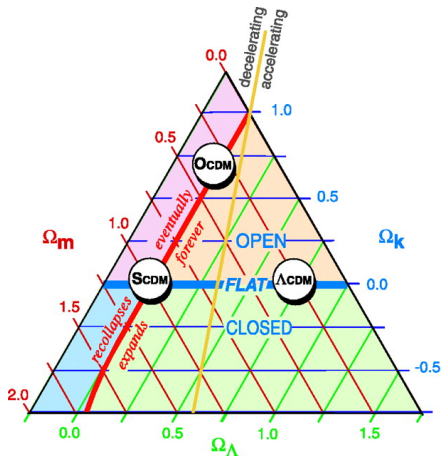
Historia del Universo



Historia del Universo “Bebé”



El triángulo cósmico



Parámetros Cosmológicos (WMAP+”resto”)(III)

- Parámetro de Hubble: $h = 0.704 \pm 0.016$.
- Densidad Total de Materia: $\Omega_m h^2 = 0.132 \pm 0.004$.
- Densidad bariónica (oscura y bariónica): $\Omega_b h^2 = 0.0219 \pm 0.0007$.
- Densidad de la radiación: $\Omega_r h^2 = 2.47 \times 10^{-5}$.
- Densidad de Neutrinos: $\Omega_\nu \simeq 0.001$.
- Constante Cosmológica: $\Omega_\Lambda = 0.73$
- Densidad Total: $\Omega_{\text{tot}} = 1.011 \pm 0.012$.
- $w < -0.82$ (95% confianza).

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

$$t_0 \simeq 13.8 \times 10^9 \text{ años.}$$

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:

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

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1\text{año}} \right)$$

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1 \text{ año}} \right)$$

- El Madrid -Barcelona del sábado.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1\text{año}} \right)$$

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1\text{año}} \right)$$

- $\eta \sim 10.2$. Muerte del Sol.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1\text{año}} \right)$$

- $\eta \sim 10.2$. Muerte del Sol.
- $\eta \sim 13$. Muerte de las estrellas más ligeras.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1\text{año}} \right)$$

- $\eta \sim 10.2$. Muerte del Sol.
- $\eta \sim 13$. Muerte de las estrellas más ligeras.
- $\eta \sim 14$. Agotamiento del material nuclear convectivo: fin de la formación estelar convencional.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1\text{año}} \right)$$

- $\eta \sim 10.2$. Muerte del Sol.
- $\eta \sim 13$. Muerte de las estrellas más ligeras.
- $\eta \sim 14$. Agotamiento del material nuclear convectivo: fin de la formación estelar convencional.
- $\eta \sim 30$. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel galáctico.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1\text{año}} \right)$$

- $\eta \sim 10.2$. Muerte del Sol.
- $\eta \sim 13$. Muerte de las estrellas más ligeras.
- $\eta \sim 14$. Agotamiento del material nuclear convectivo: fin de la formación estelar convencional.
- $\eta \sim 30$. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel galáctico.
- $\eta \sim 33$. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel de cúmulos.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1\text{año}} \right)$$

- $\eta \sim 10.2$. Muerte del Sol.
- $\eta \sim 13$. Muerte de las estrellas más ligeras.
- $\eta \sim 14$. Agotamiento del material nuclear convencional: fin de la formación estelar convencional.
- $\eta \sim 30$. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel galáctico.
- $\eta \sim 33$. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel de cúmulos.
- $\eta \sim 32 - 41$. Desintegración del protón.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1\text{año}} \right)$$

- $\eta \sim 10.2$. Muerte del Sol.
- $\eta \sim 13$. Muerte de las estrellas más ligeras.
- $\eta \sim 14$. Agotamiento del material nuclear convectivo: fin de la formación estelar convencional.
- $\eta \sim 30$. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel galáctico.
- $\eta \sim 33$. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel de cúmulos.
- $\eta \sim 32 - 41$. Desintegración del protón.
- $\eta \sim 38$. Las estrellas de neutrones se convierten en enanas blancas.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

$$\eta = \log_{10} \left(\frac{\tau}{1\text{año}} \right)$$

- $\eta \sim 10.2$. Muerte del Sol.
- $\eta \sim 13$. Muerte de las estrellas más ligeras.
- $\eta \sim 14$. Agotamiento del material nuclear convencional: fin de la formación estelar convencional.
- $\eta \sim 30$. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel galáctico.
- $\eta \sim 33$. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel de cúmulos.
- $\eta \sim 32 - 41$. Desintegración del protón.
- $\eta \sim 38$. Las estrellas de neutrones se convierten en enanas blancas.
- $\eta \sim 39$. Desintegración del neutrón: las estrellas de neutrones se convierten en enanas blancas.

- $\eta \sim 39$. Desintegración del protón: desaparición de las enanas blancas.

... Y el futuro (final?)

- $\eta \sim 39$. Desintegración del protón: desaparición de las enanas blancas.
- $\eta \sim 65$. Evaporación de agujeros negros con M_{\odot} .

... Y el futuro (final?)

- $\eta \sim 39$. Desintegración del protón: desaparición de las enanas blancas.
- $\eta \sim 65$. Evaporación de agujeros negros con M_{\odot} .
- $\eta \sim 116$. Evaporación de agujeros negros con $10^{17} M_{\odot}$.

... Y el futuro (final?)

- $\eta \sim 39$. Desintegración del protón: desaparición de las enanas blancas.
- $\eta \sim 65$. Evaporación de agujeros negros con M_{\odot} .
- $\eta \sim 116$. Evaporación de agujeros negros con $10^{17} M_{\odot}$.
- ...