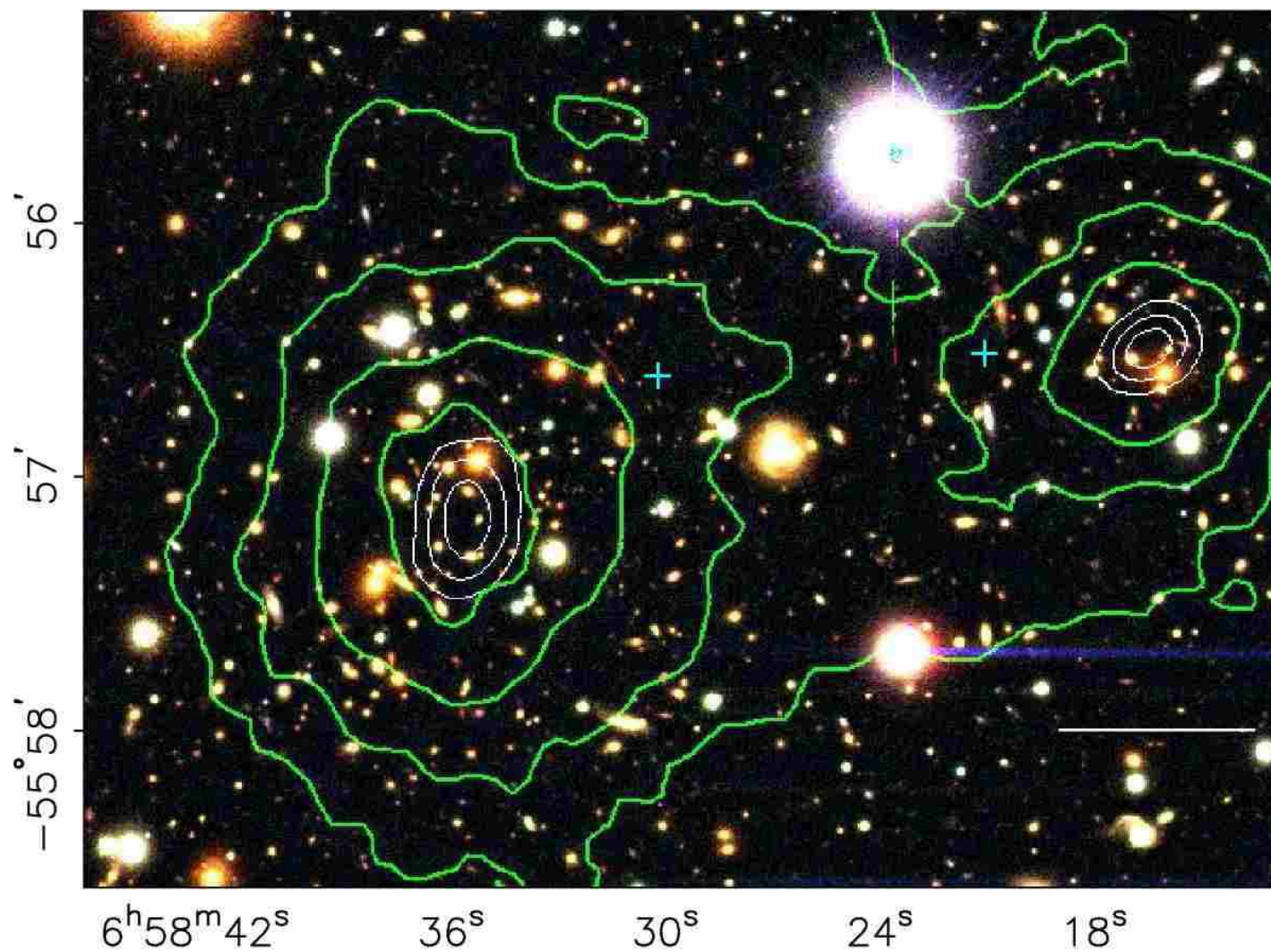


## Introducción

Expansión Cósmica (Hubble, 1920). **Suposición:** Toda la energía en el Universo en forma de materia y radiación

### Materia Oscura

- Estabilidad de galaxias
- Movimiento de estrellas y gas en galaxias
- Movimiento de galaxias en cúmulos



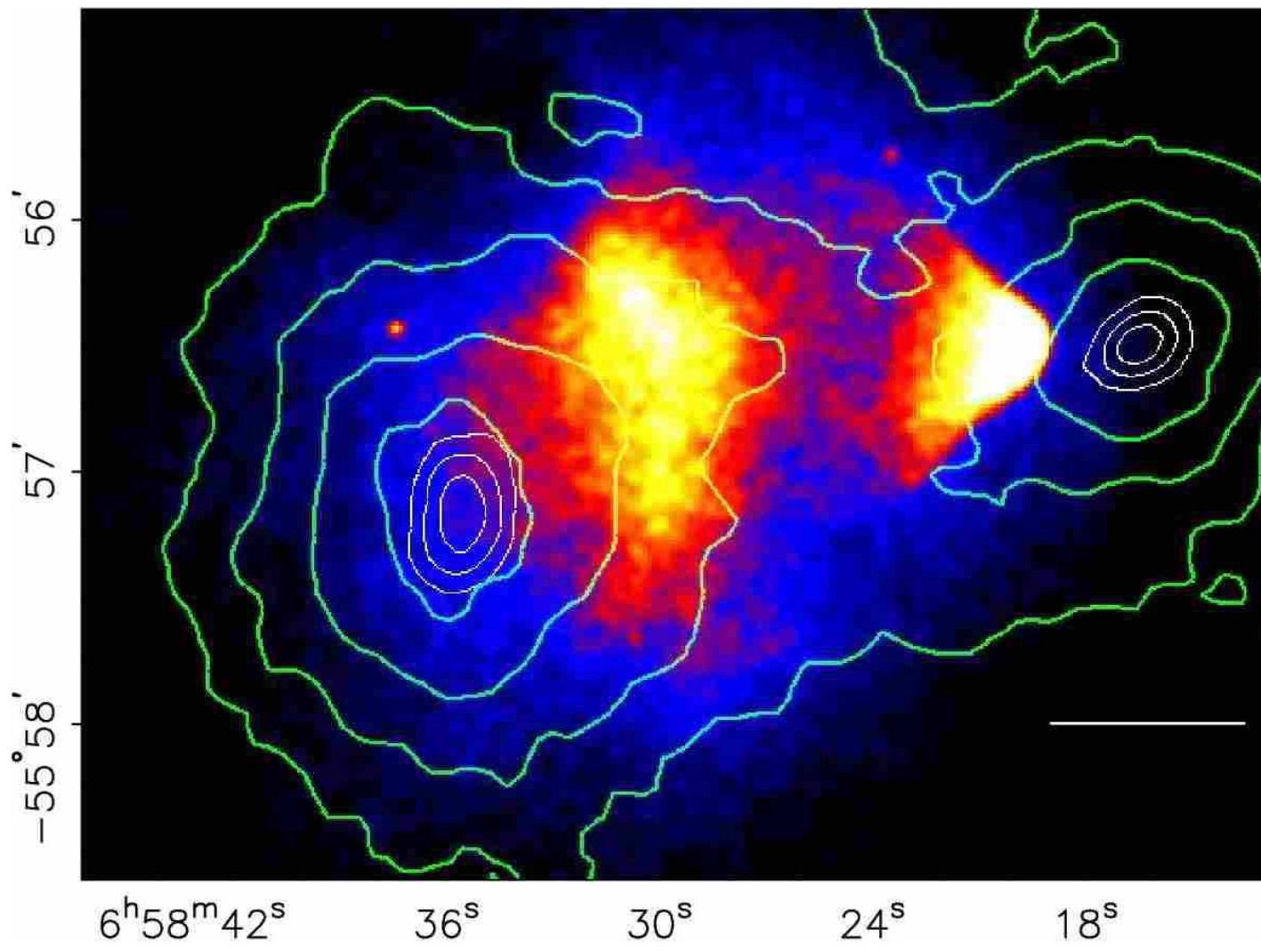


Fig. 1.- Shown above in the top panel is a color image from the Magellan images of the merging cluster 1E0657-558, with the white bar indicating 200 kpc at the distance of the cluster. In the bottom panel is a 500 ks Chandra image of the cluster. Shown in green contours in both panels are the weak lensing reconstruction with the outer contour level at  $\Sigma = 0.16$  and increasing in steps of 0.07. The white contours show the errors on the positions of the peaks and correspond to 68.3% the location of the centers used to measure the masses of the plasma clouds in Table 2.

**Universo Inflacionario**, (teoría  $t < 10^{-30}$ s)

- ¿Por qué el universo es tan homogéneo e isotrópico?
- ¿Por qué la curvatura del espacio es tan pequeña?
- ¿De donde vienen las inhomogeneidades iniciales que luego forman la estructura?
- Inflación predice un universo plano; esto fija la densidad de energía total  $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 10^{-29} \frac{g}{\text{cm}^{-3}}$
- Sin embargo, la materia ordinaria no es más que 10%  $\rho_c$ . Se propuso materia Oscura en forma de partículas frías, no-bariónicas. **Modelo estándar CDM**

### Constante Cosmológica

- Observaciones recientes implican  $\rho_{\text{total}} < 50\%$  (brillante y oscura)
- Medidas de las fluctuaciones en Temperatura del CMB y la distribución de galaxias en grandes escalas indican que el Universo es PLANO.

- Energía Oscura, que resiste el colapso gravitacional. Constante Cosmológica Presión negativa. Evidencia viene de Supernovas Ia . *El Universo acelera.*

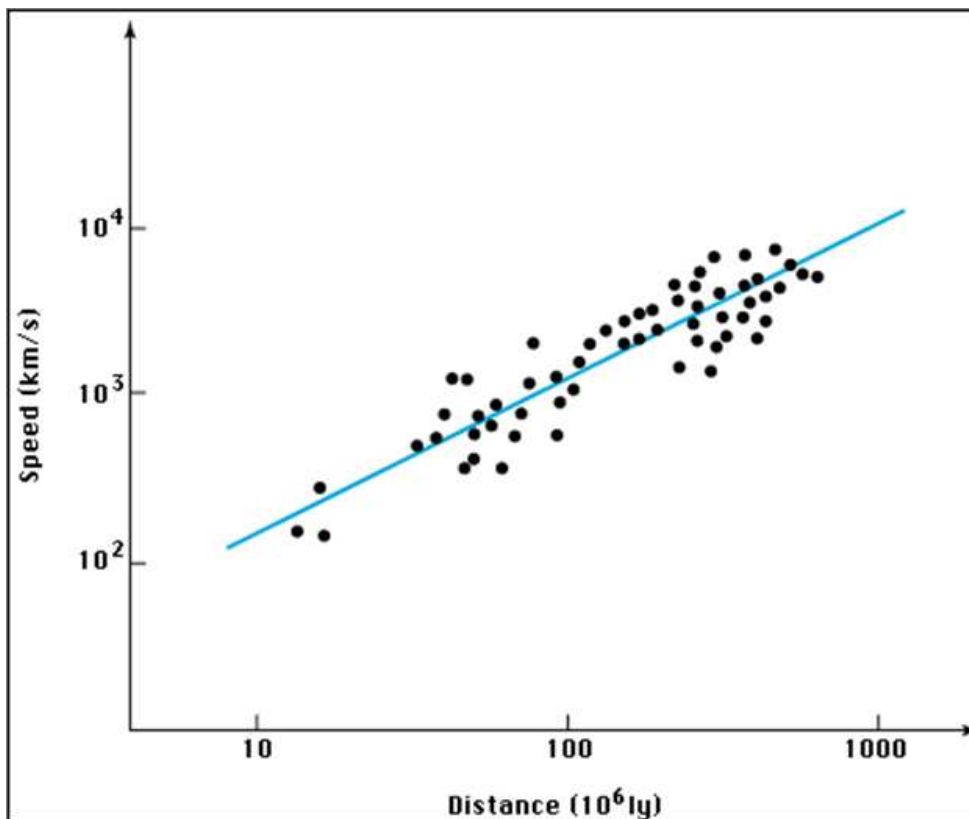
## Hacia el modelo cosmológico estándar

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.

## Ley de Hubble



# 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  $V = H D$ .  $H$  es la constante de Hubble,  $D$  es la distancia y  $V$  es la velocidad de recepción de una galaxia.

**Principio Cosmológico:** El Universo es homogéneo e isotrópico. 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).

## Parámetros cosmológicos

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),  $\rho_\Lambda$

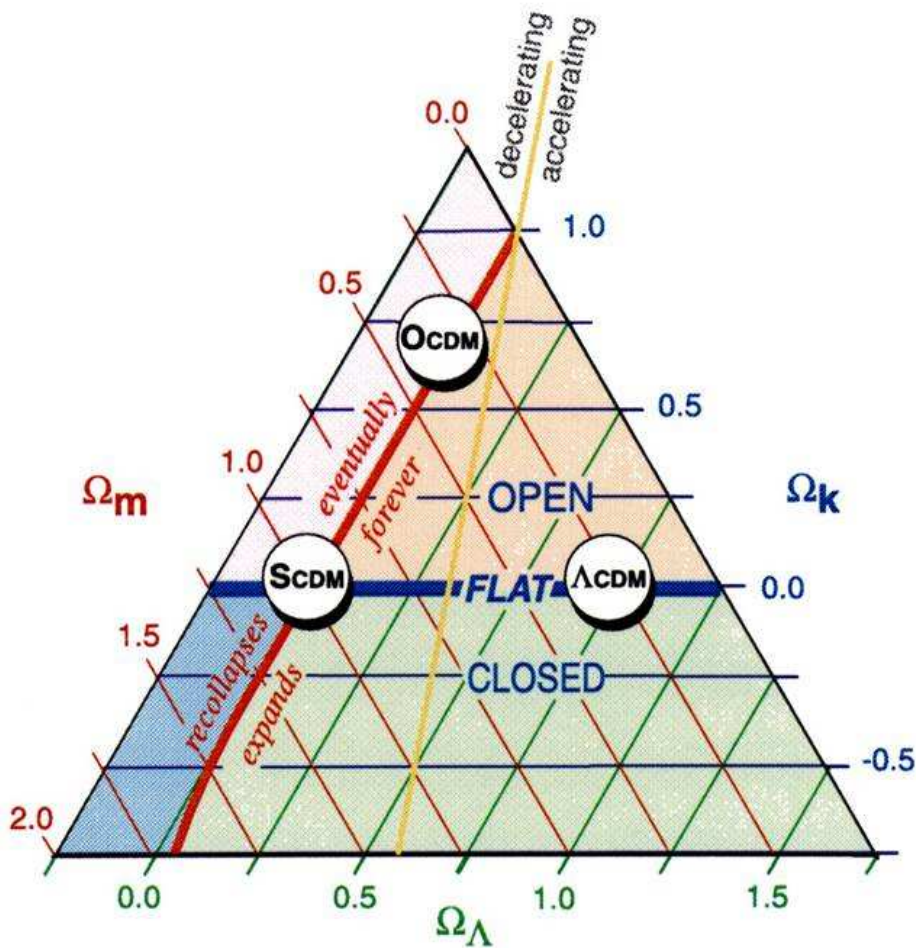
Las ecuaciones de la Relatividad General implican:

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

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

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}, \Omega_k = -\frac{k}{a^2 H^2}$$

$$1 = \Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda.$$



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 Cós-mica Oscura*.

## Midiendo distancias

### 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  $\Omega_\Lambda$

## 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

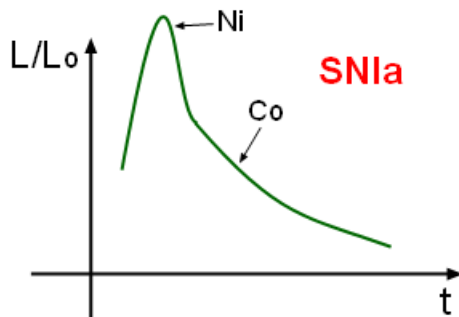
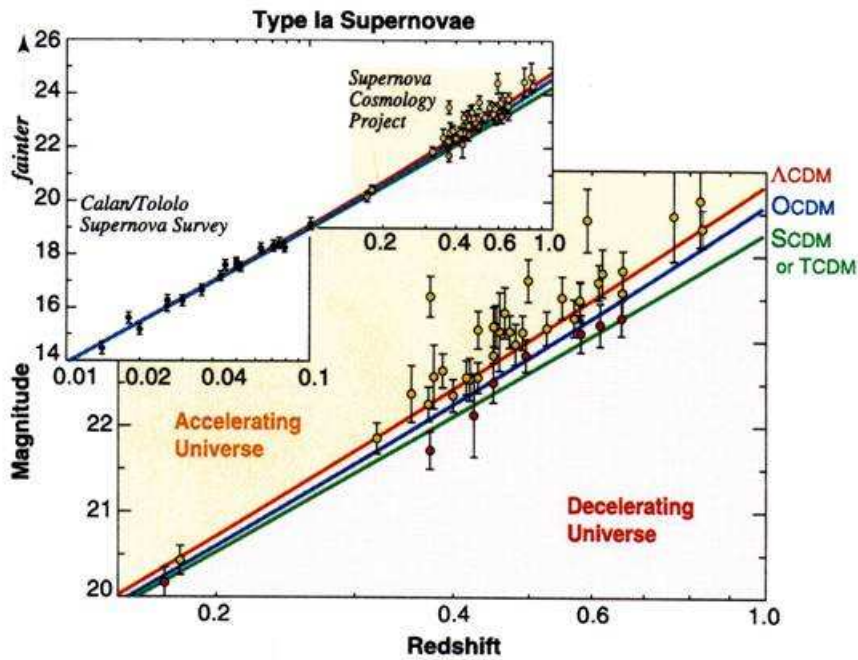
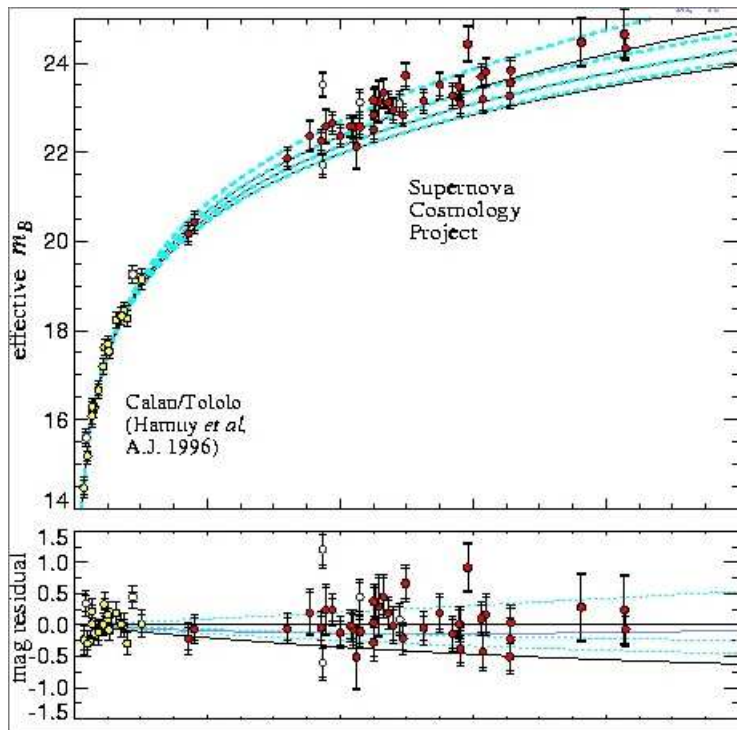


Gráfico de luminosidad (relativa al Sol) como función del tiempo, para una Supernova Ia. El máximo se debe al decaimiento del Niquel (Ni), subsecuentemente la luminosidad se debe al Cobalto (Co).

## Aceleración de la expansión



## Nucleosíntesis de elementos livianos

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



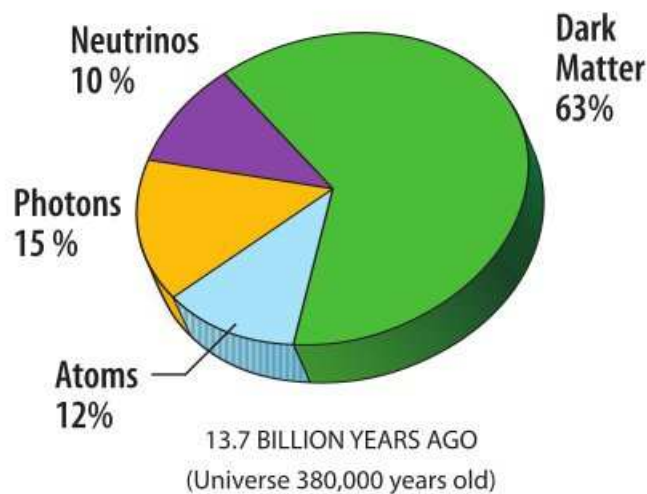
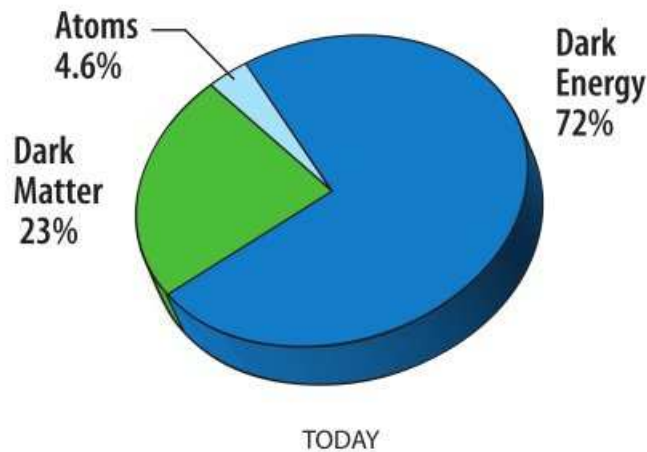
en pequeñas cantidades de otros elementos ligeros, en particular deuterio y litio. Esta mezcla constituyó la materia prima a partir de la cual se formaron las primeras estrellas.

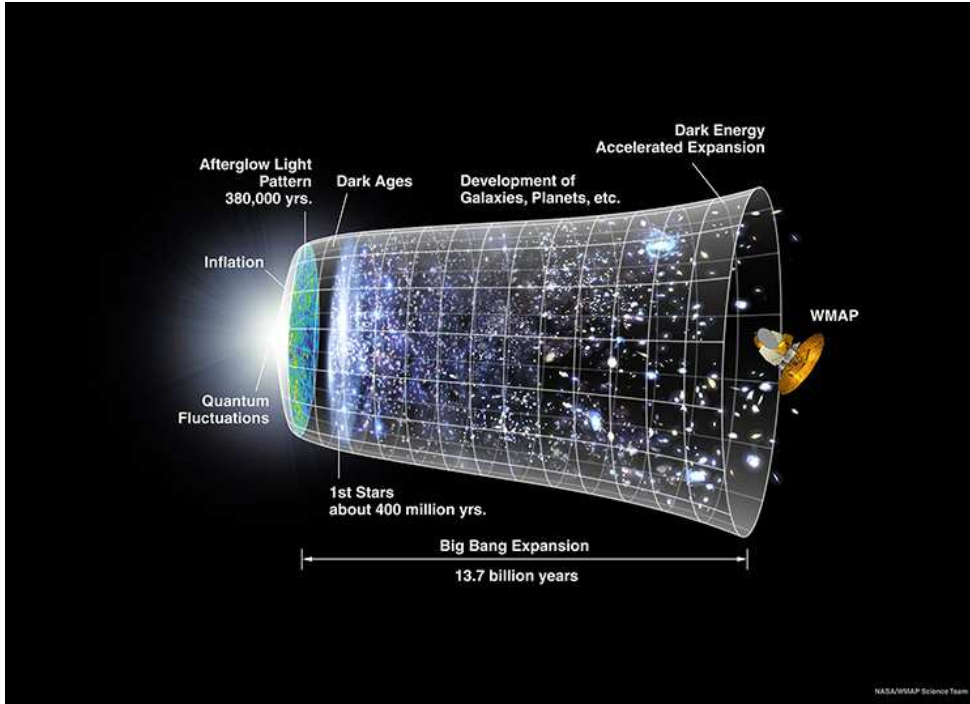
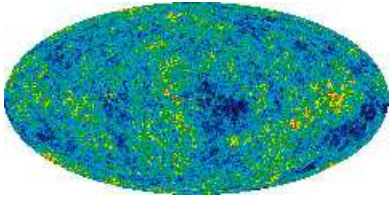
300,000 años después los fotones (radiación) ya no tienen suficiente energía para ionizar los átomos. Los electrones libres desaparecen, formando átomos eléctricamente neutros. Dado que los electrones son las principales partículas que desvían la luz, a partir de este momento el universo se volvió transparente.

## Fondo de Radiación Cósmica

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 390 km./s hacia Leo
- Vía Láctea se mueve hacia Centauros con 600 km./s.
- 1999, observaciones con BOOMERANG
- WMAP





## Inflación Cósmica

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