

Escuela de Verano de Postgrado de la Facultad de Ciencias de la Universidad del Bío-Bío

Cosmología

Dr. Antonella Cid

Departamento de Física



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

Camille Flammarion, L'Atmosphere: Météorologie Populaire (Paris, 1888), p. 163.
Un misionero medieval cuenta que ha encontrado el punto donde se juntan el cielo y la Tierra





DEFINICIÓN:

La Cosmología estudia el *universo* como un todo

Los cosmólogos intentan comprender el origen, evolución, estructura y destino del universo mediante el uso de *leyes físicas*.



DEFINICIÓN:

El *universo* es la totalidad de la existencia

¿Qué tamaño tiene el universo?

¿Desde cuándo ha existido?

¿De qué está hecho el universo?

¿Tendrá el universo un final?

Leyes Físicas

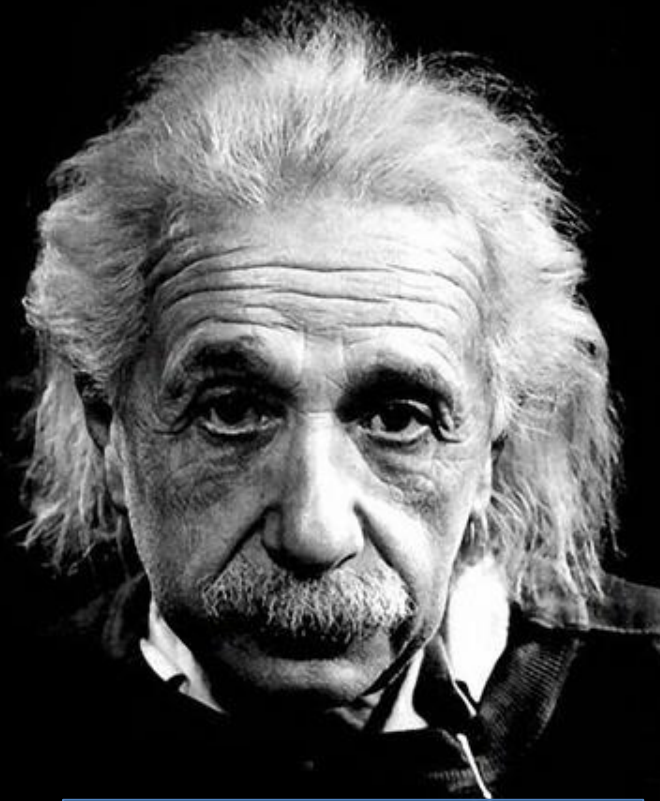
La naturaleza es más compleja de lo que parece ser, intentar comprender un fenómeno físico de manera exacta es una tarea titánica.

Generalmente se recurre a idealizaciones y se analiza la concordancia modelo-datos.

Algunas leyes de la Física se originaron a partir de estudios empíricos, otras a partir de principios fundamentales.

Las leyes Físicas tienen un rango de validez definido. Por ejemplo, las leyes de Newton sólo son aplicables cuando el campo gravitacional es débil y las rapideces son mucho menores que la rapidez de la luz en el vacío.

*La materia le dice al universo cómo curvarse y
la geometría le dice a la materia cómo moverse*

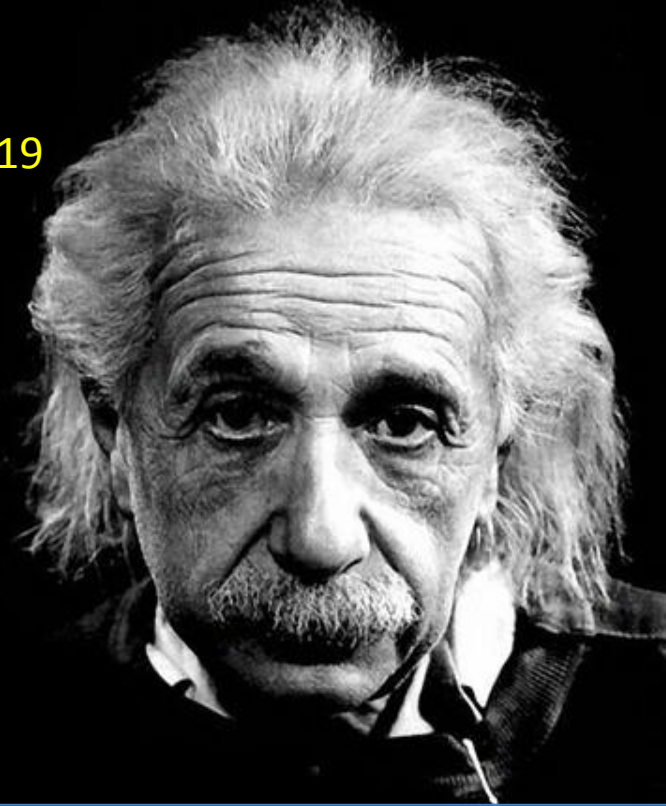
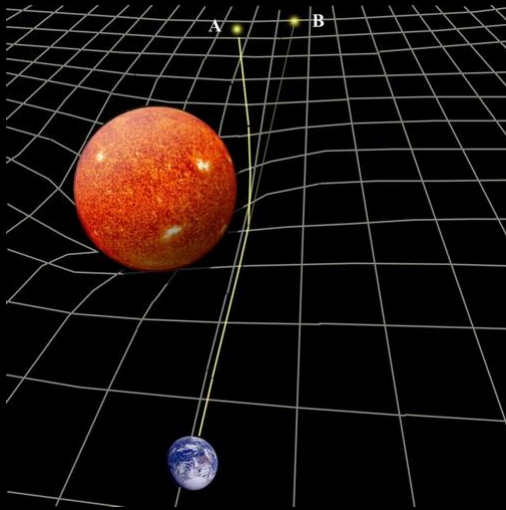


1915

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

*La materia le dice al universo cómo curvarse y
la geometría le dice a la materia cómo moverse*

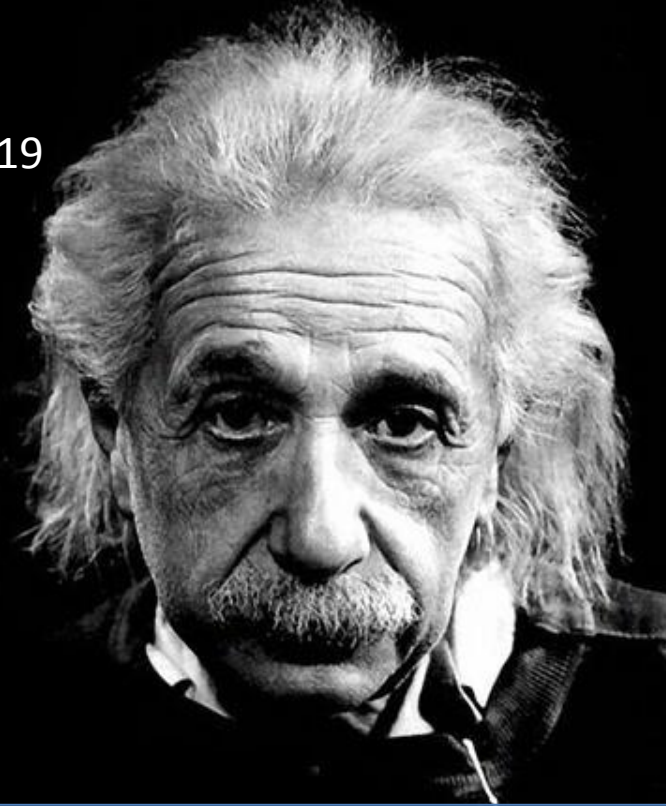
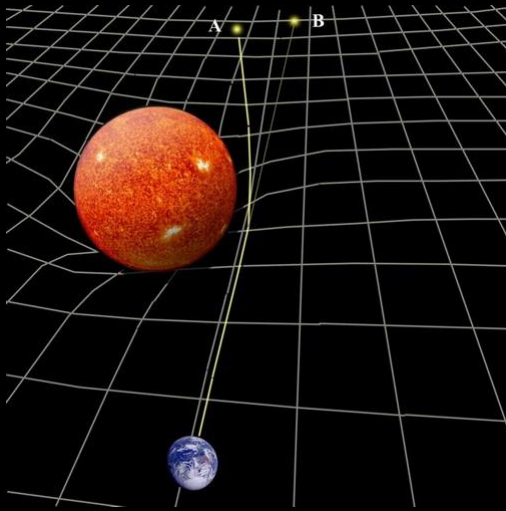
Eddington: eclipse solar 1919
Deflexión de la luz



$$G_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

*La materia le dice al universo cómo curvarse y
la geometría le dice a la materia cómo moverse*

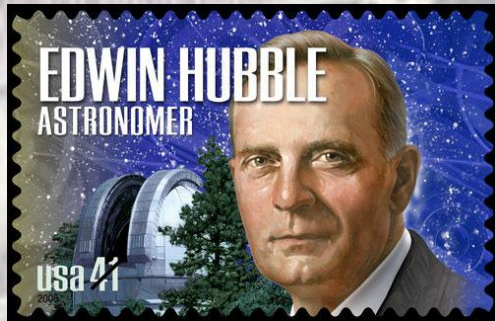
Eddington: eclipse solar 1919
Deflexión de la luz



Einstein: universo estático 1917
Constante cosmológica Λ

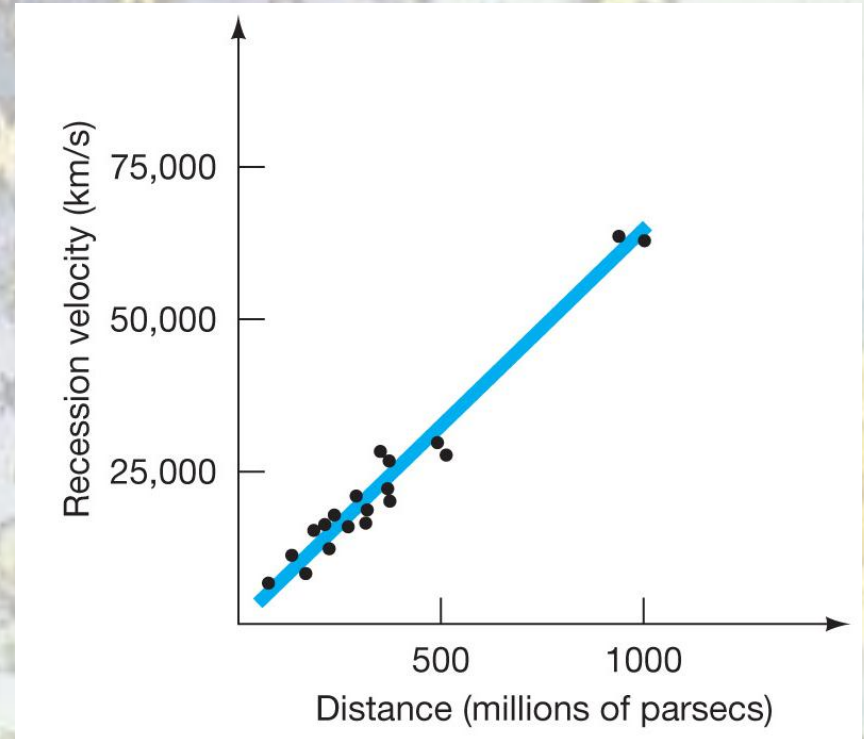
$$G_{\alpha\beta} + g_{\alpha\beta}\Lambda = R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R + g_{\alpha\beta}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\alpha\beta}$$

Ley de Hubble (1929)



El universo se expande:

Las galaxias distantes se alejan de nuestra galaxia, la velocidad con que éstas se alejan es proporcional a su distancia a nosotros. La constante de proporcionalidad se conoce como constante de Hubble.

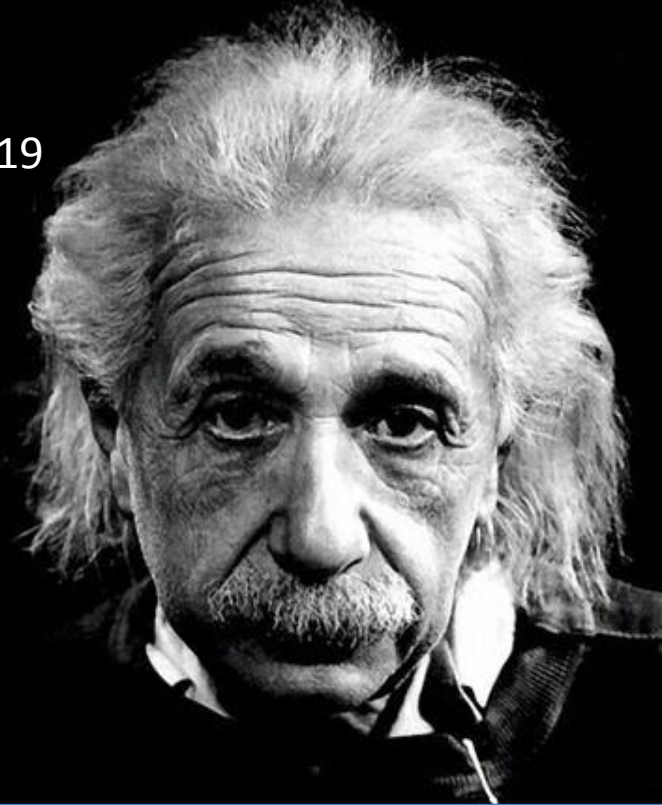
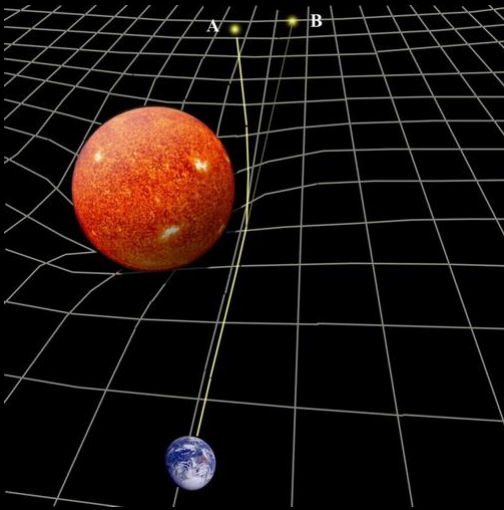


$$H_0 = 69.32 \pm 0.80 \left[\left(\frac{\text{km}}{\text{s}} \right) / \text{Mpc} \right]$$

arXiv:1212.5225 [astro-ph.CO]

*La materia le dice al universo cómo curvarse y
la geometría le dice a la materia cómo moverse*

Eddington: eclipse solar 1919
Deflexión de la luz



Einstein: universo estático 1917
Constante cosmológica Λ



Universos emergentes

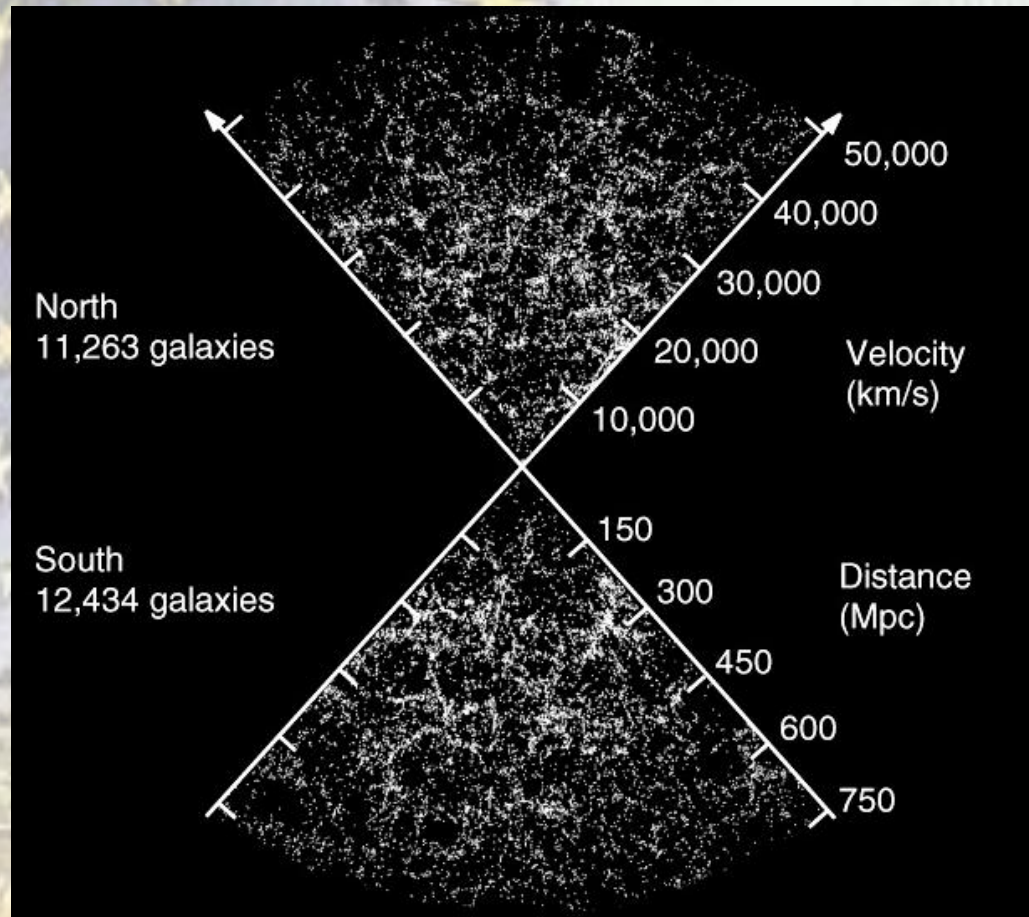
Expansión acelerada

$$G_{\alpha\beta} + g_{\alpha\beta}\Lambda = R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R + g_{\alpha\beta}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\alpha\beta}$$

El Principio Cosmológico

SIMETRIAS:

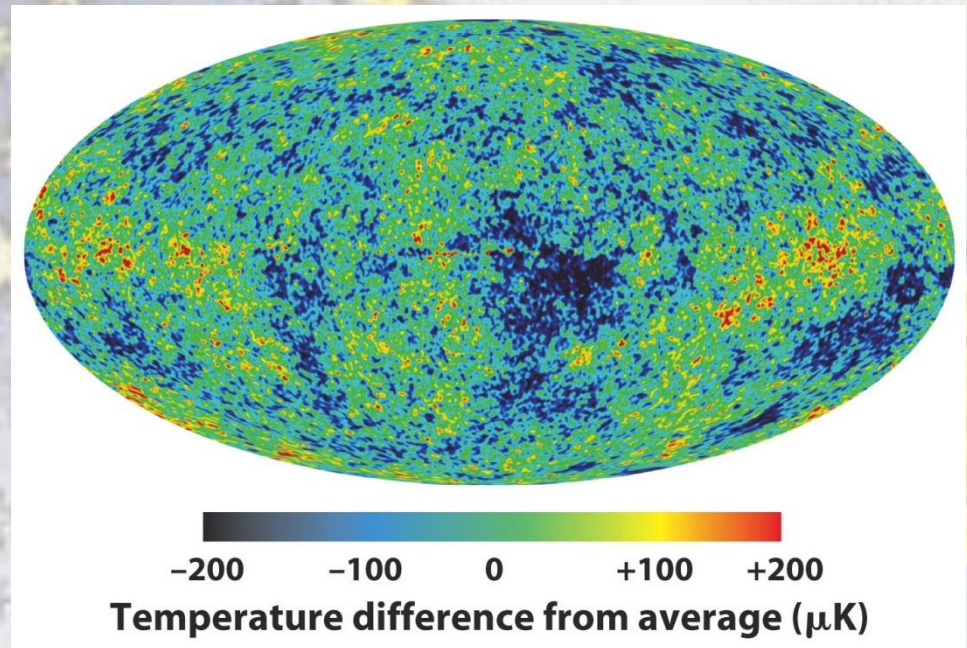
homogeneidad



El Principio Cosmológico

SIMETRIAS:

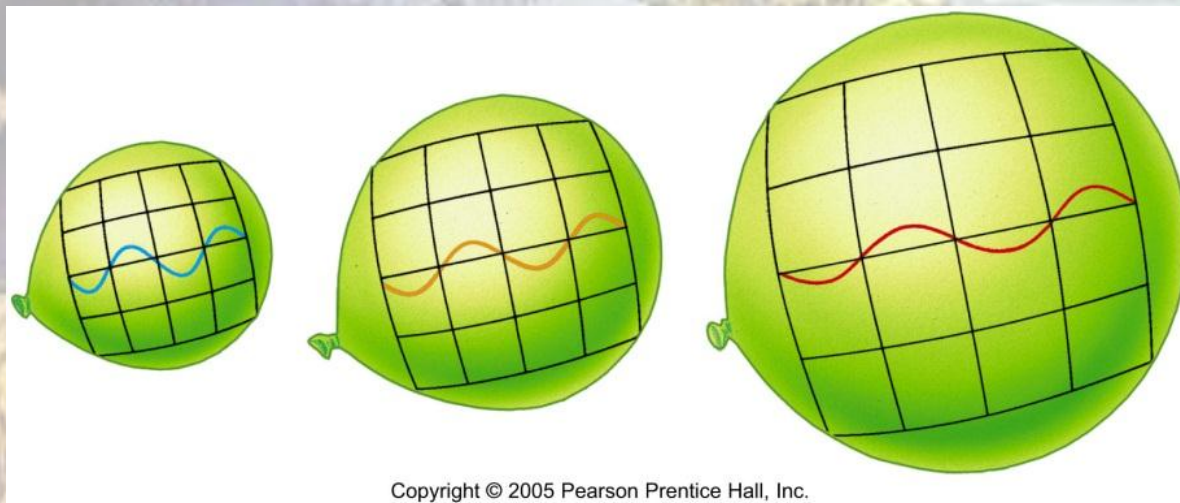
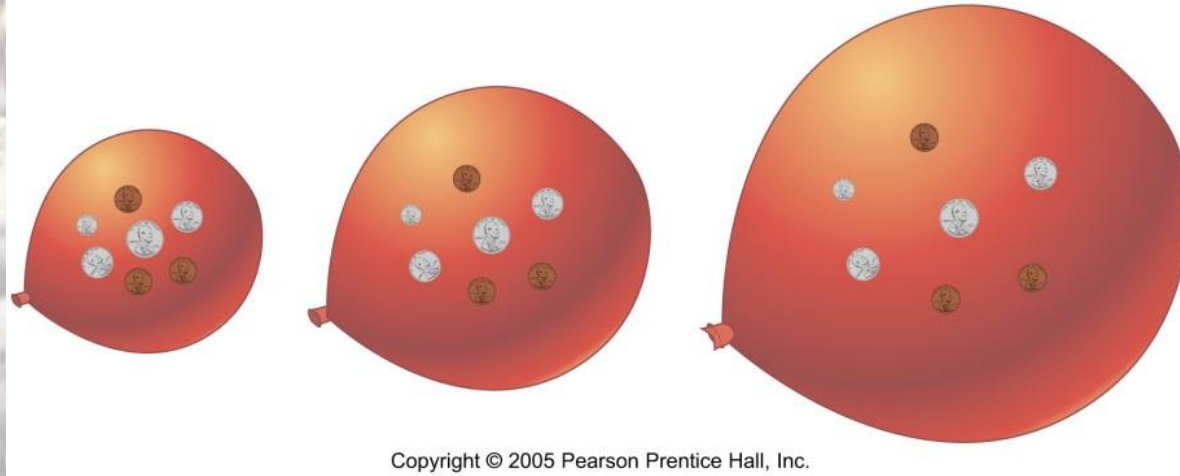
*homogeneidad e
isotropía
a gran escala
(sobre 100 Mpc)*



El principio Copernicano establece que nosotros NO ocupamos un lugar privilegiado en el universo, por consiguiente, si existe isotropía en torno a nosotros debería existir isotropía en torno a cualquier otro punto del universo.

Como consecuencia el universo no tiene límites o centro.

El Universo en Expansión

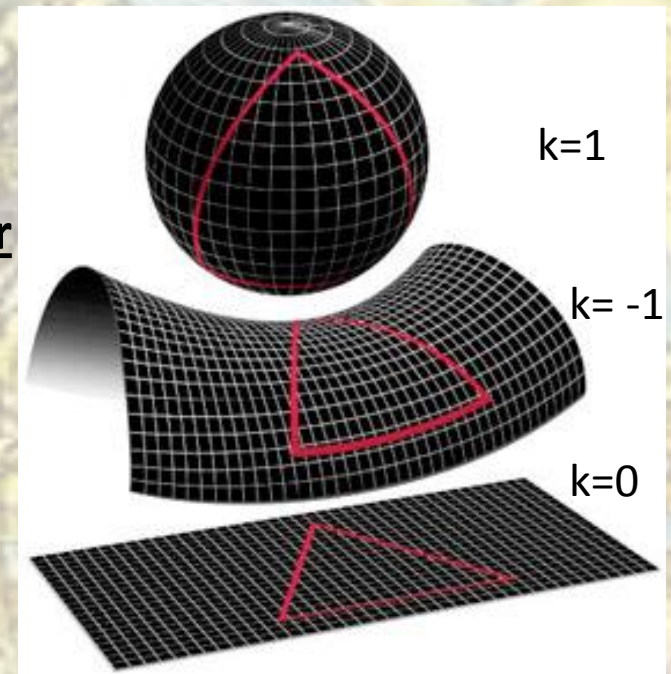


Geometría del Universo

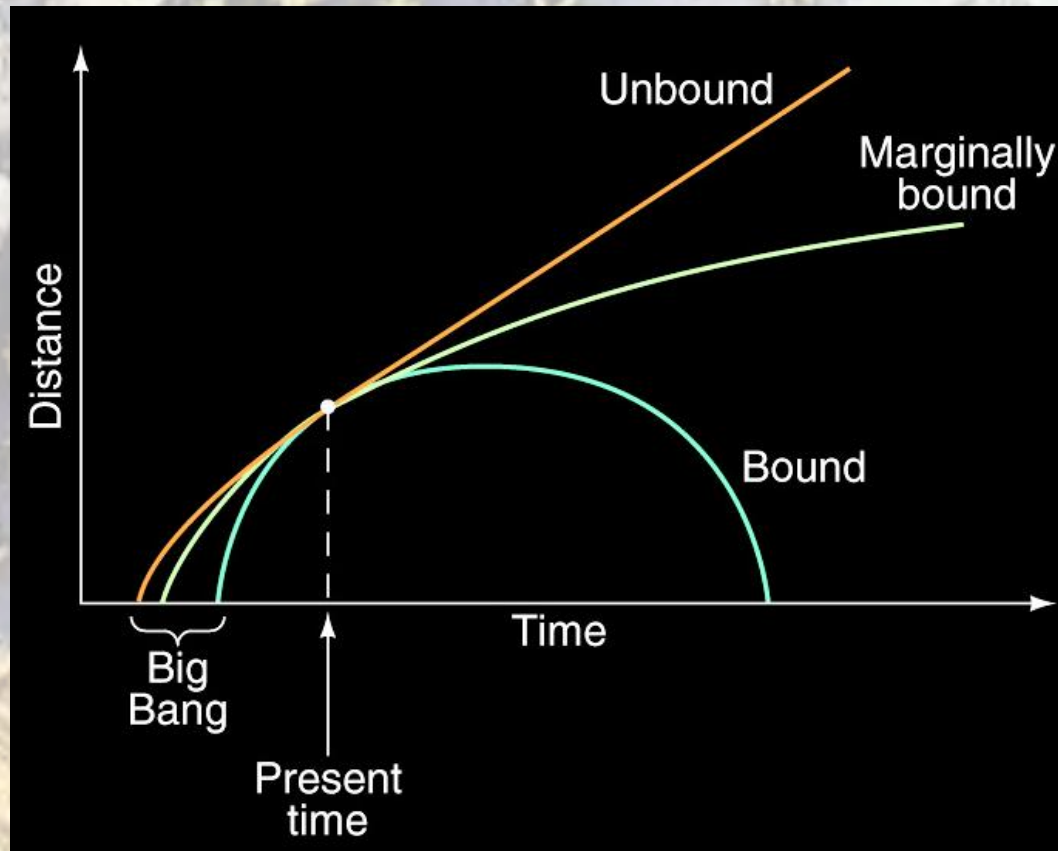
$$g_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a(t)^2}{1 - k r^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a(t)^2 r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a(t)^2 r^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

Métrica de Friedman-Lemaitre-Robertson-Walker (1920-1930)

- El universo evoluciona, se expande
- El universo es máximamente simétrico (3+1)
- El universo tiene curvatura constante
- t, r, θ, φ coordenadas comóviles
- $a(t)$ se denomina factor de escala



Geometría del Universo



Contenido de Materia

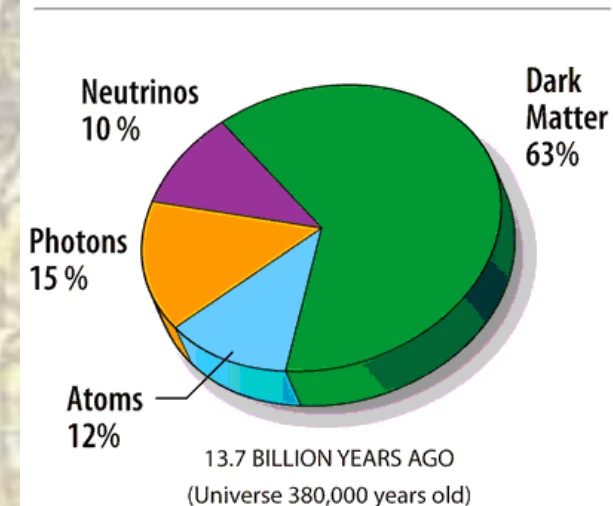
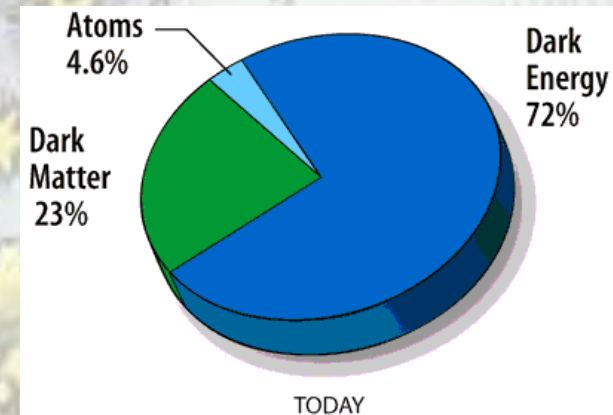
Tensor Energía-Momentum

- Fluido Perfecto
- Ecuación de estado barotrópica

$$T_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} -\rho(t) & 0 & 0 & 0 \\ \text{densidad} & & & \\ 0 & p(t) & 0 & 0 \\ & \text{presión} & & \\ 0 & 0 & p(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p(t) \end{bmatrix}$$

$$p(t) = \omega \rho(t) \quad : \text{Ecuación de estado}$$

↪ parámetro de estado



Modelo Cosmológico Estándar

$k = 0$: sin curvatura

Ecuaciones de Einstein:

$$G_{\alpha\beta} = \kappa T_{\alpha\beta}$$

Geometría: $ds^2 = -dt^2 + a(t)^2(dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2)$

Contenido de Materia:

$$p(t) = \omega \rho(t)$$

Modelo Cosmológico Estándar

$$3H^2 = \kappa \rho$$

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0$$

$$p = \omega \rho$$

Ecuación de Friedman

Ecuación de Conservación

Ecuación de Estado

$H = \frac{\dot{a}}{a}$: tasa de expansión de Hubble

$$\rho(t) = \rho_0 a(t)^{-3(1+\omega)}$$

$$a(t) = a_0 t^{\frac{2}{3(1+\omega)}}, \omega \neq -1$$

Radiación $\rho \propto a^{-4}$

Polvo $\rho \propto a^{-3}$

Const. Cosmológica $\rho \propto \rho_0$

Modelo Cosmológico Estándar

$$3H^2 = \kappa \rho$$

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0$$

$$p = \omega \rho$$

$H = \frac{\dot{a}}{a}$: tasa de expansión de Hubble

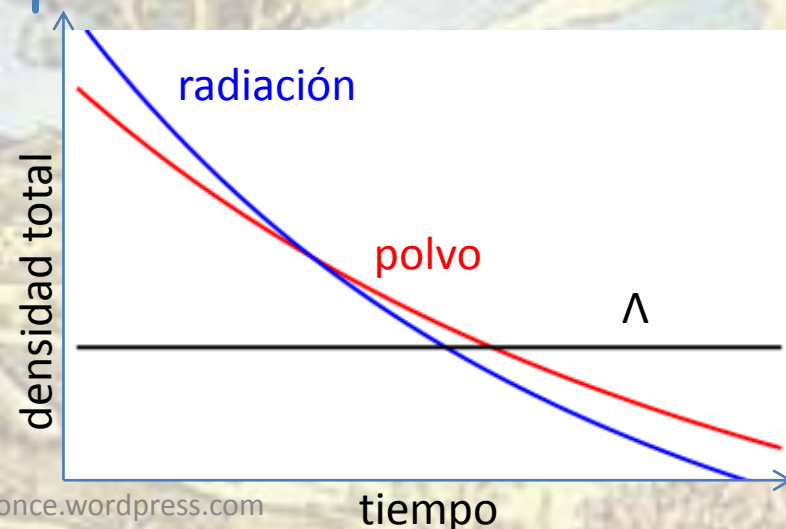
Ecuación de Friedman

Ecuación de Conservación

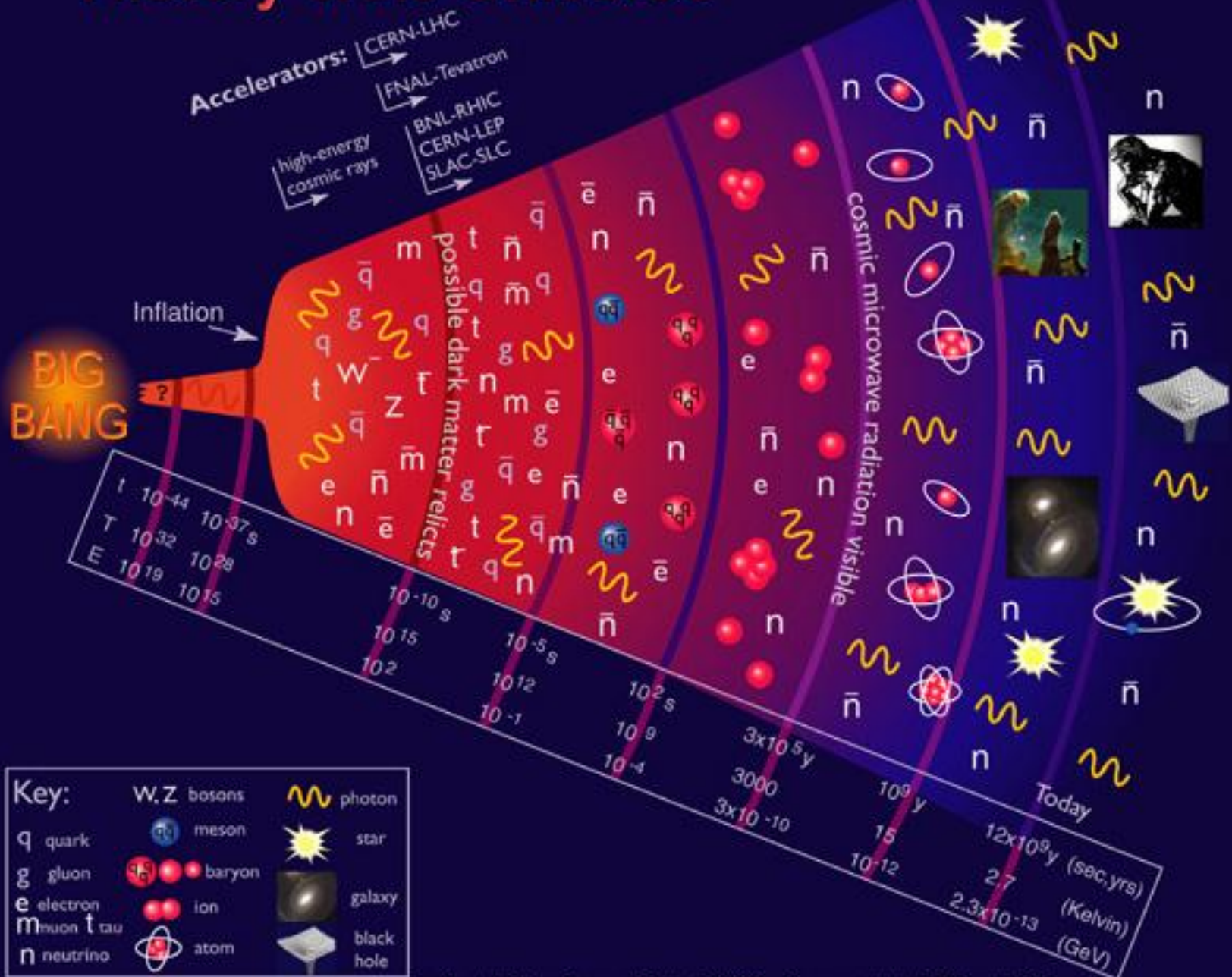
Ecuación de Estado

$$\rho(t) = \rho_0 a(t)^{-3(1+\omega)}$$

$$a(t) = a_0 t^{\frac{2}{3(1+\omega)}}$$



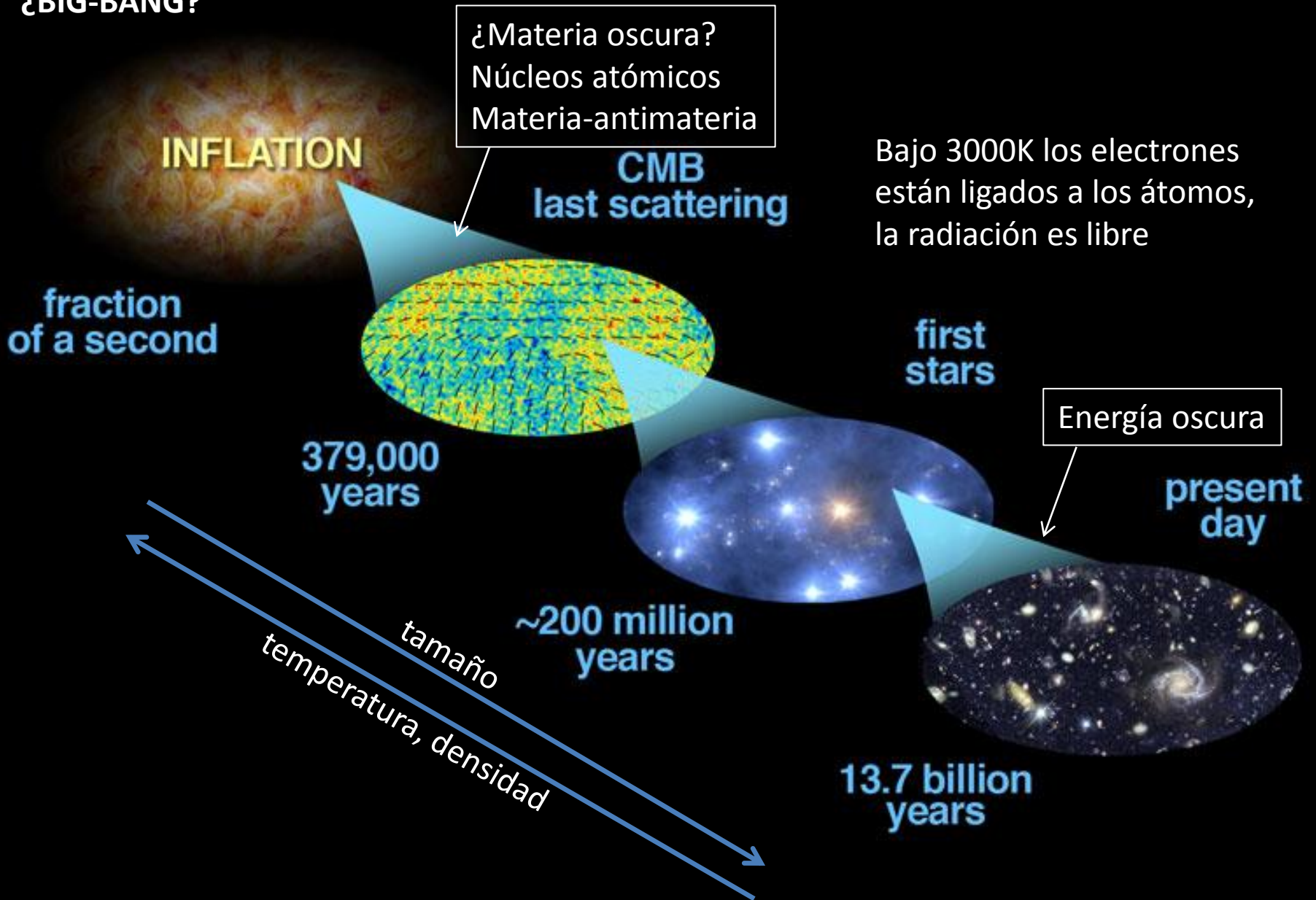
History of the Universe



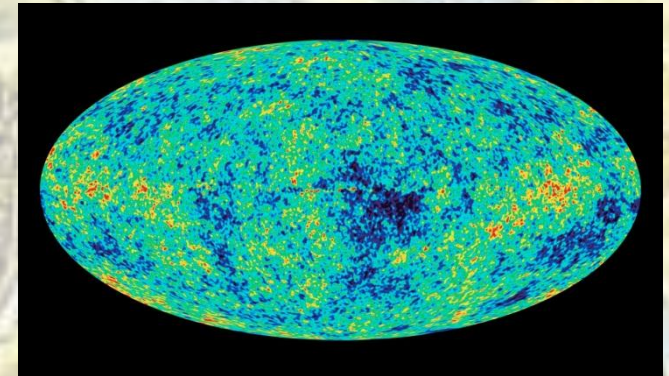
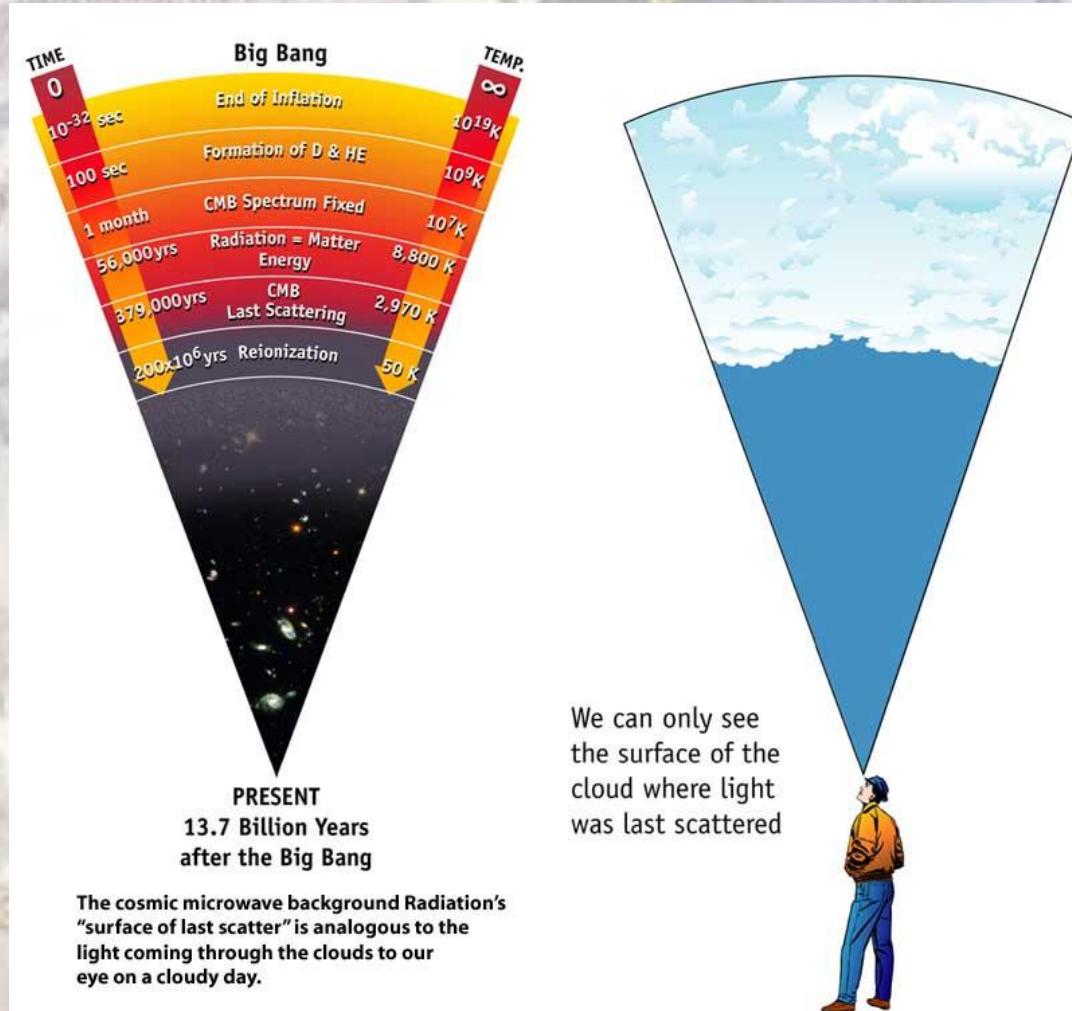
Éxitos del Modelo Cosmológico Estándar

- Existencia de una radiación cósmica de fondo (1965)
- Distribución de estructuras a gran escala
- Abundancias Hidrógeno, Helio, Deuterio, Litio
- Expansión acelerada del universo (1998)

¿BIG-BANG?



Superficie de Último Scattering



Inflación

Época de expansión acelerada necesaria al principio del universo para resolver algunos problemas que presenta el modelo cosmológico estándar:

- Planitud
- Horizonte
- Monopolos magnéticos

Se requiere que esta época de expansión acelerada dure un período muy corto de tiempo

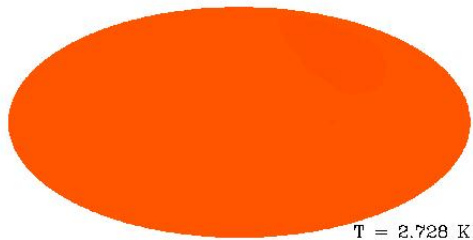
Esta época predice anisotropías en la radiación cósmica de fondo
Las anisotropías de CMB son las semillas de las estructuras

Anisotropías de la Radiación CMB

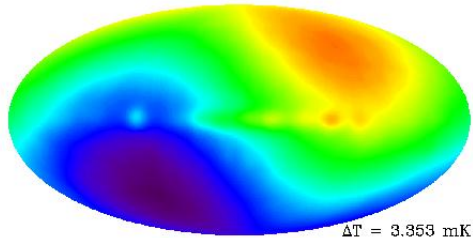
Satélite COBE 1989

1992 primera detección anisotropía

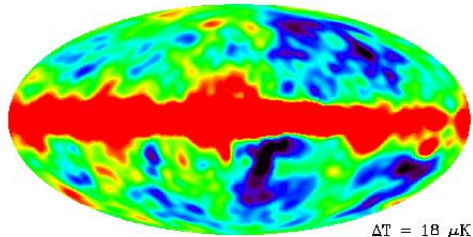
2006 Premio Nóbel Física



$T = 2.728 \text{ K}$

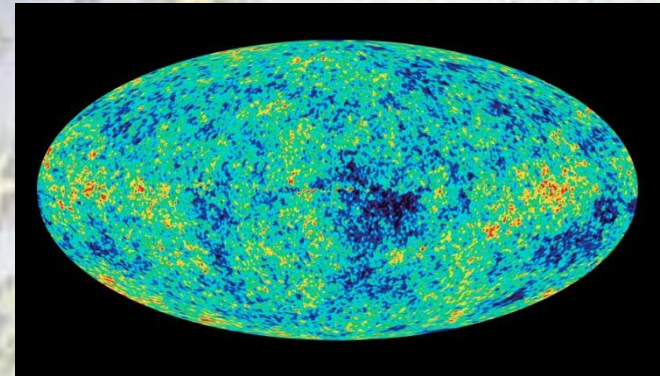


$\Delta T = 3.353 \text{ mK}$

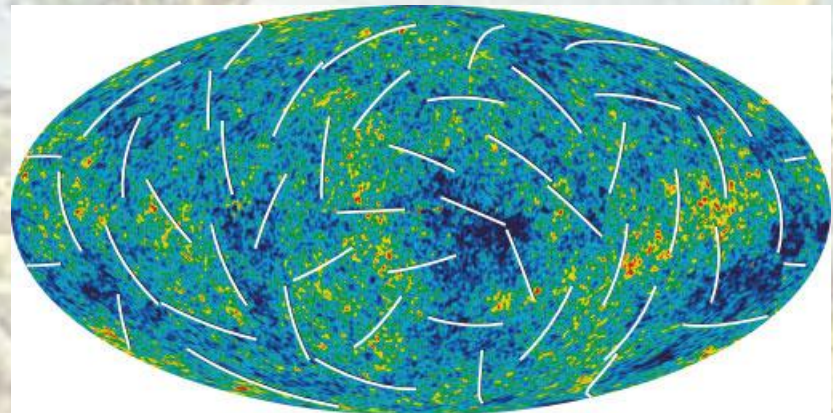


$\Delta T = 18 \text{ } \mu\text{K}$

Satélite WMAP 2001



Satélite Planck 2009: Polarización

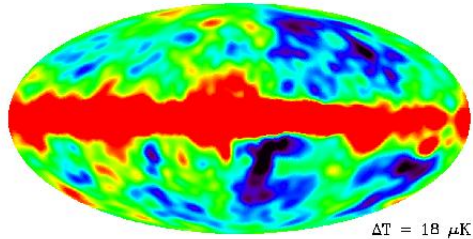
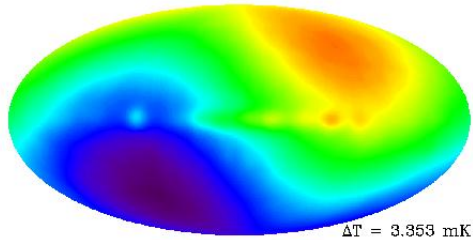
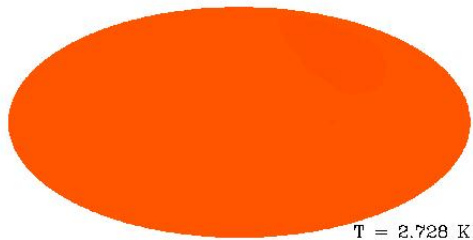


Anisotropías de la Radiación CMB

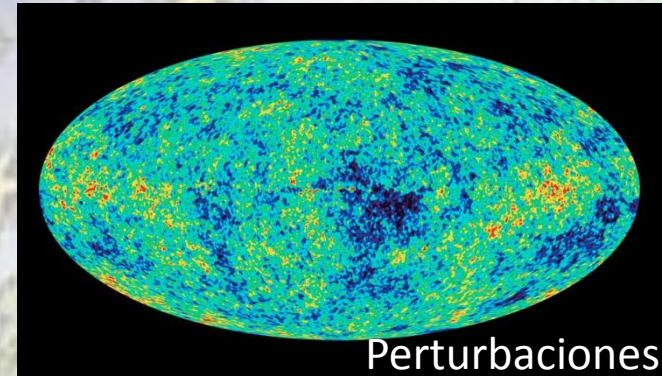
Satélite COBE 1989

1992 primera detección anisotropía

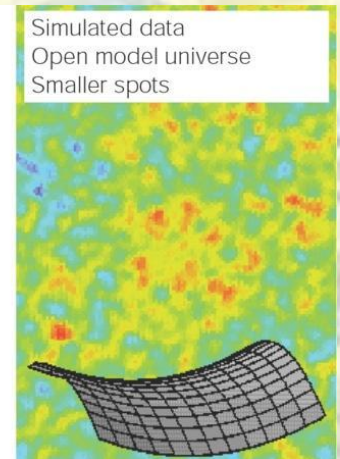
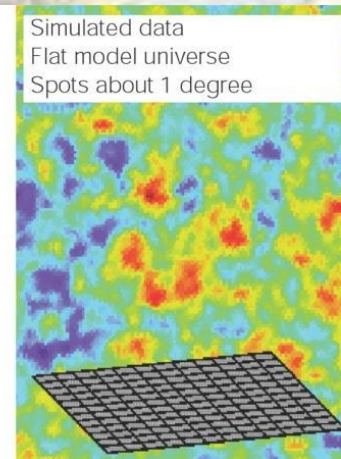
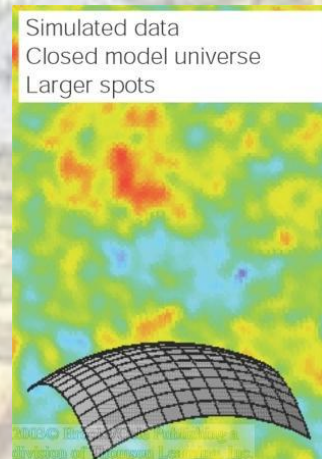
2006 Premio Nóbel Física



Satélite WMAP 2001



Curvatura del espacio-tiempo



Expansión Acelerada

Si $a(t)$ es el tamaño del universo, $\dot{a} > 0$ indica expansión y $\ddot{a} > 0$ indica aceleración

En el contexto del modelo cosmológico estándar:

$$\begin{aligned} 3H^2 &= \kappa \rho \\ \dot{\rho} + 3H(\rho + p) &= 0 \\ p &= \omega \rho \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \rho(t) &= \rho_0 a(t)^{-3(1+\omega)} \\ a(t) &= a_0 t^{\frac{2}{3(1+\omega)}}, \omega \neq -1 \end{aligned}$$



$$\ddot{a} < 0$$

Constante cosmológica:

$$\omega = -1 \quad \longrightarrow \quad \rho = \rho_0 \quad \longrightarrow \quad H = H_0 \quad \longrightarrow \quad \ddot{a} > 0$$



$$a(t) = a_0 e^{H_0 t}$$

Expansión acelerada eterna

Campo Escalar

$$3H^2 = \kappa \rho$$

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0$$

$$p \neq \rho$$

$$\rho(t) = \frac{1}{2} \dot{\sigma}^2 + V(\sigma)$$

$$p(t) = \frac{1}{2} \dot{\sigma}^2 - V(\sigma)$$

$$V(\sigma) > \dot{\sigma}^2$$



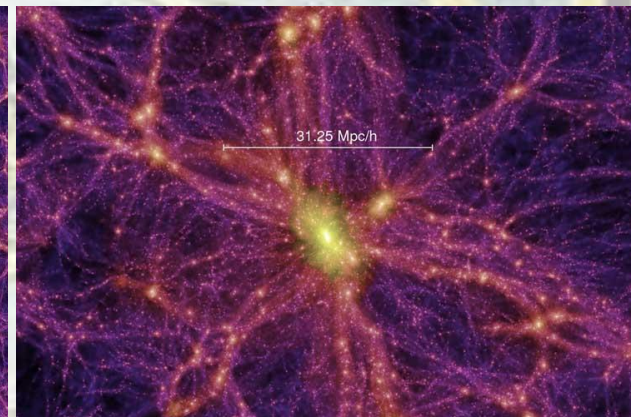
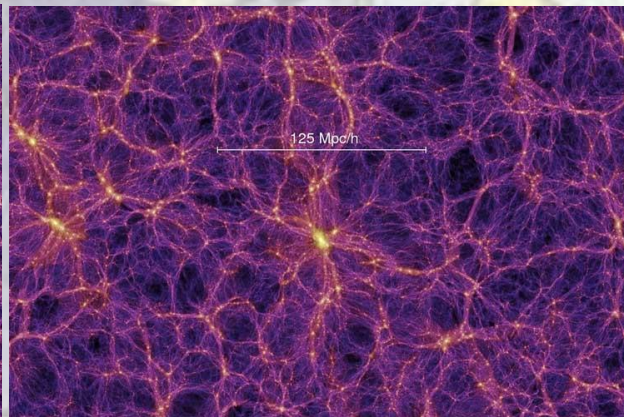
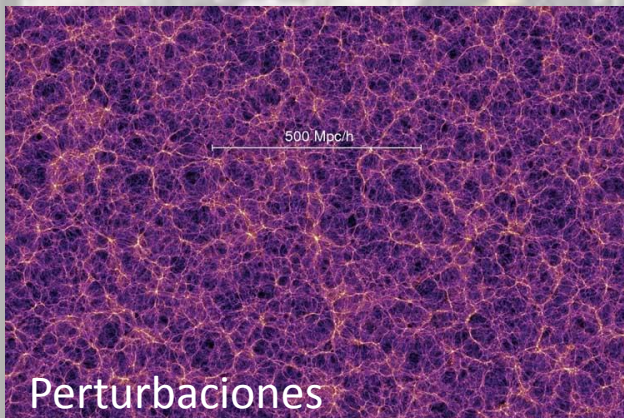
$$\ddot{a} > 0$$

Ya NO tenemos una ecuación de estado con parámetro de estado constante

Estructuras

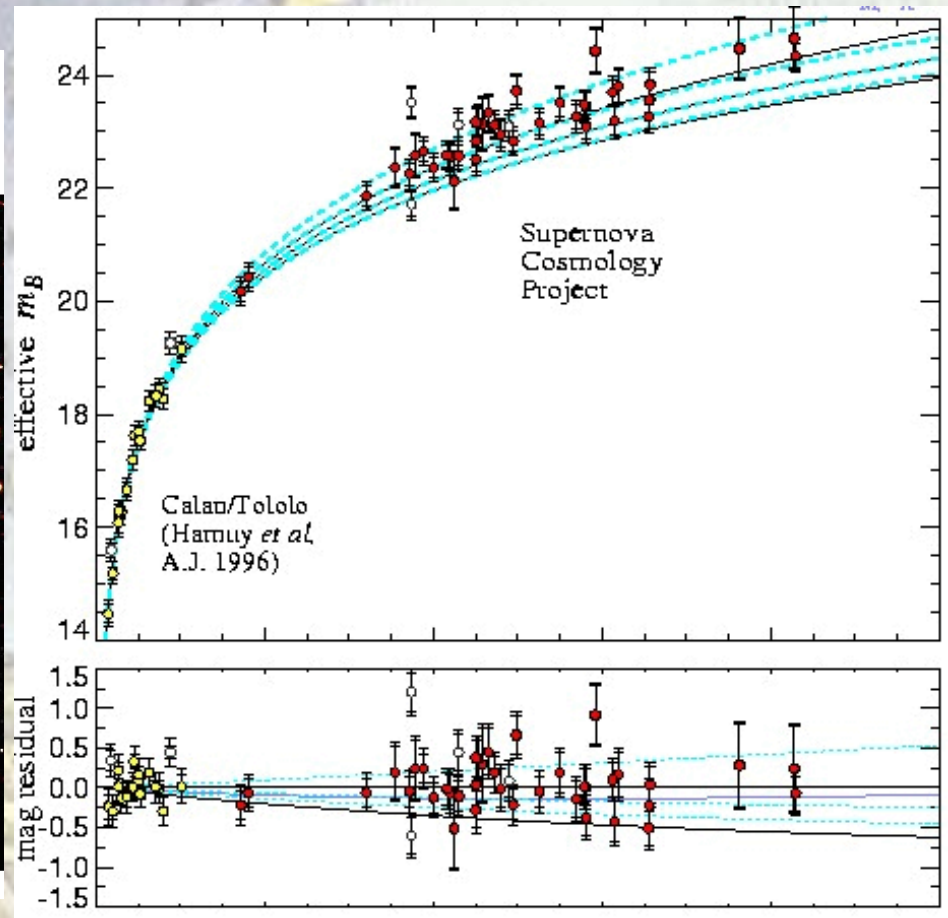
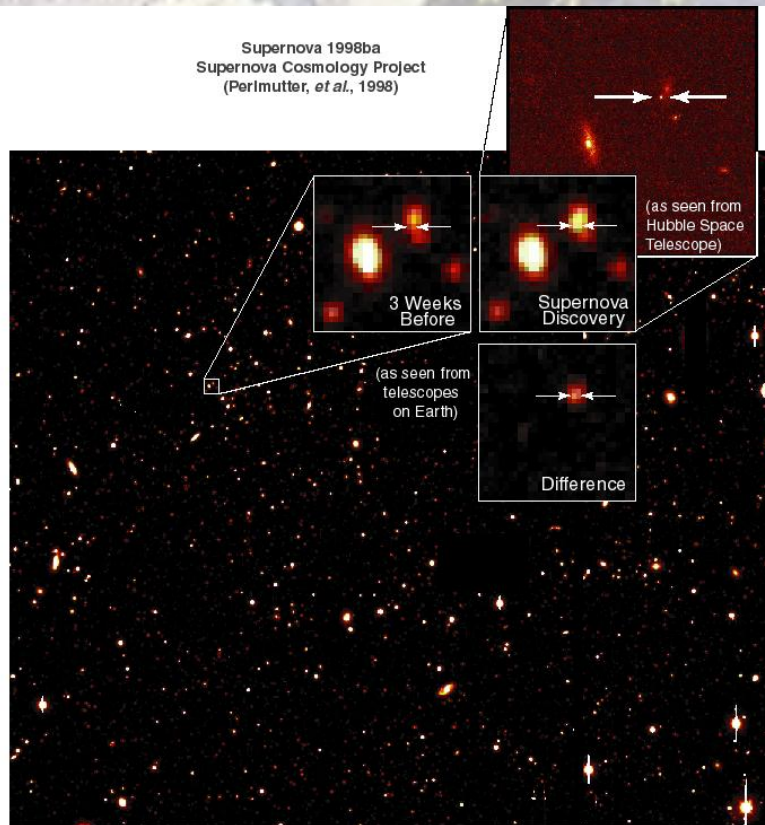
Millenium simulation arXiv:0504097 [astro-ph]

Si no existiese materia oscura no se habrían formado las estructuras que conocemos!



10 billones partículas
Evolución desde que la radiación CMB fue liberada
Cubo de 2 billones de años luz de lado
20 millones de galaxias

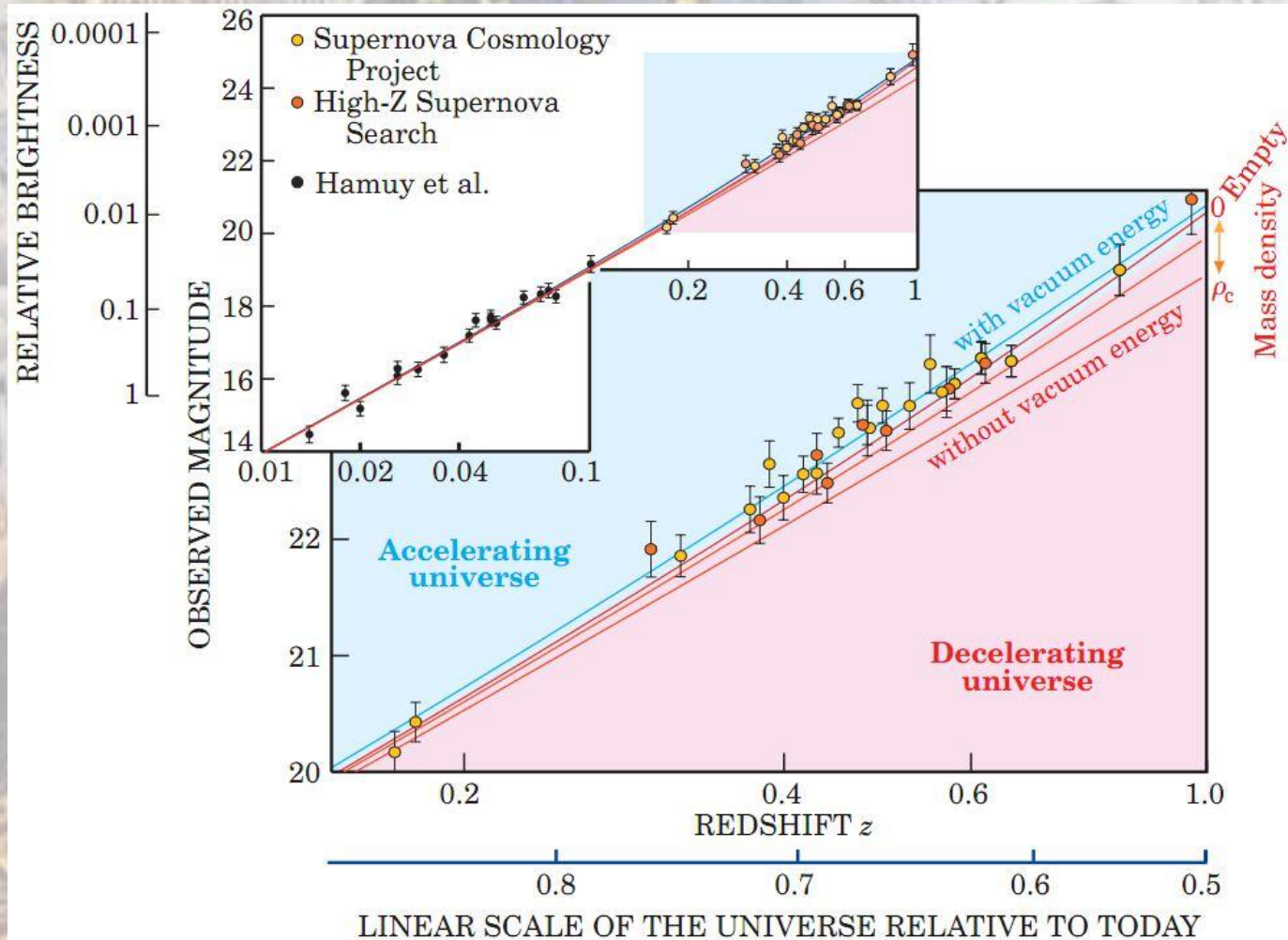
Evidencia de Energía Oscura

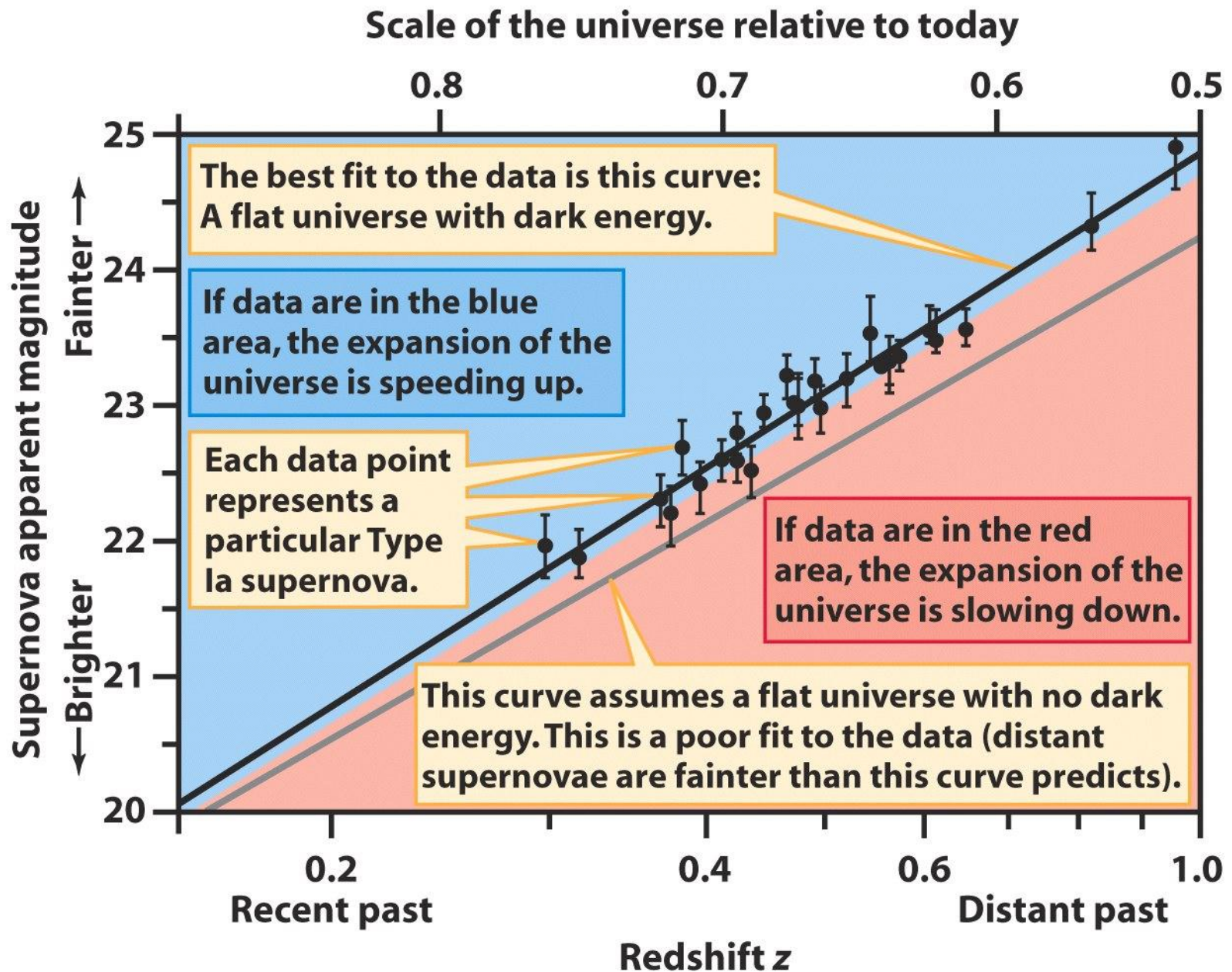


Supernova Cosmology Project

arXiv:1105.3470 [astro-ph]

Evidencia de Energía Oscura





Problemas

- Problemas modelo cosmológico estándar
 - Constante cosmológica
 - Problema de la coincidencia
- No hemos medido $\omega(t)$
- No hemos observado directamente energía oscura
- No hemos observado directamente materia oscura

Modelo Cosmológico Estándar

