

PRINCIPIO Y FIN DEL UNIVERSO

J. J. Ruiz-Lorenzo

Departamento de Física
Instituto de Computación Científica Avanzada de Extremadura (ICCAEx)
Universidad de Extremadura
http://www.eweb.unex.es/eweb/fisteor/juan/juan_talks.html

Noche de los Investigadores 2021

I.E.S. Zurbarán

Badajoz, 23 de Septiembre 2021

21-22
SEPT

CIENCIA
CIRCULAR

Actividad promovida en el marco de la
Noche Europea de los Investigadores e
Investigadoras 2021 de la UEx



LA NOCHE EUROPEA
DE LOS
INVESTIGADORES
E INVESTIGADORAS
European Researchers' Night



Proyecto financiado por la Comisión Europea a través de Horizonte 2020 en el marco de la European Researchers' Night.
Grant Agreement number 101036041 - GRNIGHT-H3009-MSCA-HIGHT 2020 bis

Plan de la Charla

- ▶ Una introducción a nuestro universo
- ▶ Expansión del Universo
- ▶ Teoría: Relatividad General y las Ecuaciones de Friedmann
- ▶ El Fondo Cósmico de Microondas
- ▶ Materia y Energía en el Universo: los parámetros cosmológicos
- ▶ Nucleosíntesis y el Big Bang
- ▶ Materia Oscura
- ▶ Futuro del Universo

Distancias

Radio de la Tierra: 6400 km.



Distancias

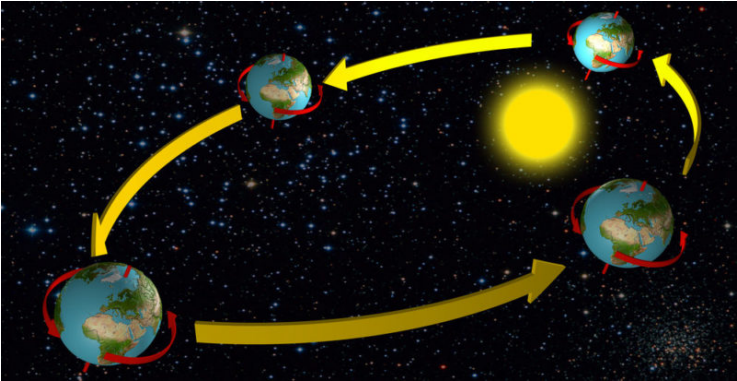
Distancia Tierra-Luna: 384 000 km

Radio del Sol: 700 000 km



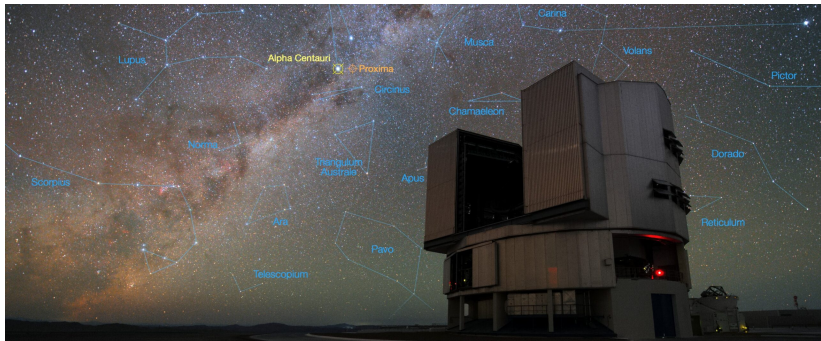
Distancias

Radio de la órbita terrestre: 150 millones de km=8.3 min-luz.



Distancias

Estrella más cercana (α -Centauro): $4.36 \text{ años-luz} = 31 \times 10^{12} \text{ km}$.



Distancias

Tamaño de la Via Lactea: 200 000 años-luz.



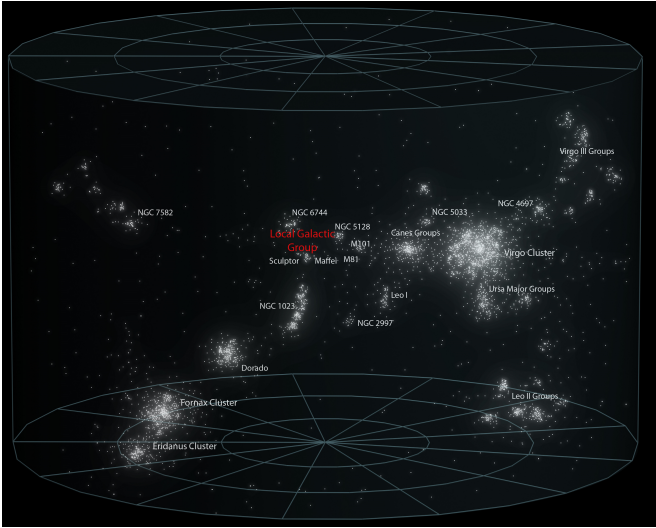
Distancias

Distancia galaxia Andrómeda: 2.6 millones de años-luz.



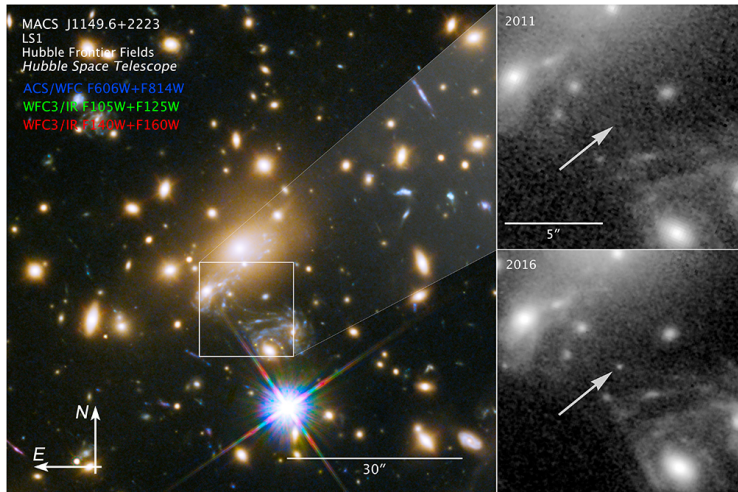
Distancias

Distancia Cúmulo de Virgo: 65 millones de años-luz.



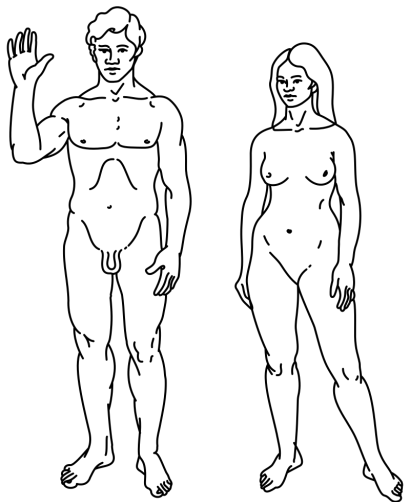
Distancias

Estrella más lejana (Ícaro en MACS J1149+2223) : 9100 millones de años-luz.



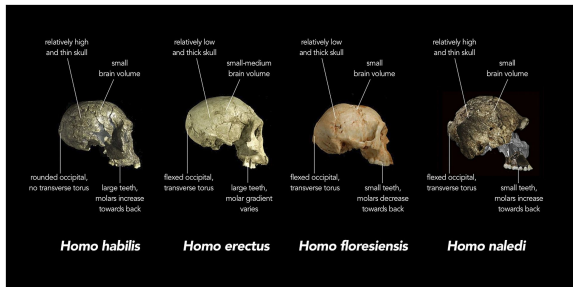
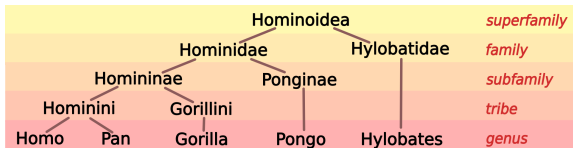
Edades

Aparición especie Homo Sapiens: 100 000 años.



Edades

Aparición género Homo: 3 millones de años.



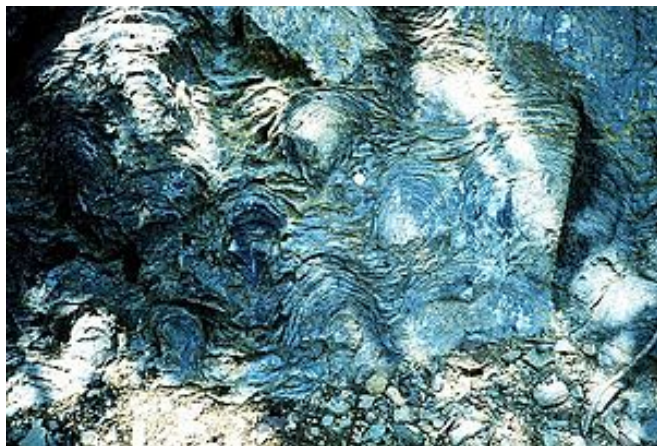
Edades

Extinción Dinosaurios (impacto asteroide): 66 millones de años.



Edades

Aparición de la Vida en la Tierra: 3800 millones de años.



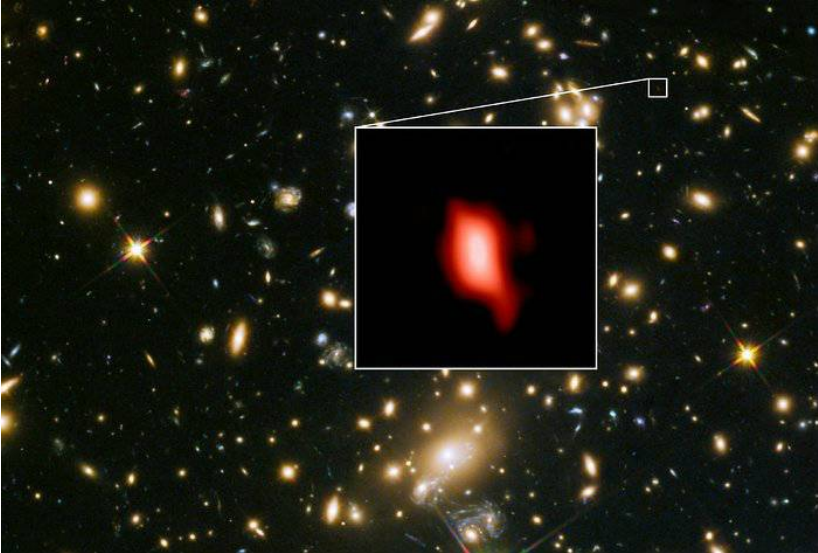
Edades

Formación de la Tierra: 4500 millones de años.

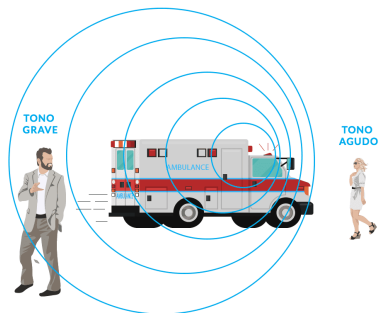


Edades

Formación de Galaxias: 250 millones de años **después** del BB.



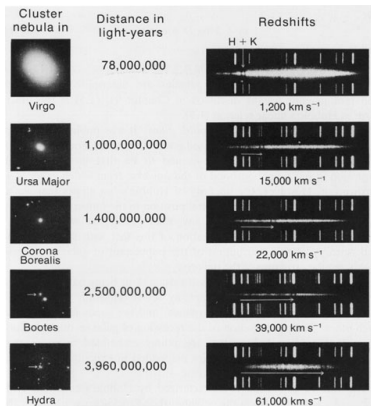
Expansión del Universo



$$\nu = c/\lambda$$

$$\nu = \frac{c}{c \pm v_a} \nu_0$$

Expansión del Universo



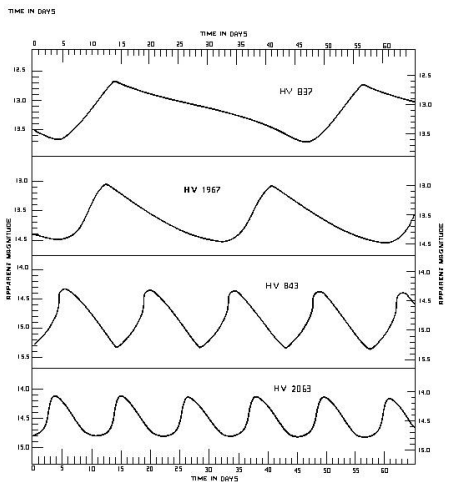
$$z = \frac{\lambda_g - \lambda_o}{\lambda_0}$$

Vesto Slipher



Expansión de Universo

Curvas de luz para Cefeidas.



Expansión de Universo

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

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

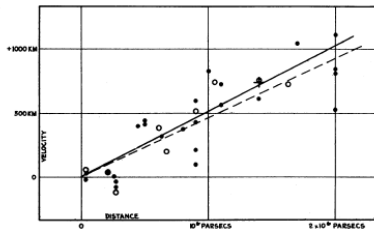


FIGURE 1

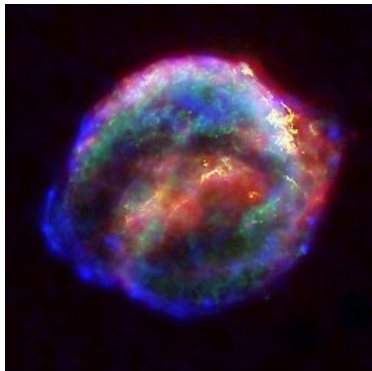
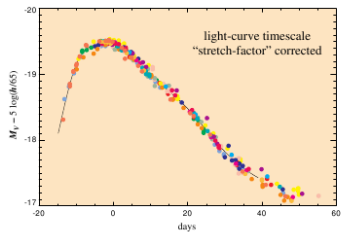
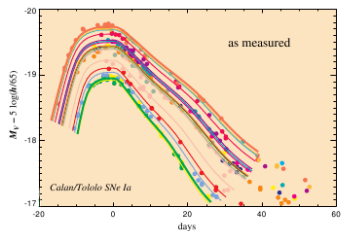
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

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

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

Expansión de Universo

Supernovas SN Ia.



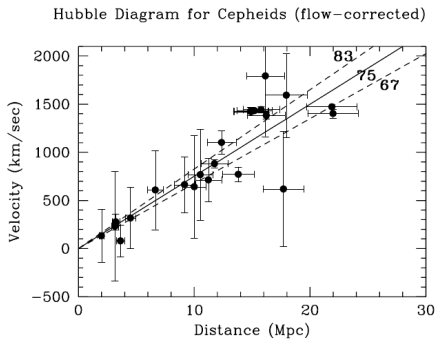
Edwin Hubble



Hubble Space Telescope (NASA)



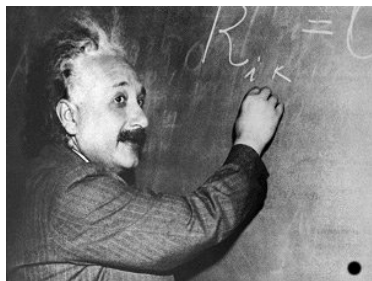
Expansión de Universo (VI)



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

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

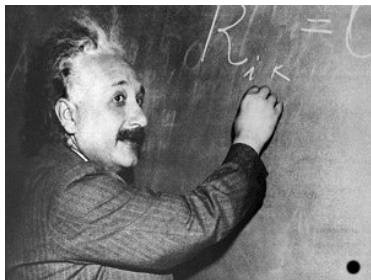
Relatividad General



Geometría= Materia

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

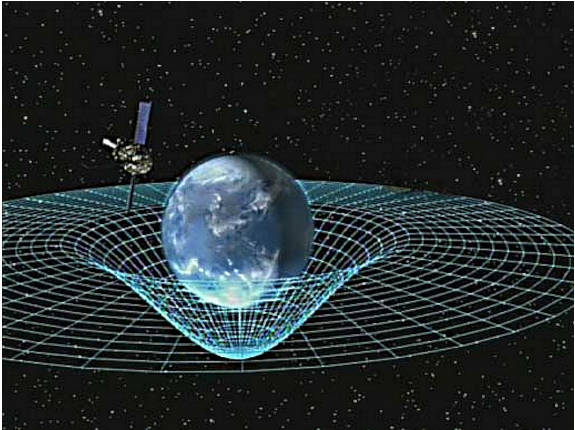
Constante Cosmológica (energía)



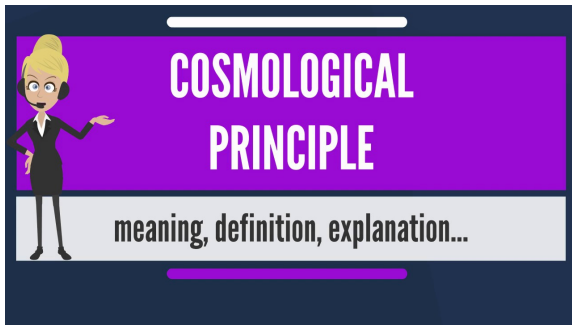
Geometría= Materia

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

Curvatura del espacio-tiempo



Principio Cosmológico Perfecto



- ▶ Todos los observadores del Universo ven la misma cosmohistoria.
- ▶ El universo es homogéneo e isótropo

Ecuaciones de Friedmann

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

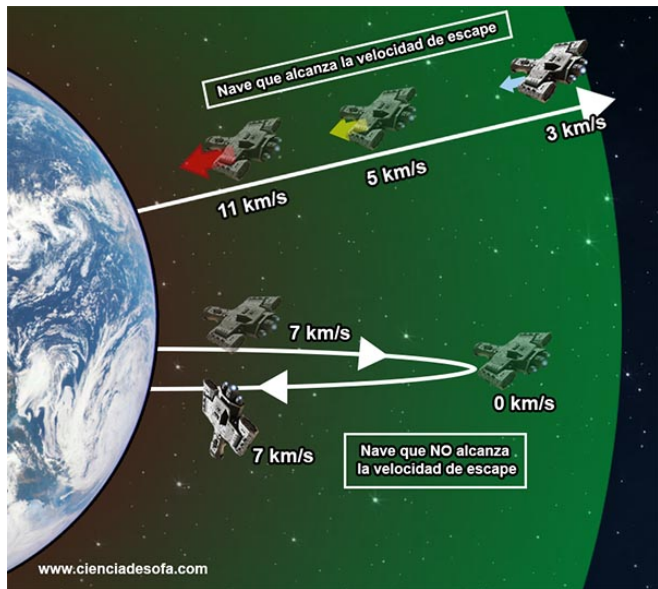
$$\dot{R}^2 = \frac{8\pi}{3}G_N\rho R^2 - kc^2$$

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

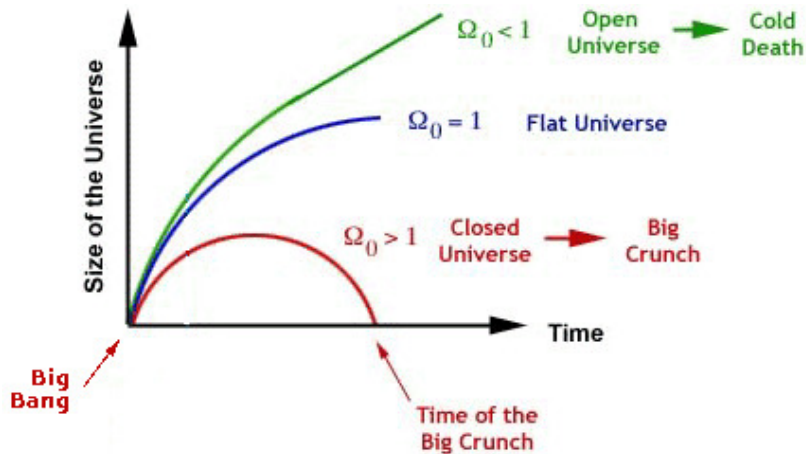


A. Friedmann

Velocidad de Escape

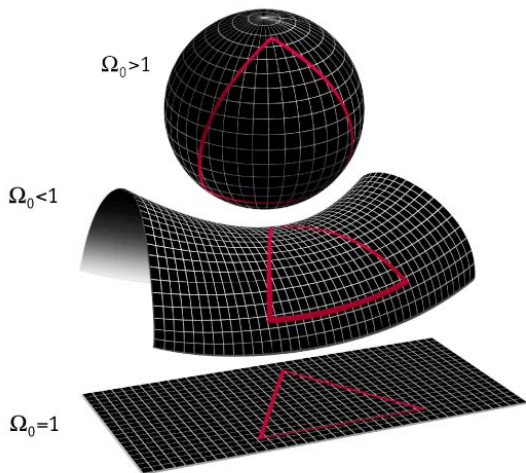


Densidad Crítica



$$\Omega_0 = \frac{\rho}{\rho_c}$$

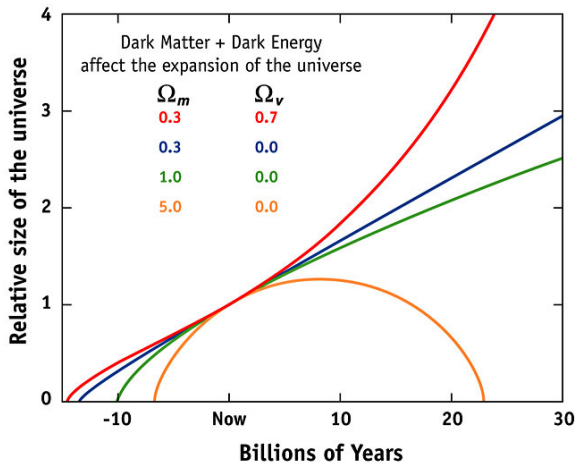
Curvatura



MAP990006

Evolución del tamaño relativo del universo

EXPANSION OF THE UNIVERSE



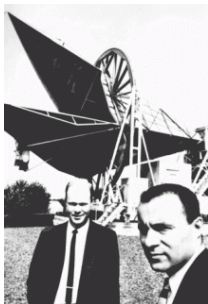
$$\Omega = \Omega_M + \Omega_R + \Omega_\Lambda$$

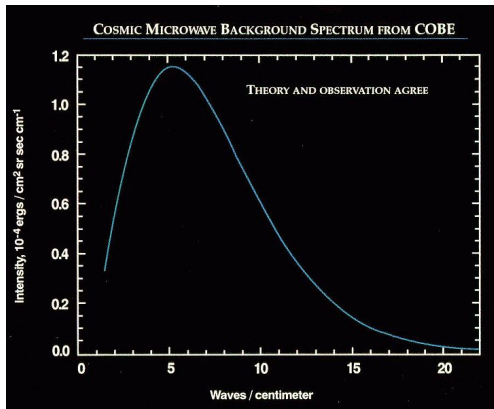
El Fondo Cósmico de Microondas (FCM)

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





$$T = 2.7255 \pm 0.0006\text{K}(1\sigma)$$

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]. $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

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]. $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- ▶ La expansión del Universo hace que se enfríe: $T \propto 1/R$.
- ▶ Presencia de un 50 % de protones y un 50% de Hidrógeno a $T \simeq 0.3 \text{ eV}$.

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]. $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- ▶ La expansión del Universo hace que se enfríe: $T \propto 1/R$.
- ▶ Presencia de un 50 % de protones y un 50% de Hidrógeno a $T \simeq 0.3 \text{ eV}$.
- ▶ Ocurrió unos 400 mil años después del 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]. $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- ▶ La expansión del Universo hace que se enfríe: $T \propto 1/R$.
- ▶ Presencia de un 50 % de protones y un 50% de Hidrógeno a $T \simeq 0.3 \text{ eV}$.
- ▶ Ocurrió unos 400 mil años después del BB.
- ▶ El universo era unos 1200 veces más pequeño que en la actualidad.

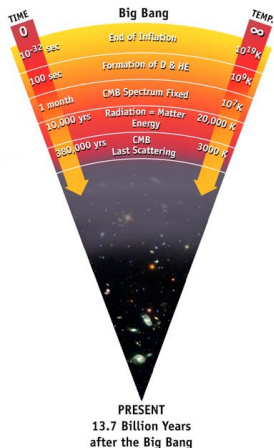
Origen del FCM (“Recombinación”)

- ▶ 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]. $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- ▶ La expansión del Universo hace que se enfríe: $T \propto 1/R$.
- ▶ Presencia de un 50 % de protones y un 50% de Hidrógeno a $T \simeq 0.3 \text{ eV}$.
- ▶ 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!!).

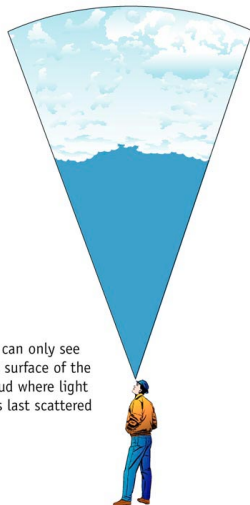
Origen del FCM (“Recombinación”)

- ▶ 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]. $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- ▶ La expansión del Universo hace que se enfríe: $T \propto 1/R$.
- ▶ Presencia de un 50 % de protones y un 50% de Hidrógeno a $T \simeq 0.3 \text{ eV}$.
- ▶ 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)



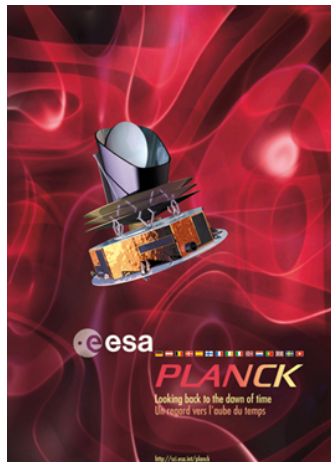
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



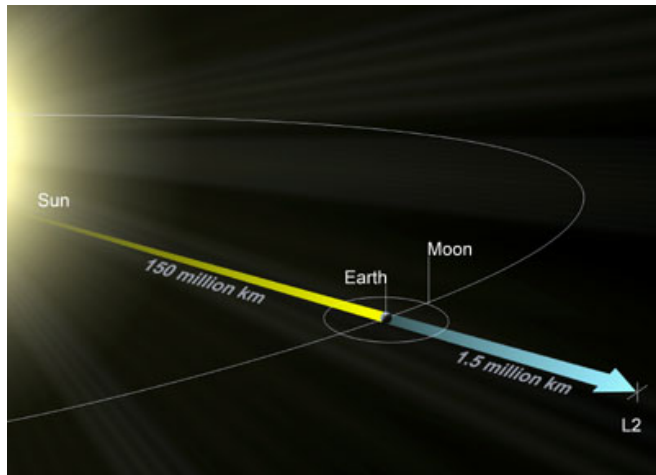
We can only see the surface of the cloud where light was last scattered

Sonda Planck (Agencia Espacial Europea)

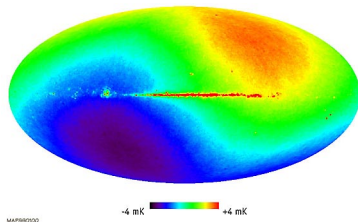
Lanzada en Mayo de 2009.



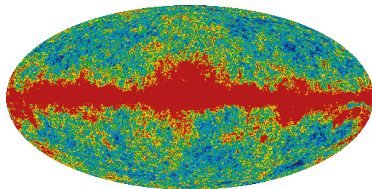
Sonda Planck



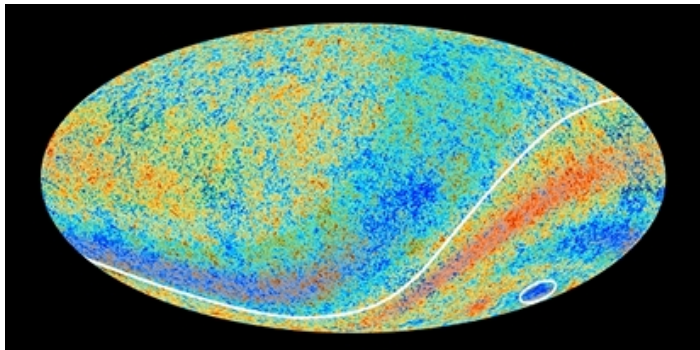
Fluctuaciones en Temperatura del FCM



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 $v = 369.0 \pm 0.9 \text{ km s}^{-1}$.



“Anomalías” en Temperatura del FCM



Parámetros Cosmológicos (Planck)

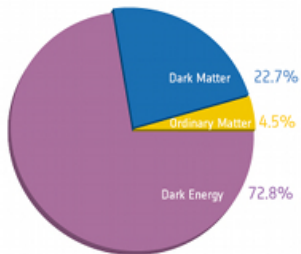
Datos de Planck: 2018. Ajuste a Λ CDM.

- ▶ **Parámetro de Hubble:** $h = 0.674 \pm 0.005$
- ▶ **Densidad Total de Materia:** $\Omega_m = 0.315 \pm 0.007$
 1. **Densidad bariónica:** $\Omega_b = 0.0493 \pm 0.0006$
 2. **Densidad de la materia oscura fría:** $\Omega_c = 0.265 \pm 0.007$
- ▶ **Constante Cosmológica:** $\Omega_\Lambda = 0.685 \pm 0.007$
- ▶ **Densidad Total:** $\Omega_{\text{tot}} = 1.00 \pm 0.01$

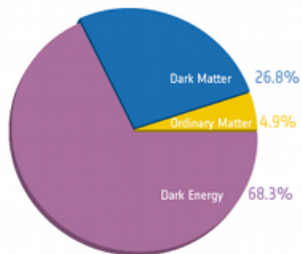
$$H_0 t_0 \simeq \frac{2}{3} (0.7\Omega_m + 0.3 - 0.3\Omega_\Lambda)^{-0.3}$$

$$t_0 = 13817 \times 10^6 \text{ años.}$$

La Receta de Nuestro Universo



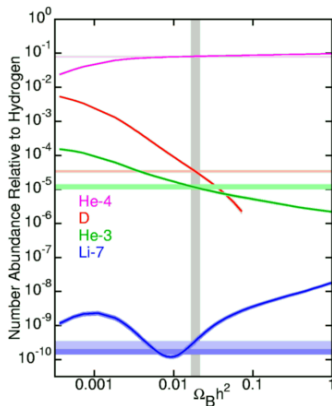
Before Planck



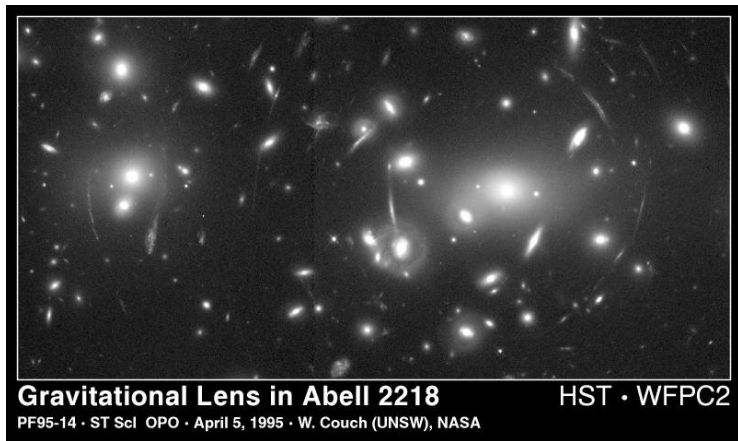
After Planck

Nucleosíntesis

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



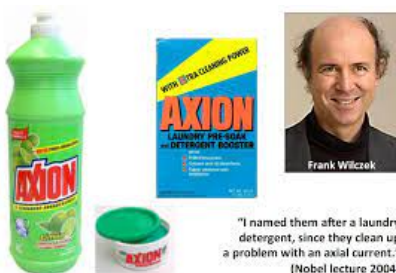
Materia Oscura (Lente Gravitacional)








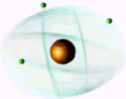



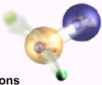
Materia Oscura

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. ...



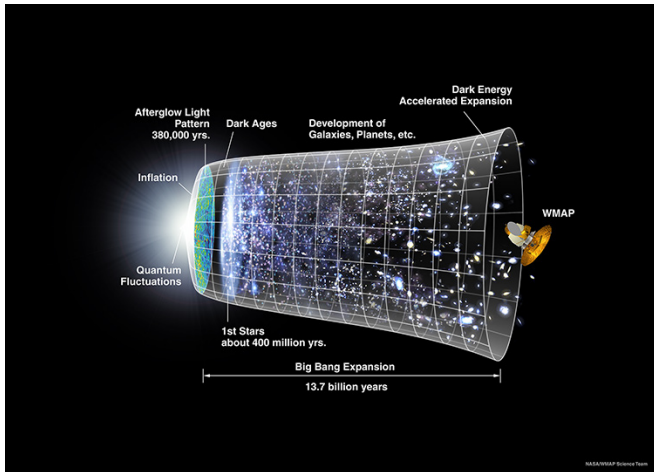
Las Cuatro Fuerzas

Strong	Electromagnetic
<p data-bbox="377 284 487 315">Gluons (8)</p>  <p data-bbox="391 347 473 404">Quarks</p>  <p data-bbox="391 419 473 502">Mesons Baryons</p>  <p data-bbox="521 362 651 502">Nuclei</p> 	<p data-bbox="720 284 802 315">Photon</p>  <p data-bbox="720 419 816 502">Atoms Light Chemistry Electronics</p> 
Gravitational	Weak
<p data-bbox="377 616 487 647">Graviton ?</p>  <p data-bbox="377 766 487 828">Solar system Galaxies Black holes</p> 	<p data-bbox="720 611 857 642">Bosons (W,Z)</p>  <p data-bbox="720 766 898 844">Neutron decay Beta radioactivity Neutrino interactions Burning of the sun</p> 

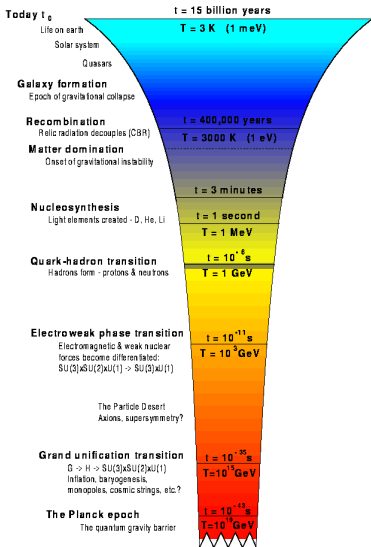
Partículas Elementales

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”



... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

- ▶ El Alavés vs Atlético de Madrid del sábado.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

- ▶ 16 mil millones de años. Muerte del Sol.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

- ▶ 16 mil millones de años. Muerte del Sol.
- ▶ 10 billones de años. Muerte de las estrellas más ligeras.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

- ▶ 16 mil millones de años. Muerte del Sol.
- ▶ 10 billones de años. Muerte de las estrellas más ligeras.
- ▶ 100 billones de años. Agotamiento del material nuclear convencional: fin de la formación estelar convencional.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

- ▶ 16 mil millones de años. Muerte del Sol.
- ▶ 10 billones de años. Muerte de las estrellas más ligeras.
- ▶ 100 billones de años. Agotamiento del material nuclear convencional: fin de la formación estelar convencional.
- ▶ 10^{30} años. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel galáctico.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

- ▶ 16 mil millones de años. Muerte del Sol.
- ▶ 10 billones de años. Muerte de las estrellas más ligeras.
- ▶ 100 billones de años. Agotamiento del material nuclear convencional: fin de la formación estelar convencional.
- ▶ 10^{30} años. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel galáctico.
- ▶ 10^{33} años. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel de cúmulos.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

- ▶ 16 mil millones de años. Muerte del Sol.
- ▶ 10 billones de años. Muerte de las estrellas más ligeras.
- ▶ 100 billones de años. Agotamiento del material nuclear convencional: fin de la formación estelar convencional.
- ▶ 10^{30} años. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel galáctico.
- ▶ 10^{33} años. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel de cúmulos.
- ▶ $10^{32} - 10^{41}$ años. Desintegración del protón.

... Y el futuro (final?)

Solo los hitos más importantes (!):

- ▶ 16 mil millones de años. Muerte del Sol.
- ▶ 10 billones de años. Muerte de las estrellas más ligeras.
- ▶ 100 billones de años. Agotamiento del material nuclear convencional: fin de la formación estelar convencional.
- ▶ 10^{30} años. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel galáctico.
- ▶ 10^{33} años. Los agujeros negros devoran las estrellas a nivel de cúmulos.
- ▶ 10^{32} – 10^{41} años. Desintegración del protón.
- ▶ 10^{39} años. Desintegración del neutrón: las estrellas de neutrones se convierten en enanas blancas.

... Y el futuro (final?)

- ▶ 10^{39} años. Desintegración del protón: desaparición de las enanas blancas.

... Y el futuro (final?)

- ▶ 10^{39} años. Desintegración del protón: desaparición de las enanas blancas.
- ▶ 10^{65} años. Evaporación de agujeros negros con M_{\odot} .

... Y el futuro (final?)

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

... Y el futuro (final?)

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