

CTE II - Origen del Universo II

Big Bang. Fondo Cósmico de Microondas

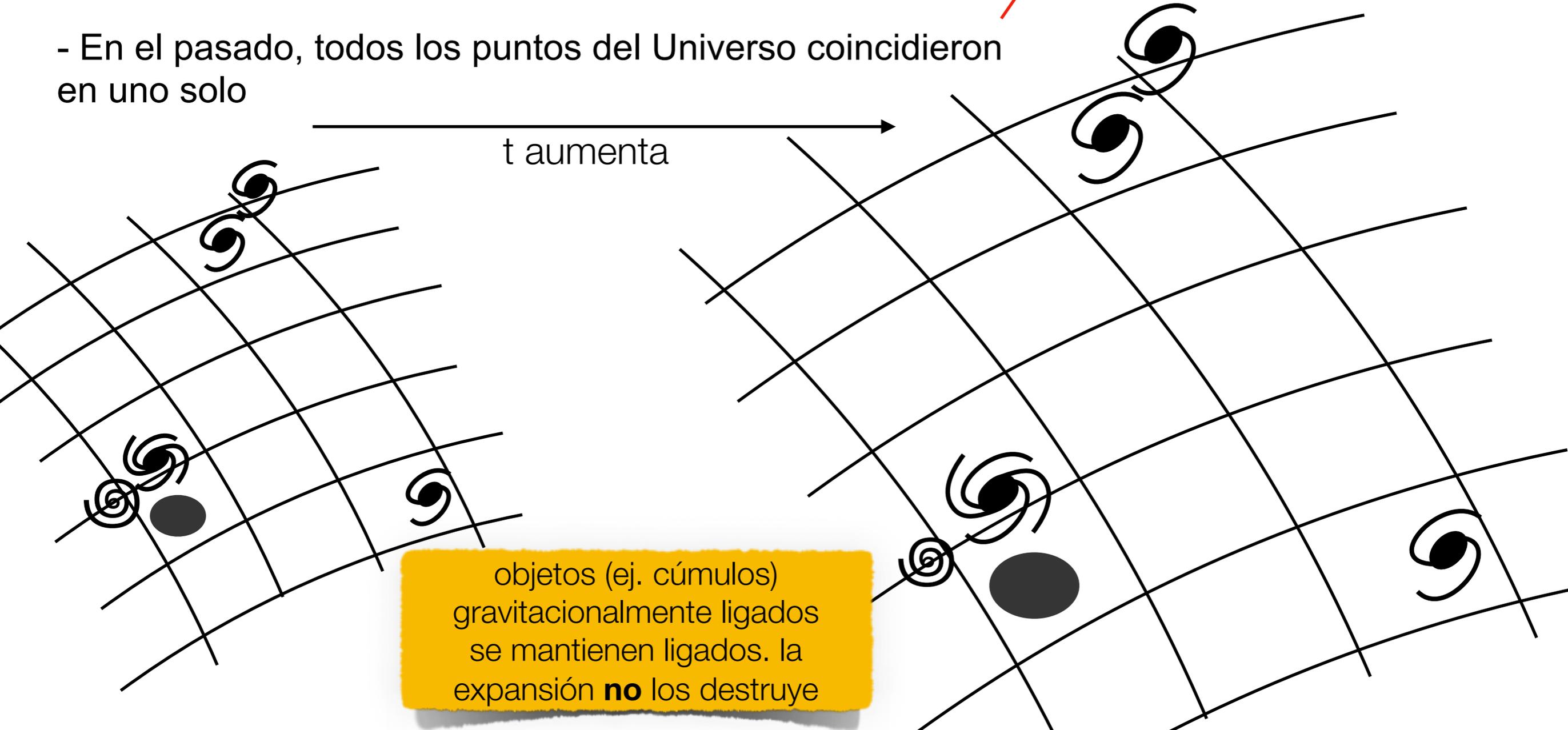
Cecilia Mateu

Instituto de Física, Facultad de Ciencias
Universidad de la República

COSMOLOGÍA: CONSECUENCIAS DE LA LEY DE HUBBLE

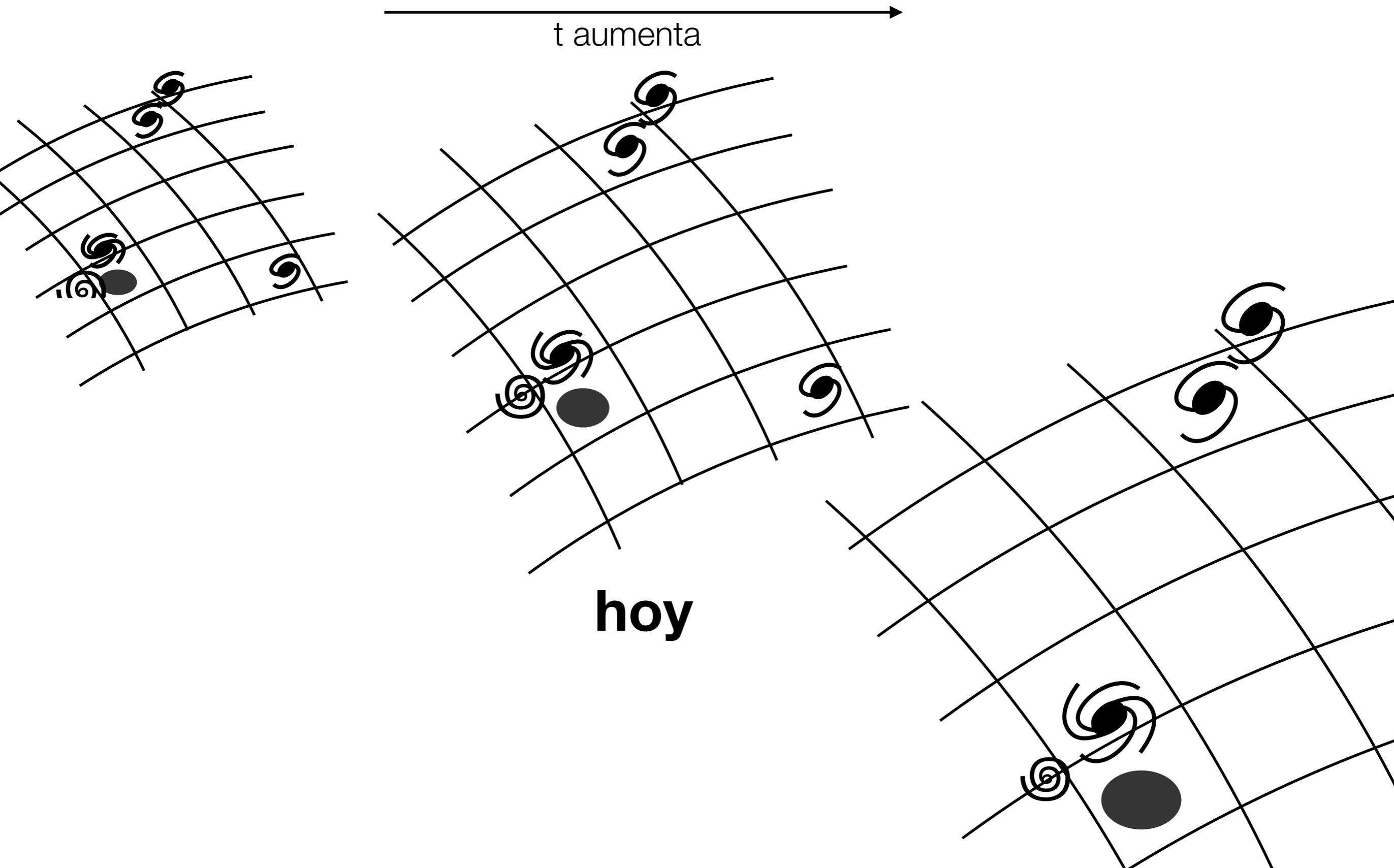
- En cada punto del espacio se ve la misma expansión
- Todos los puntos se alejan entre sí por igual, **NO hay un centro de la expansión**. Cada punto pareciera ser el centro de ésta
- En el pasado, todos los puntos del Universo coincidieron en uno solo

TEORÍA DEL BIG BANG



objetos (ej. cúmulos)
gravitacionalmente ligados
se mantienen ligados. la
expansión **no** los destruye

COSMOLOGÍA: CONSECUENCIAS DE LA LEY DE HUBBLE



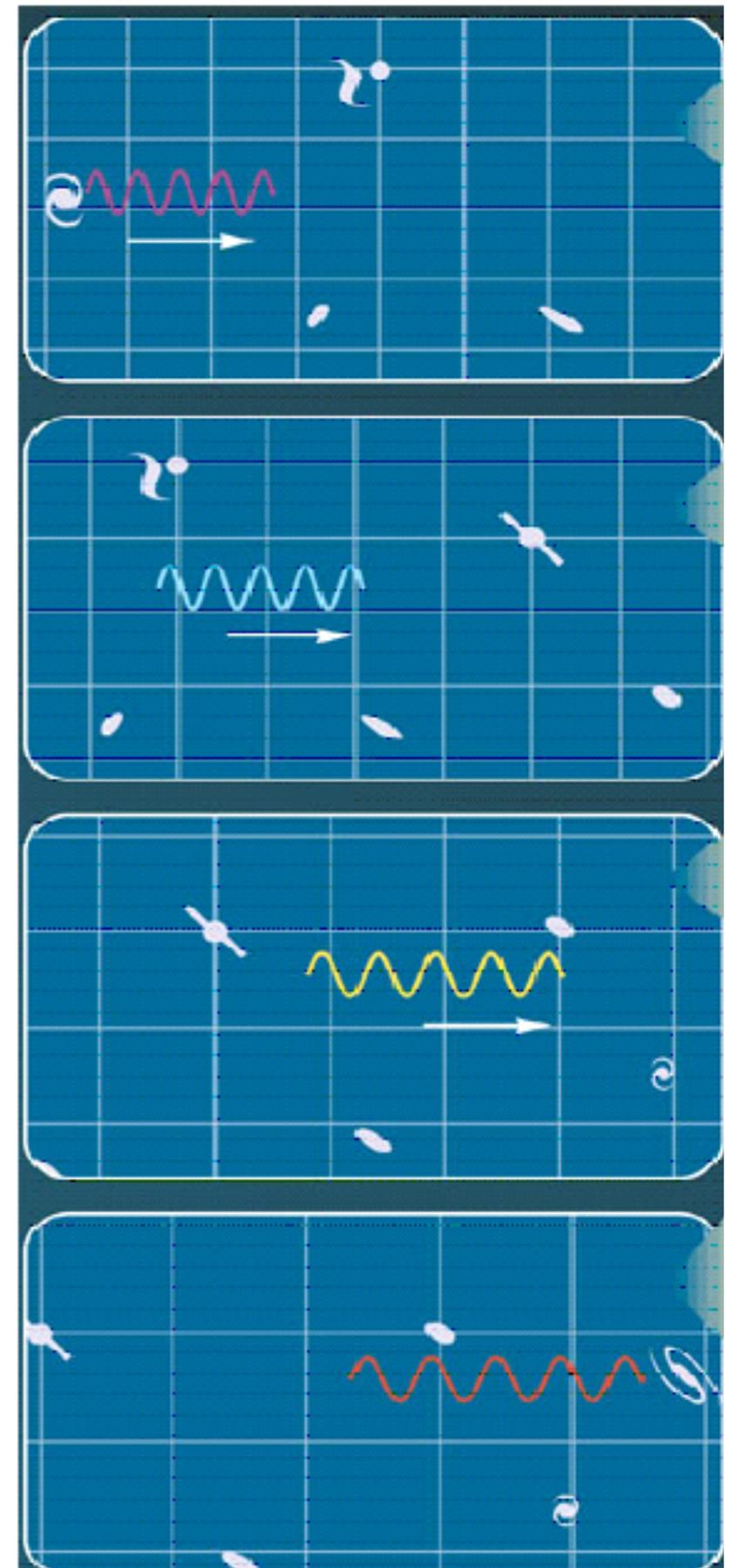
COSMOLOGÍA: CORRIMIENTO AL ROJO

Volviendo al ejemplo anterior, lo que cambia es el espacio entre las galaxias/cúmulos de galaxias debido a la expansión

De manera que una consecuencia de la expansión del Universo, es el **Corrimiento Cosmológico al Rojo**.

La longitud de onda λ de la luz emitida por un objeto en un instante t , va aumentando conforme el tiempo pasa pues el espacio se va expandiendo. Así que se define el corrimiento al rojo z como

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{(\lambda_{obs} - \lambda_{em})}{\lambda_{em}}$$



CONSECUENCIAS DE LA LEY DE HUBBLE

- Suponiendo que la expansión ha ocurrido a una velocidad constante, podemos calcular la edad del Universo, esto es el tiempo transcurrido desde el Big Bang, utilizando la Ley de Hubble
- Si V ha sido constante, el tiempo transcurrido en expandirse una distancia d a esta velocidad es $d = Vt$
- Y la Ley de Hubble establece que $V = H_0 d$
- Sustituyendo d de la 1ra ecuación en la Ley de Hubble, tenemos

- Por lo tanto, el inverso de la constante de Hubble nos da la edad del Universo (en 1era aprox.)

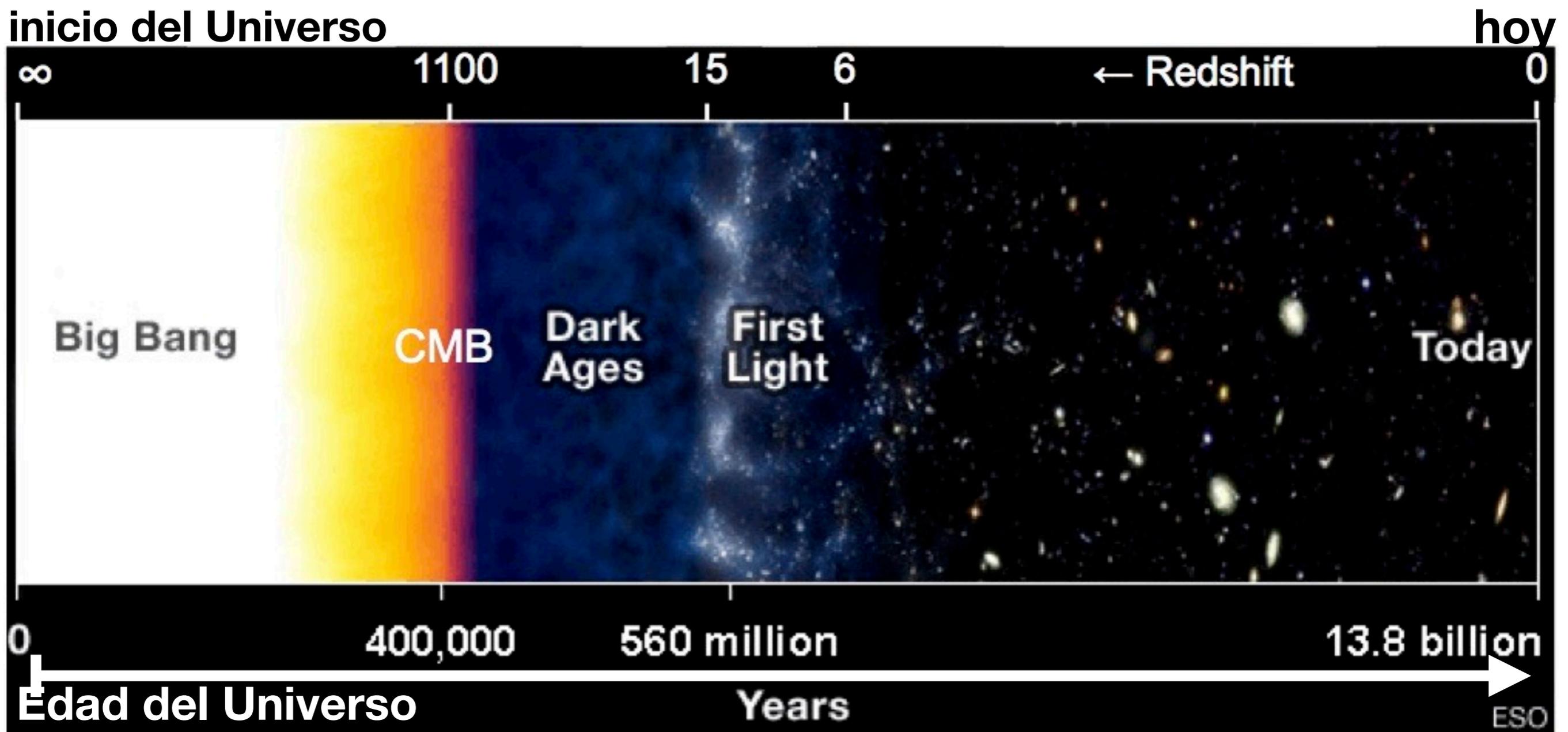
$$V = H_0 Vt \rightarrow t = \frac{1}{H_0}$$

Sustituyendo el valor actual de $H_0=70$ km/sMpc obtenemos que el Universo tiene una edad **t=13.9 Gaños**. El cálculo *sin* la suposición de V cte, da **t=13.7 Gaños**

La edad de los objetos más viejos, inferida mediante nucleo-cosmo-cronología es de **t=13.6 Gaños**, en muy buen acuerdo.

COSMOLOGÍA: CORRIMIENTO AL ROJO

- Ver a un alto z equivale a ver a grandes distancias (por la ley Hubble)
- ver un objeto a mayor distancia implica estar viéndolo más atrás en el pasado, ya que la velocidad de luz es finita y constante
- Así, mayor redshift z de un objeto \Rightarrow lo vemos como era hace más tiempo



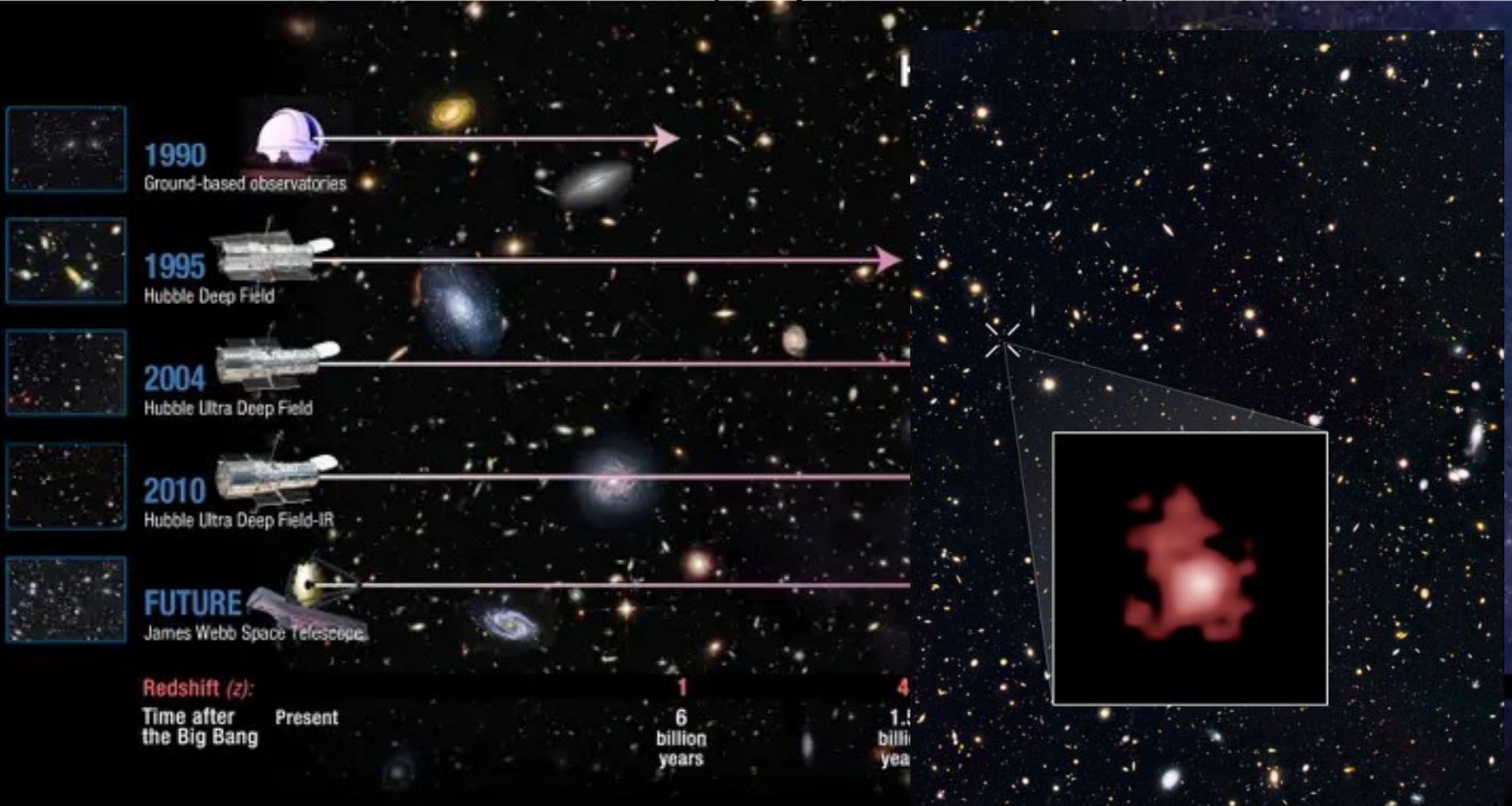
COSMOLOGÍA: CORRIMIENTO AL ROJO

Objs. cercanos $z \sim 0$ ($\Leftrightarrow z \sim 0.001$);

Lejanos $z \sim 0.1$

Campo profundo del HST $z \sim 0.5 - 3$

Galaxia más distante observada $z \sim 11.1$ (campo GOODs de HST)



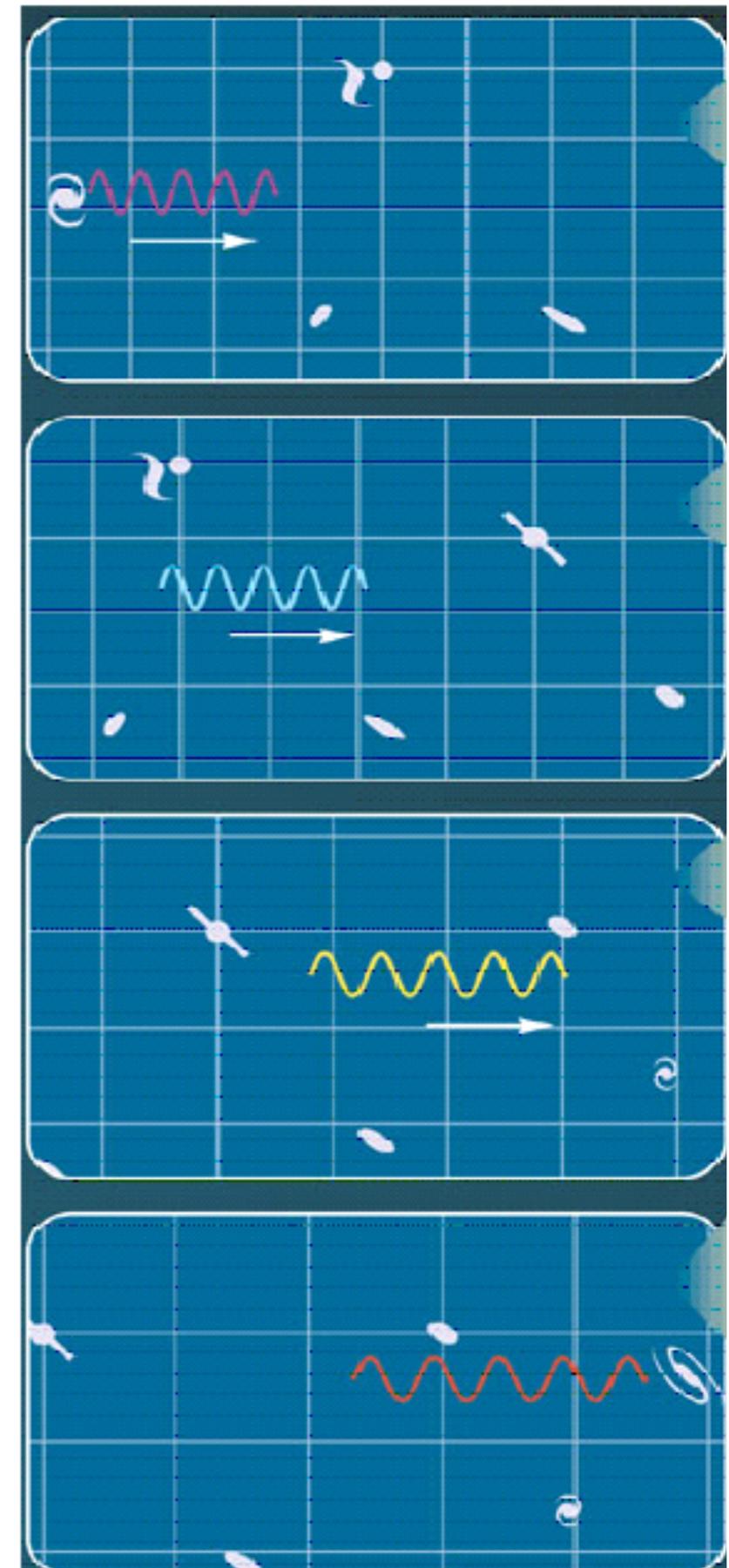
COSMOLOGÍA: CORRIMIENTO AL ROJO

Dada la definición de z , podemos calcular el cambio s en el tamaño del Universo como

$$s = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}} = 1 + z$$

De manera que cuando z era igual a 7, el Universo era 8 veces más pequeño

¿Cuánto más denso era el Universo en $z=4$?



COSMOLOGÍA: CORRIMIENTO AL ROJO

Dada la definición de z , podemos calcular el cambio s en el tamaño del Universo como

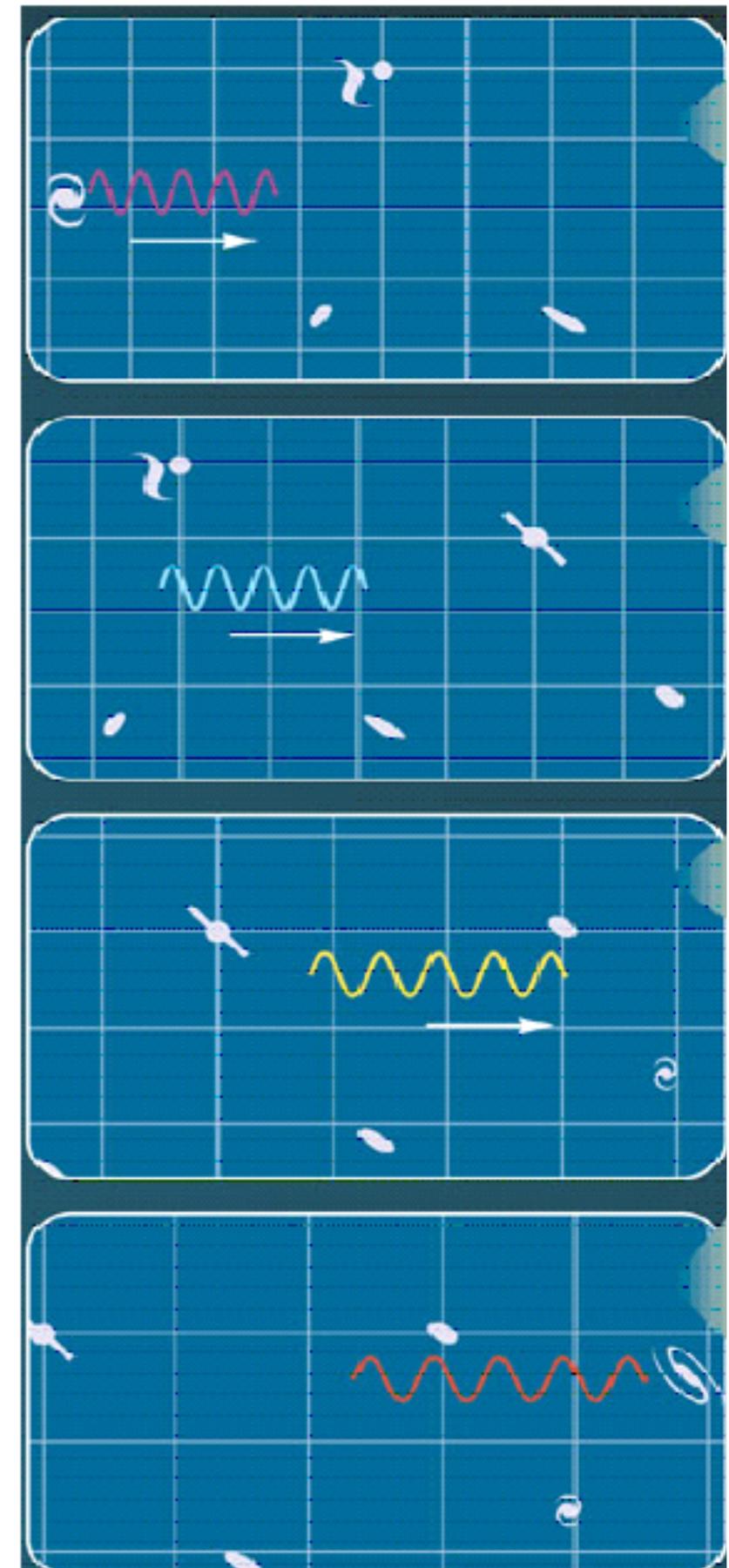
$$s = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}} = 1 + z$$

De manera que cuando z era igual a 7, el Universo era 8 veces más pequeño que en $z=0$

¿Cuánto más denso era el Universo en $z=4$?

$s=1+z=5$ por lo tanto el Universo era 5 veces más pequeño en $z=4$ (que en $z=0$)

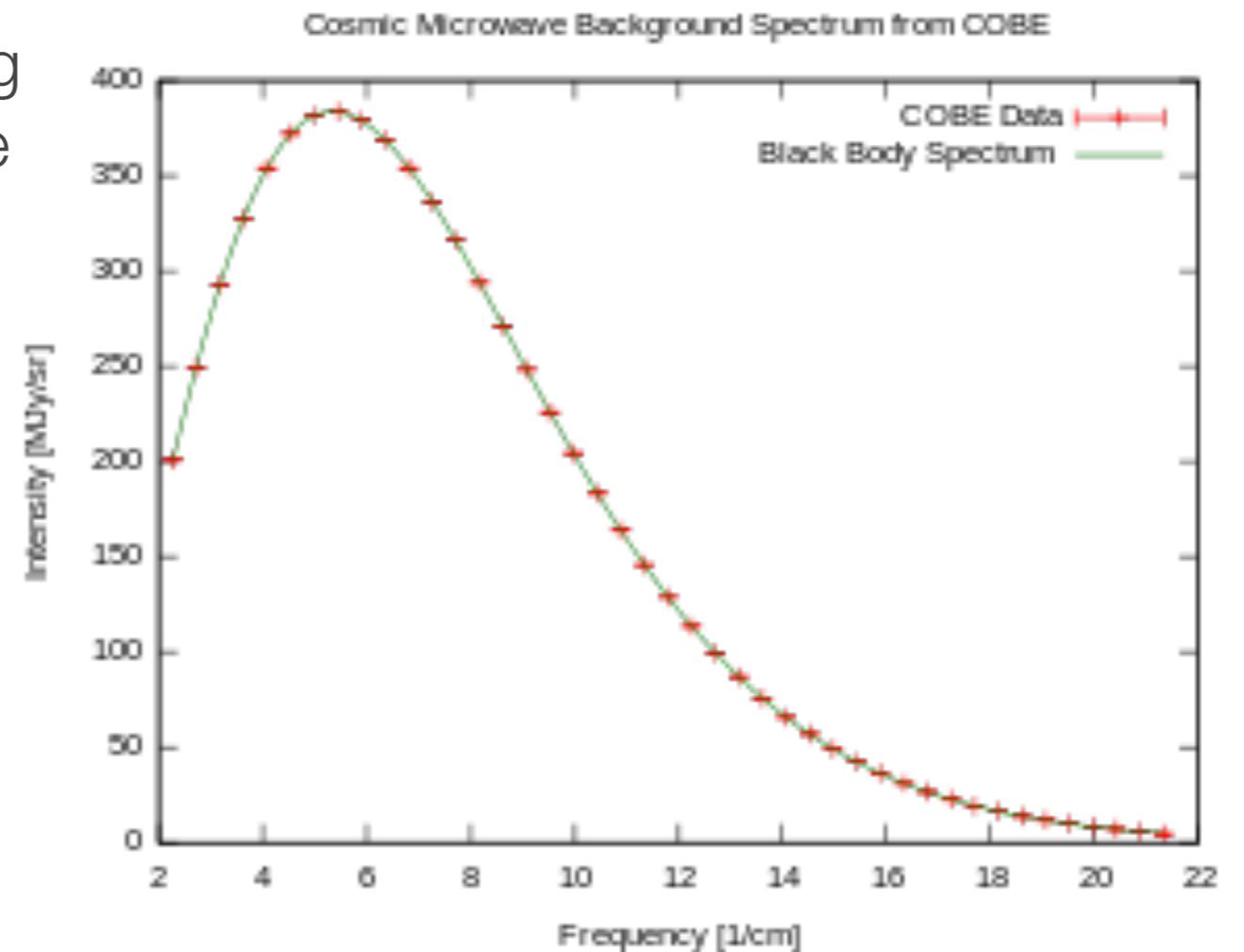
Como $\rho \propto r^3$ tenemos que el Universo era $5^3 = 125$ veces más denso



El Big Bang

FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS

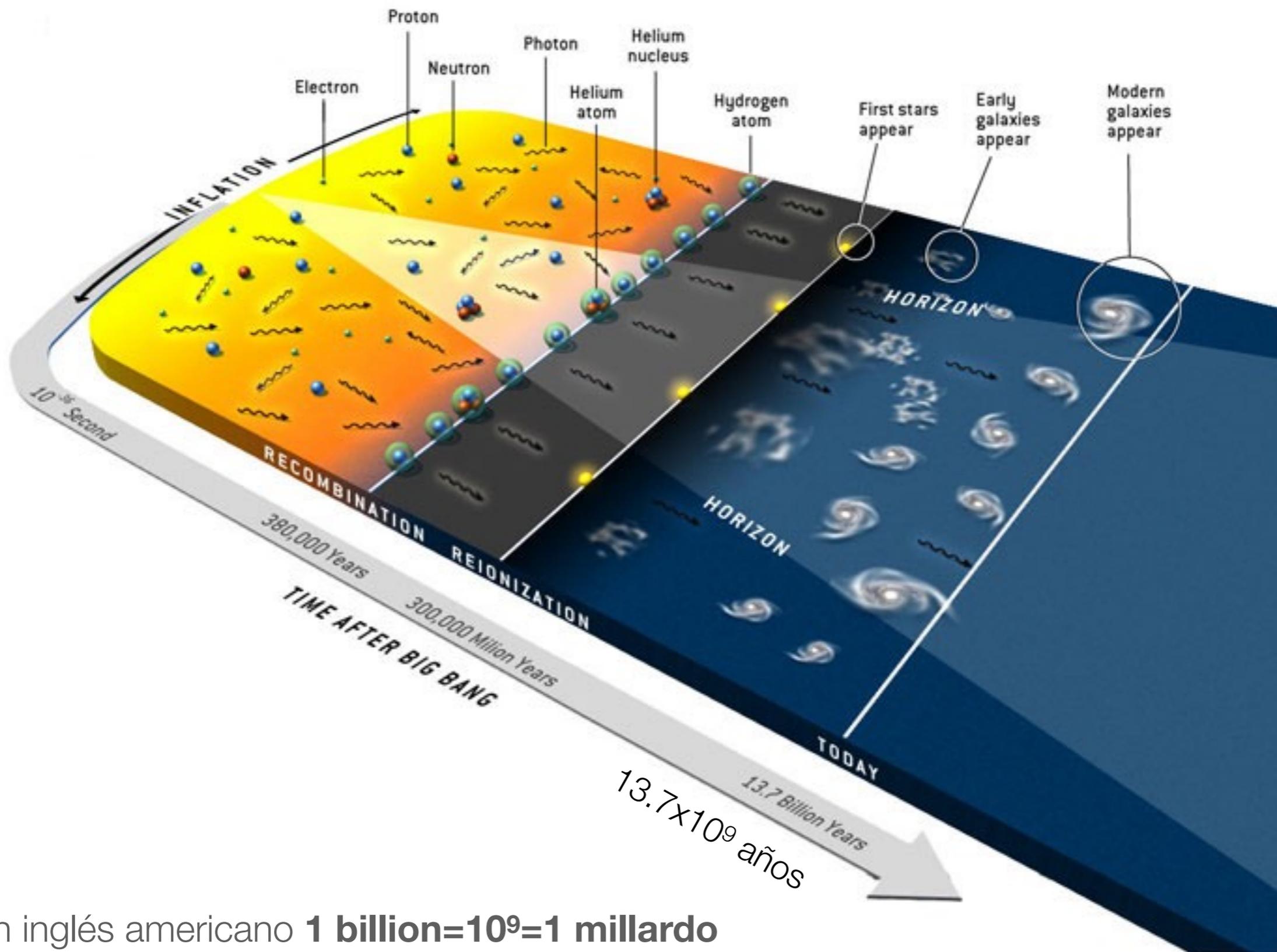
- Una predicción de la Teoría del Big Bang es la existencia de un fondo cósmico de radiación, proveniente de la época en la que el Universo se volvió transparente a la radiación (llamada recombinación o superficie de última dispersión)
- En ese momento la temperatura del fondo isotrópico de radiación había bajado justo por debajo de lo necesario para la ionización del hidrógeno.
- Debido al redshift cosmológico esta radiación se sigue enrojeciendo y dada la edad del Universo (por la cte H_0), se calculó que tal radiación debía tener una temperatura $T \sim 3$ K.
- Esto es lo que hoy llamamos el FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS (CMB, en inglés)



El CMB tiene un espectro de cuerpo negro con una temperatura actual es de 2.7 K, en acuerdo con la predicción teórica.

Fue descubierto accidentalmente en 1963 por Penzias y Wilson

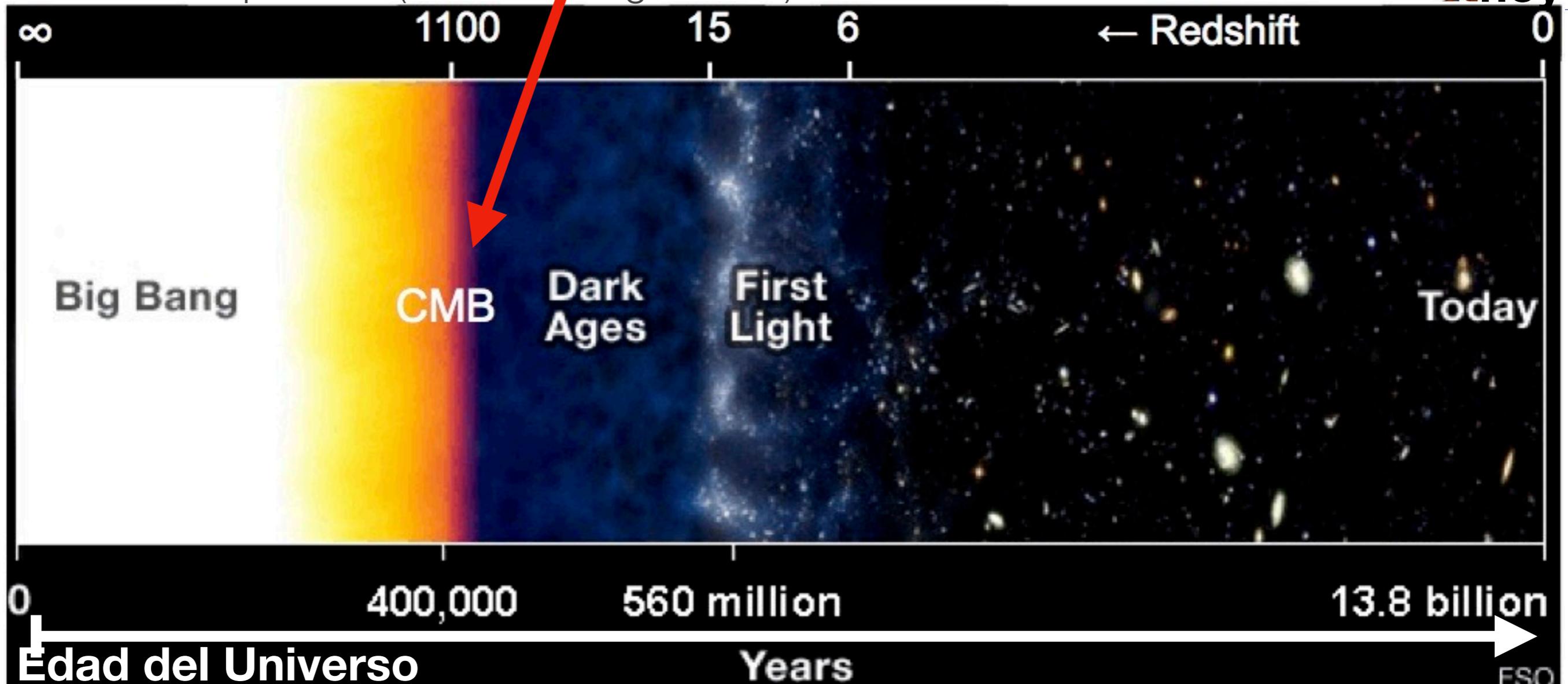
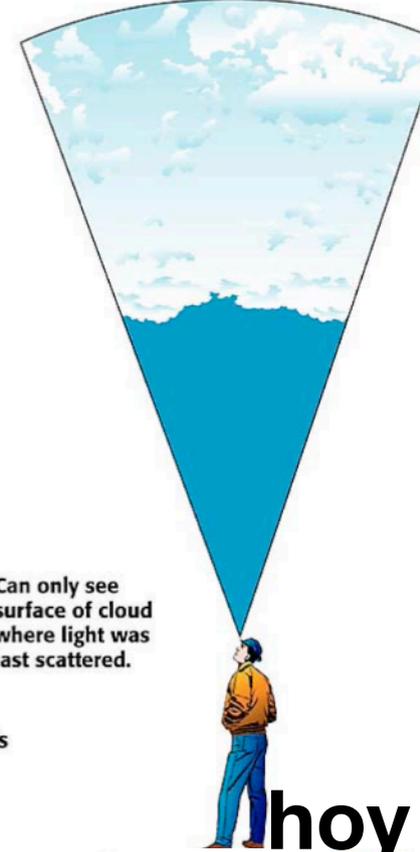
Del Big Bang a $z=0$



Ojo: en inglés americano **1 billion**= 10^9 =**1 millardo**
en español 1 billón/billion= 10^{12})

Fondo Cósmico de Microondas (CMB)

- la radiación del CMB que vemos hoy proviene del momento en que la radiación se desacopló de la materia = cuando ya no tenía suficiente energía para ionizar el H (se conoce como Recombinación)
- en ese momento el Universo se volvió “transparente” a esta radiación dejándola pasar sin absorberla -> se conoce como “superficie de última dispersión” (last scattering surface)



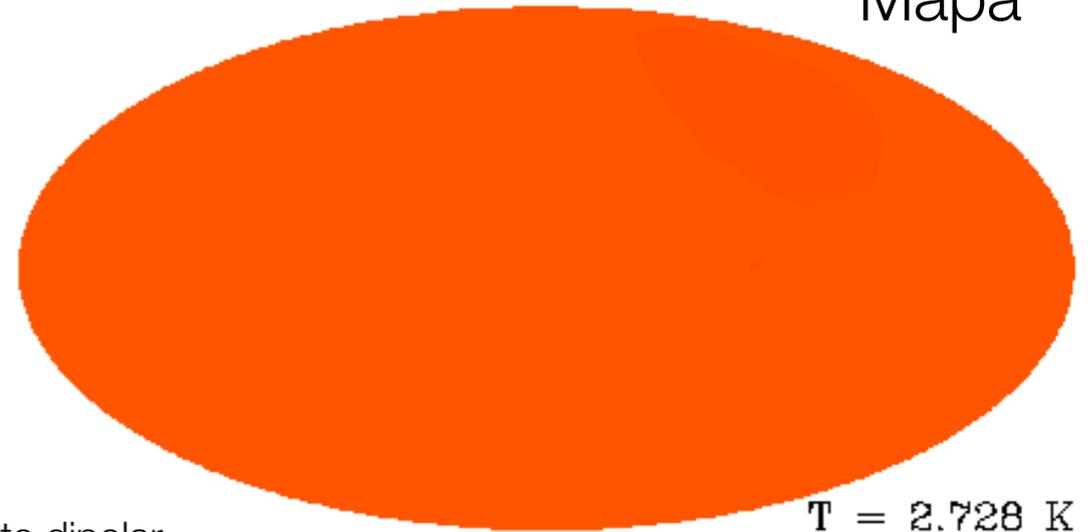
EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS

El Fondo Cósmico de Microondas (CMB) es sorprendentemente uniforme espacialmente

Se han estudiado con gran detalle sus **fluctuaciones**, observando el espectro del CMB en diferentes direcciones en el cielo y midiendo la temperatura en cada una

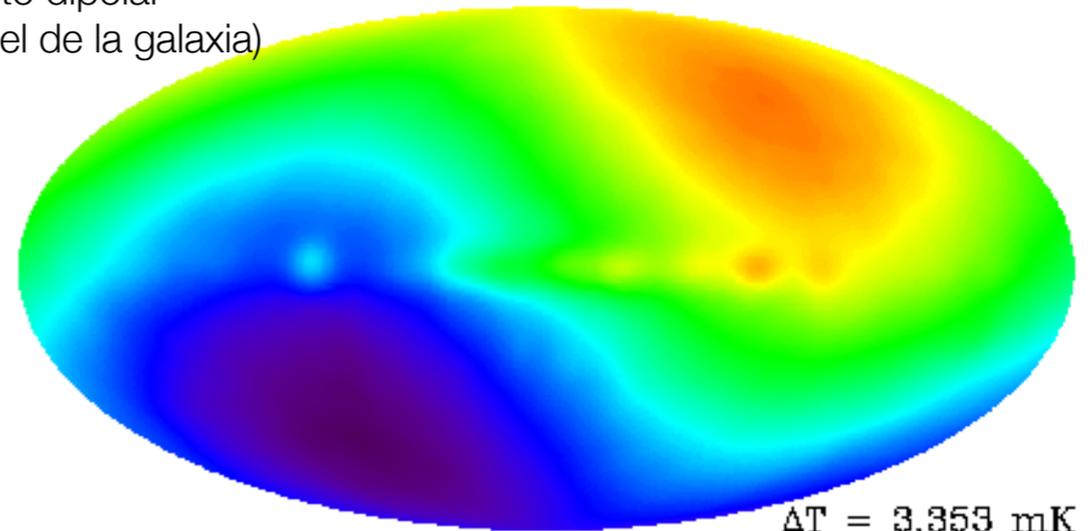
Las fluctuaciones son del orden o menores a los micro-Kelvin !!!

Mapa



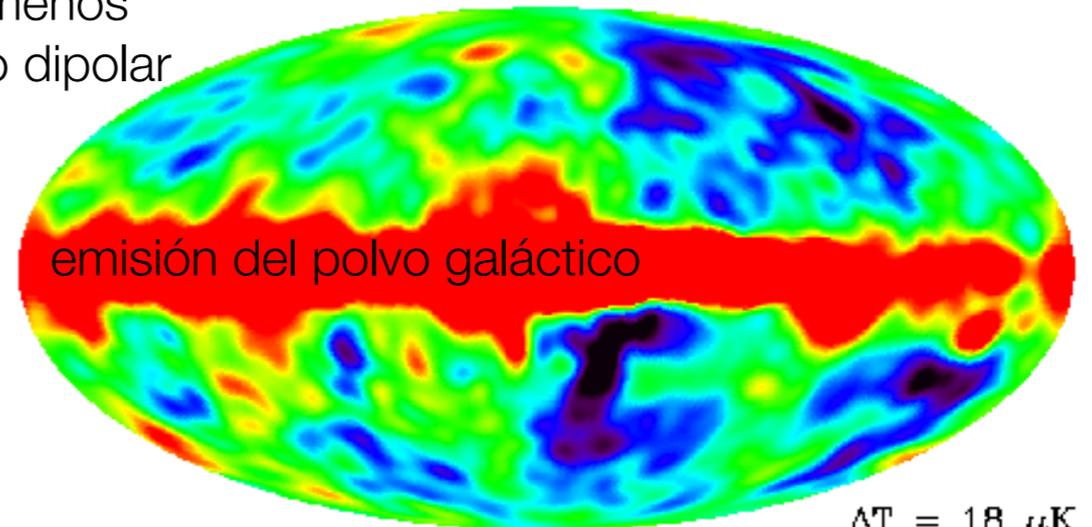
$T = 2.728 \text{ K}$

momento dipolar
(debido a la vel de la galaxia)



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

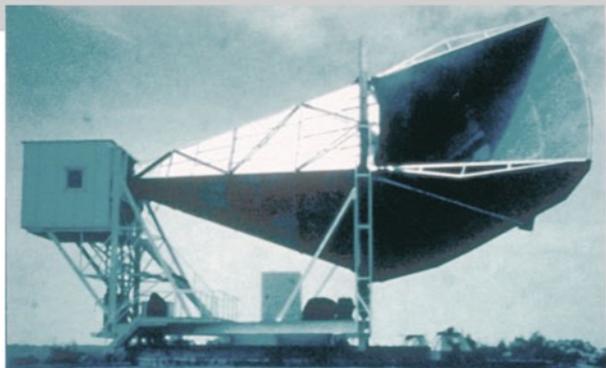
mapa menos
momento dipolar



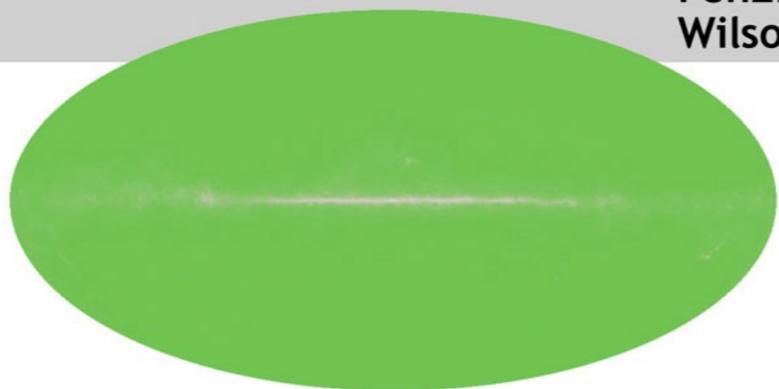
$\Delta T = 18 \text{ } \mu\text{K}$

Mapa del CMB del satélite COBE
(años 90)

1965

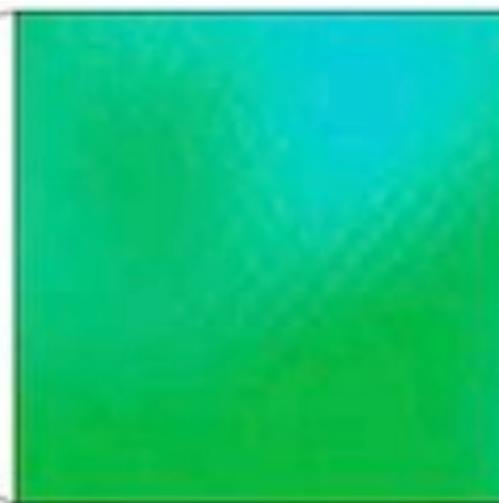
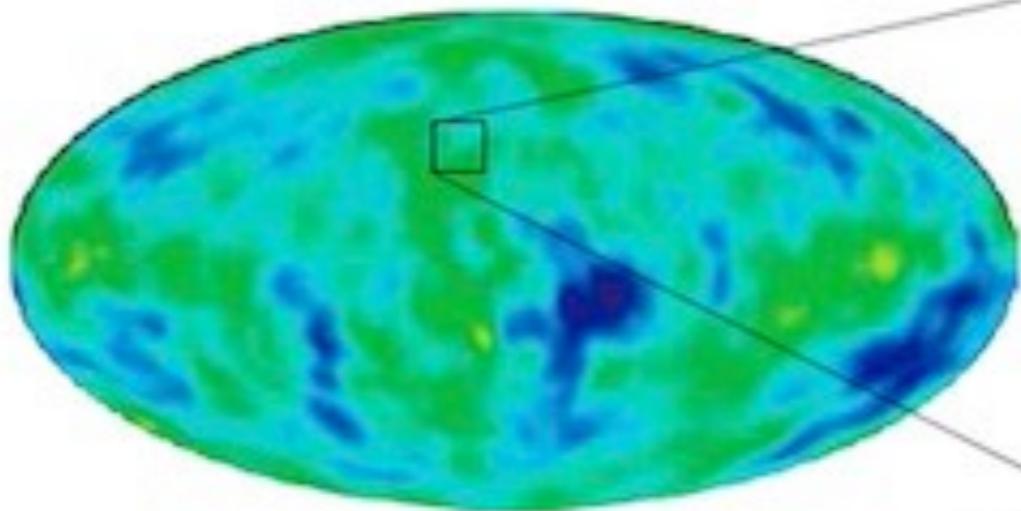


Penzias and Wilson



1992

COBE

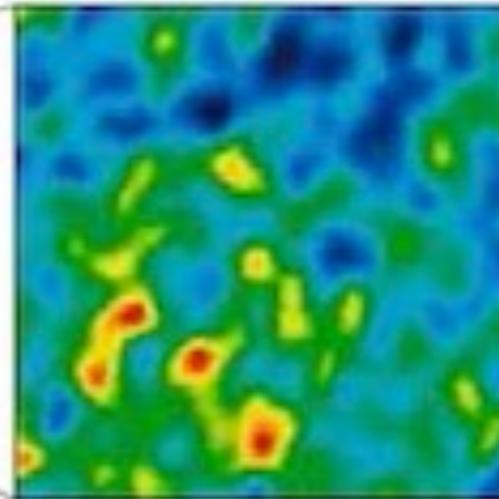
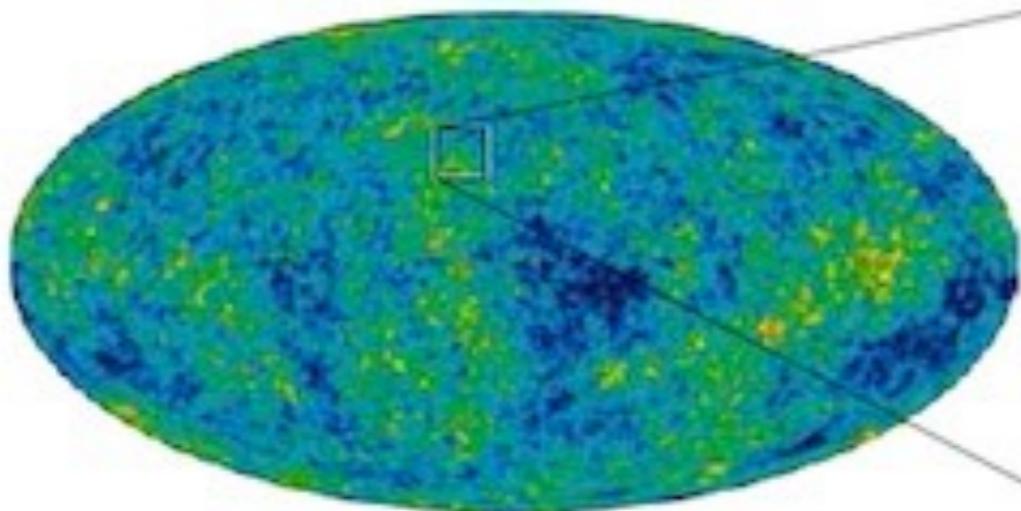
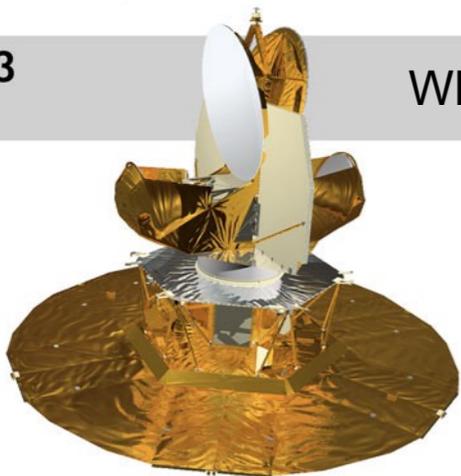


COBE: 1990 map
Resolution: 7°

NASA/WMAP SCIENCE TEAM

2003

WMAP

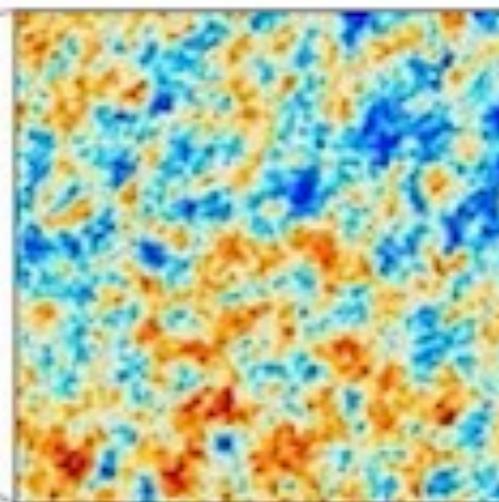
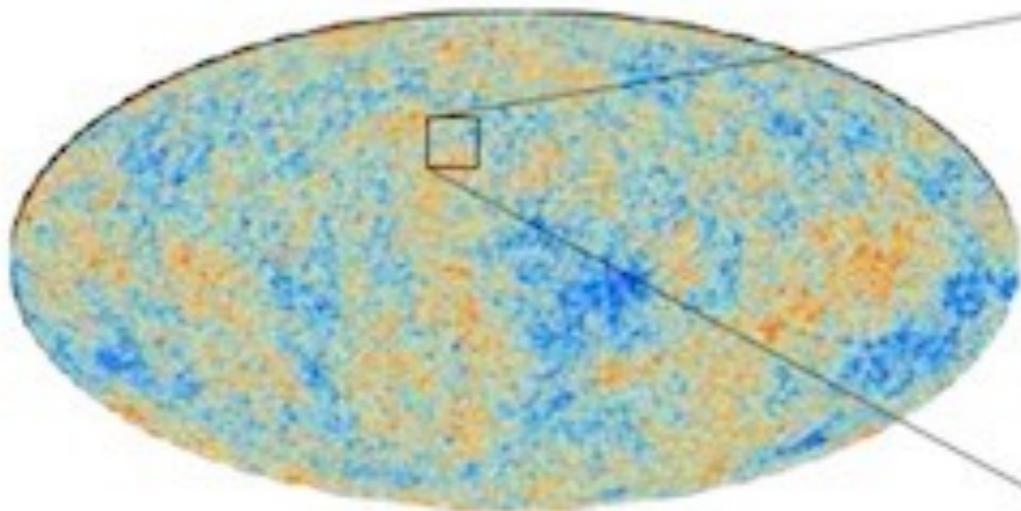
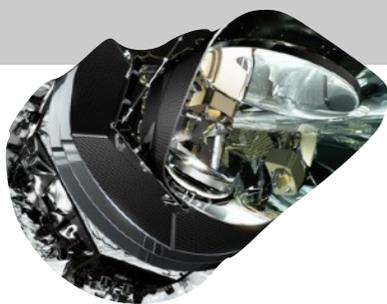


WMAP: 2013 map
Resolution: 0.5°
(5 times more sensitive than COBE)

NASA/WMAP SCIENCE TEAM

2013

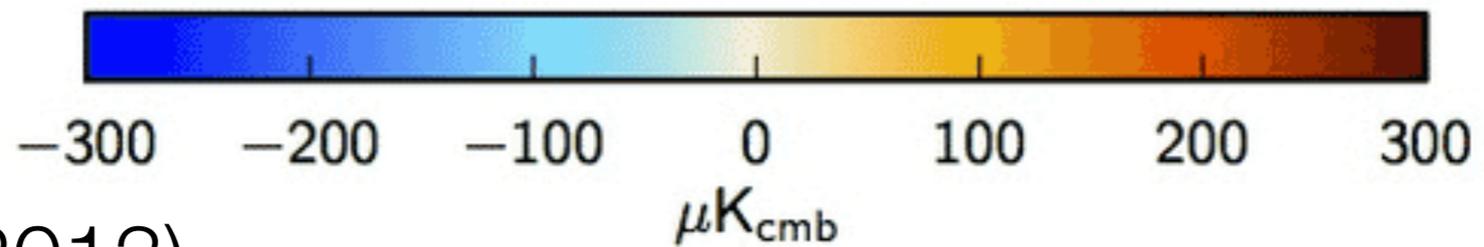
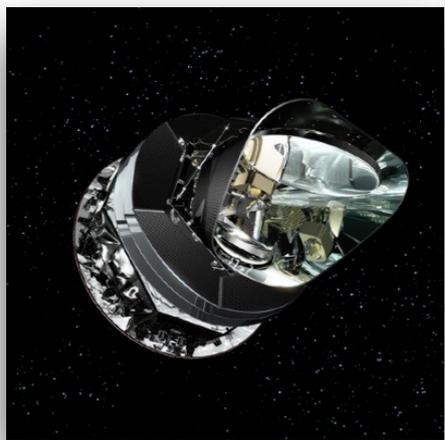
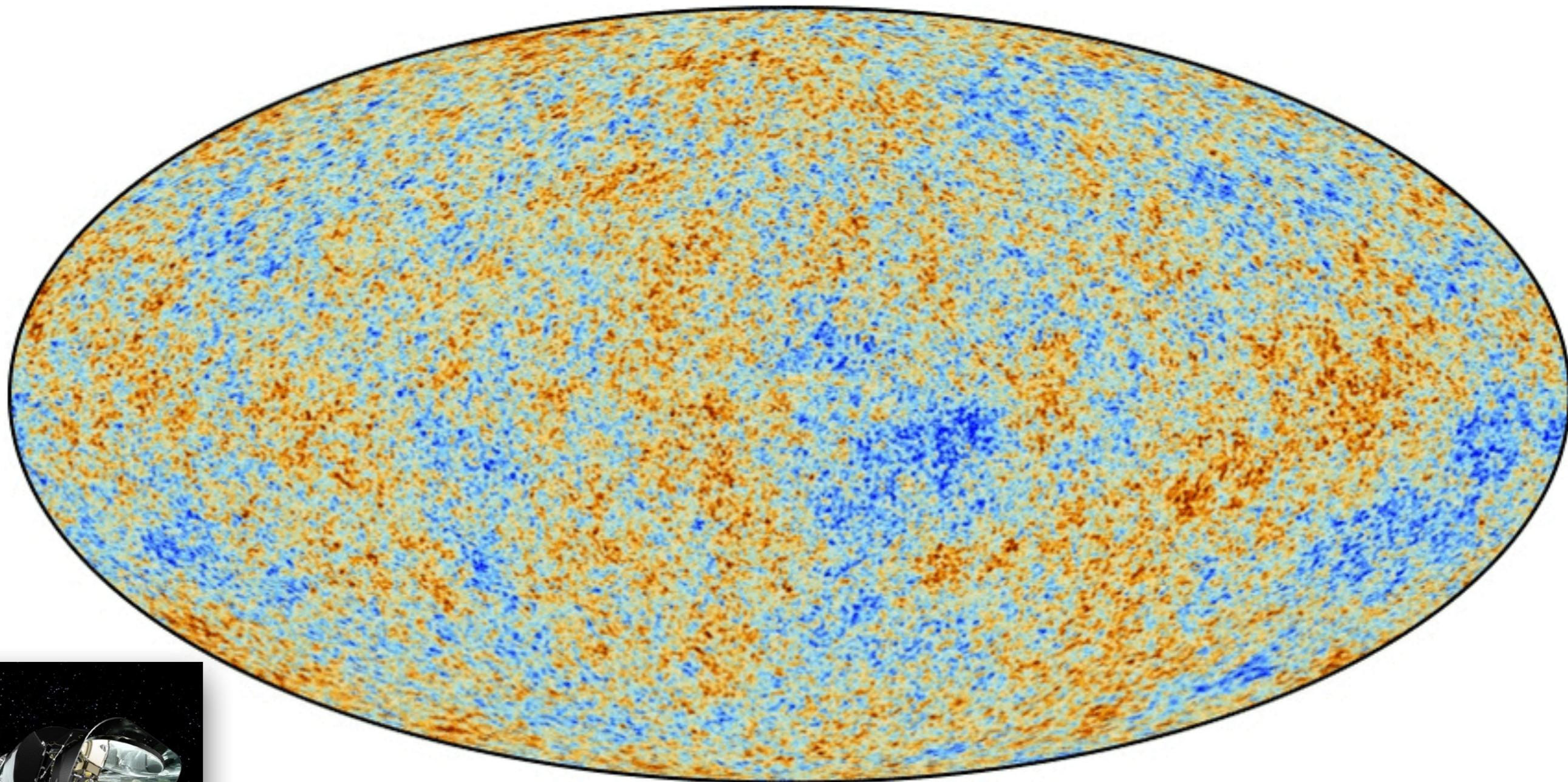
Planck



Planck: 2013 map
Resolution: 0.16°
(15 times more sensitive than COBE)

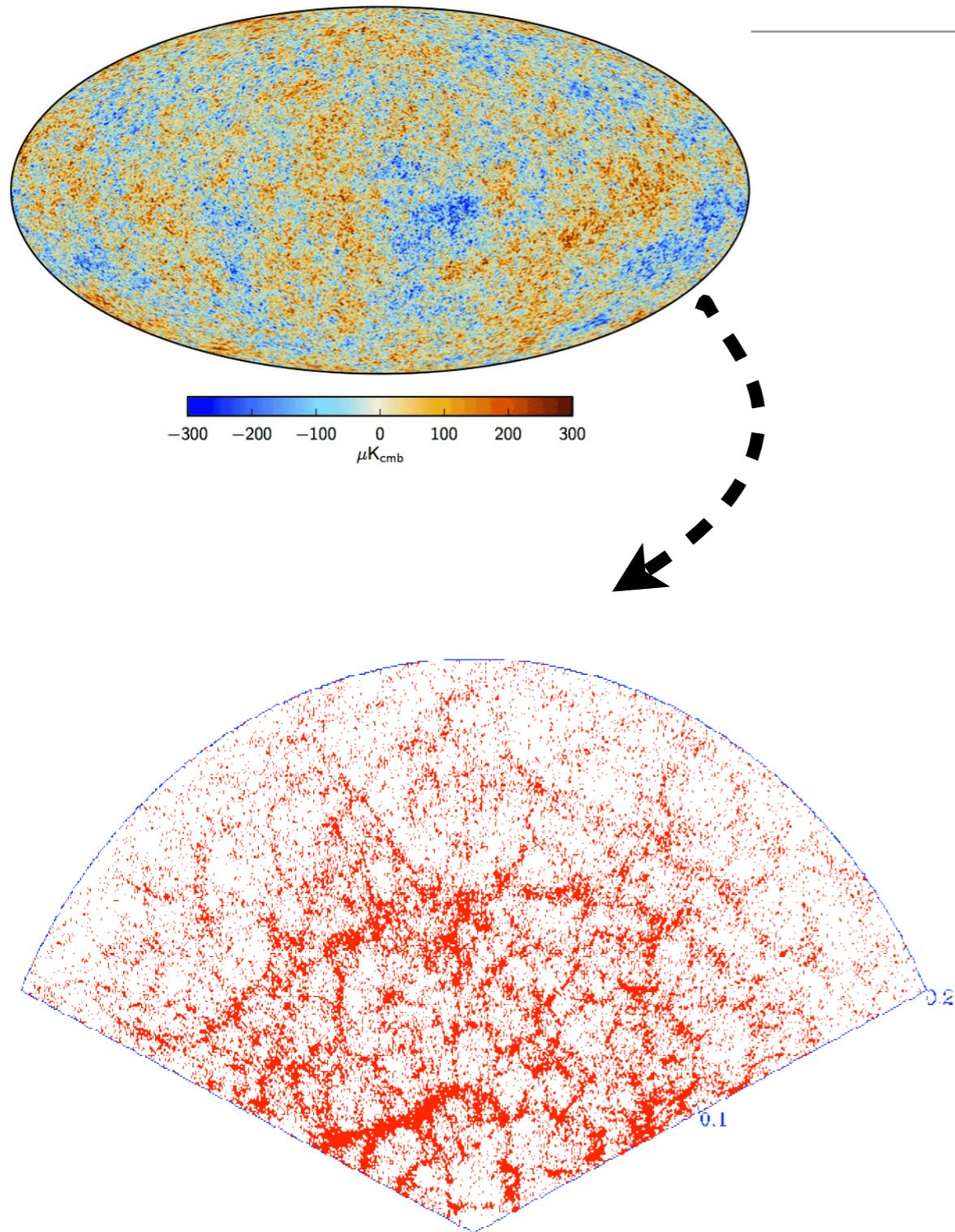
PLANCK COLLABORATION

Fluctuaciones de la Temperatura del CMB



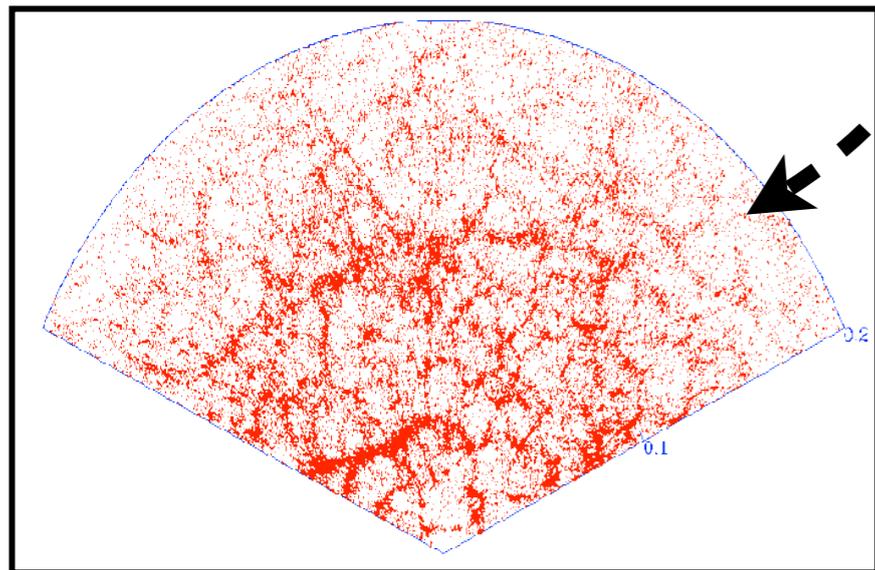
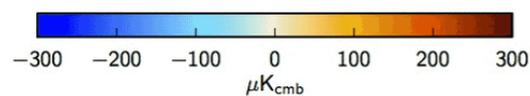
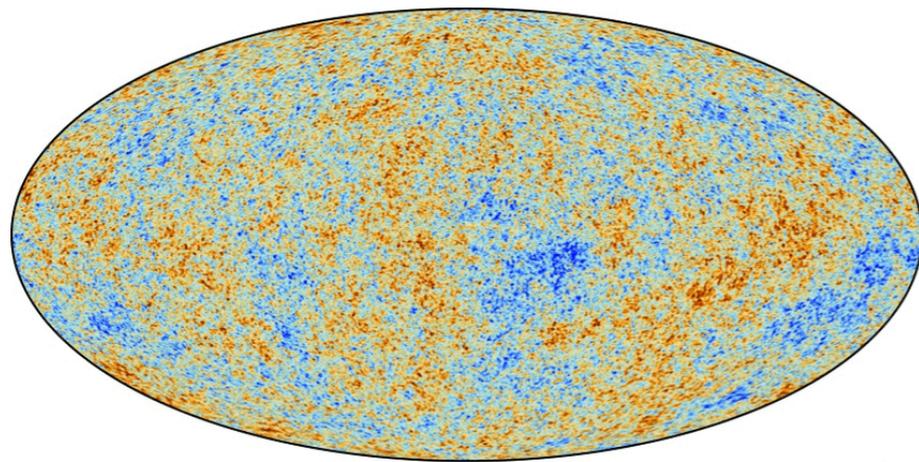
Satélite Planck (2013)

Conexión entre fluctuaciones del CMB y la Estructura a Gran Escala (LSS)

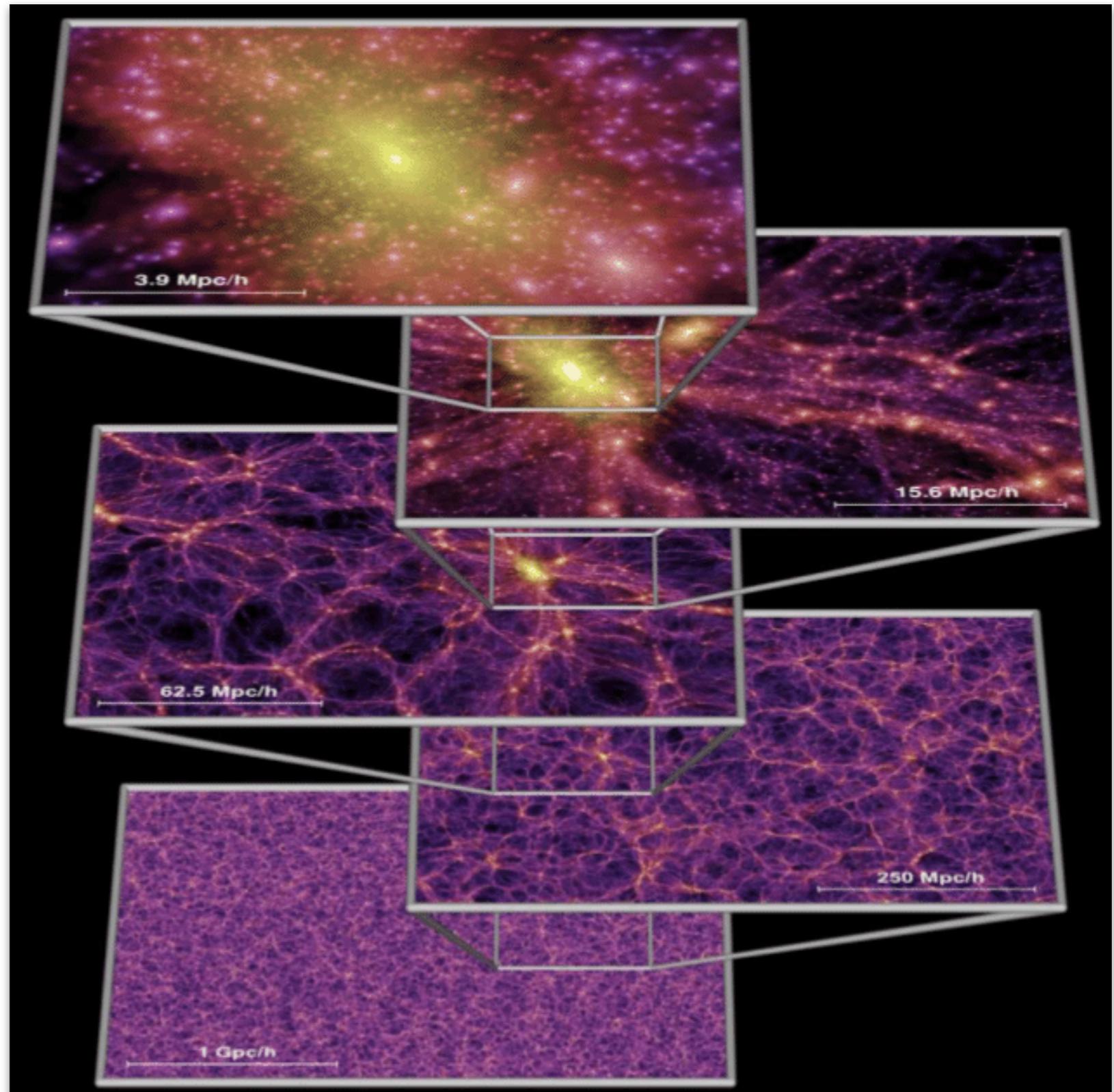


- Se cree que las fluctuaciones del Fondo Cósmico de Microondas (CMB) son las “semillas” de la Estructura a Gran Escala
- Las zonas más frías del CMB corresponden a “pozos de potencial”, i.e. zonas de mayor densidad de materia
- La materia se acumula más fácilmente en estas zonas de mayor densidad simplemente por acción de la gravedad, dando origen a la Estructura a Gran Escala que vemos
- Esto se estudia hoy en día por medio de Simulaciones Cosmológicas computacionales: ej. Simulación Millenium (~2005), Illustris y muchas más

Conexión entre fluctuaciones del CMB y la LSS



Éstas simulan un volumen de Universo para ver cómo se forma la LSS. También pueden hacer “zooms” y enfocarse en simular halos individuales, como por ej la Vía Láctea (EAGLE, Via Lactea, LATTE-FIRE, ...)



Millenium Simulation (Springel et al. 2005)

Modelos Cosmológicos

- Se necesita un modelo cosmológico que explique la evolución del Universo como un todo
- ¿Cómo ha sido la expansión en el tiempo?
 - ¿ha sido constante o ha variado? si ha variado, ¿se ha acelerado o frenado? ¿a qué tasa?
- El modelo debe estar basado en las observaciones y ser capaz de explicarlas

Evolución del Universo

Propiedades globales del Universo

Para plantear un modelo cosmológico, vamos a partir de los siguientes principios fundamentales

- Universalidad de las Leyes Físicas

Las leyes físicas se cumplen por igual en todo lugar e instante de tiempo.

- Isotropía

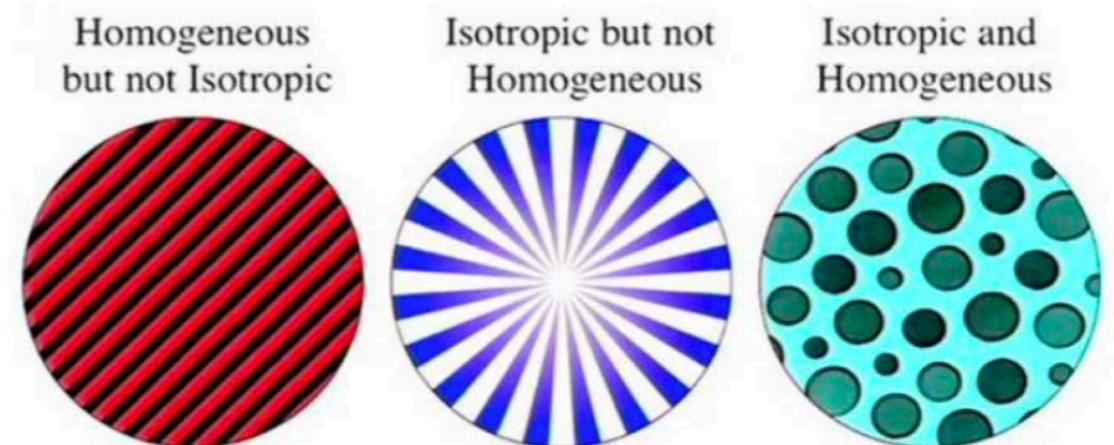
Estadísticamente, el Universo luce igual en todas direcciones

- Homogeneidad

Estadísticamente, el Universo luce igual en todos los puntos

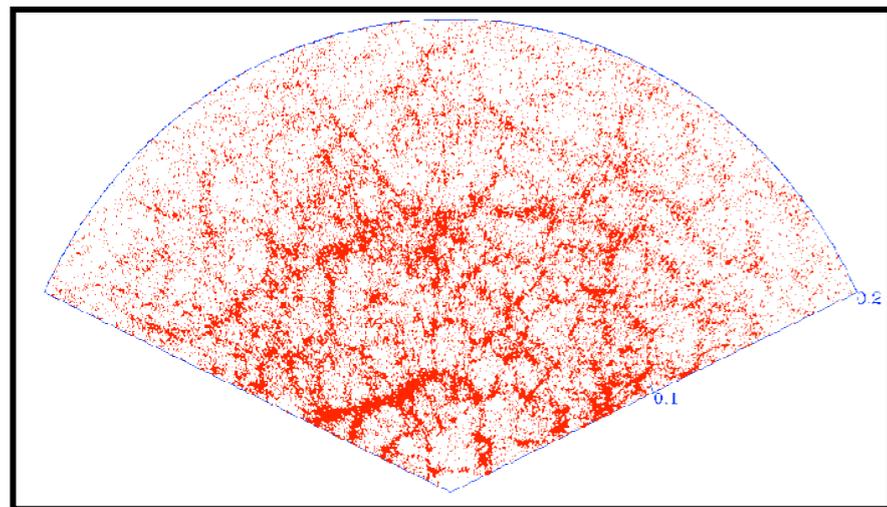
Noten que si exigiéramos que el Universo se viera igual en todos los instantes de tiempo, esto implicaría que el Universo no evoluciona (Teoría del Estado Estable [Steady State] de F. Hoyle)

El Principio Cosmológico: en promedio (i.e. salvo irregularidades locales), el Universo luce igual visto desde cualquier punto

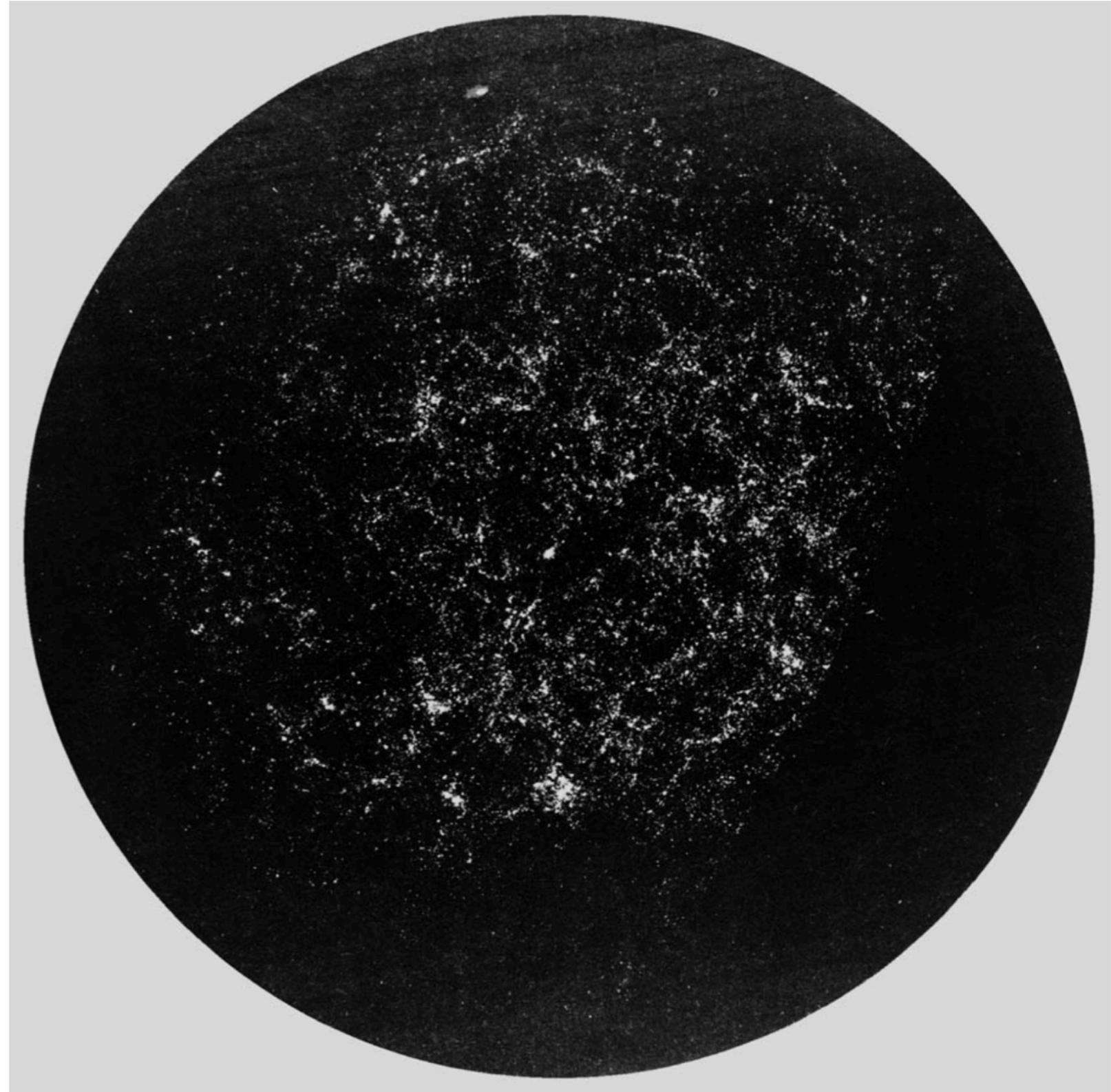


Los principios de Isotropía y Homogeneidad han sido apoyados por los extensos sondeos de galaxias hechos desde comienzos de los 80s (2dFGRS, SDSS, Manga, BOSS)

=> el Universo no tiene un "borde"

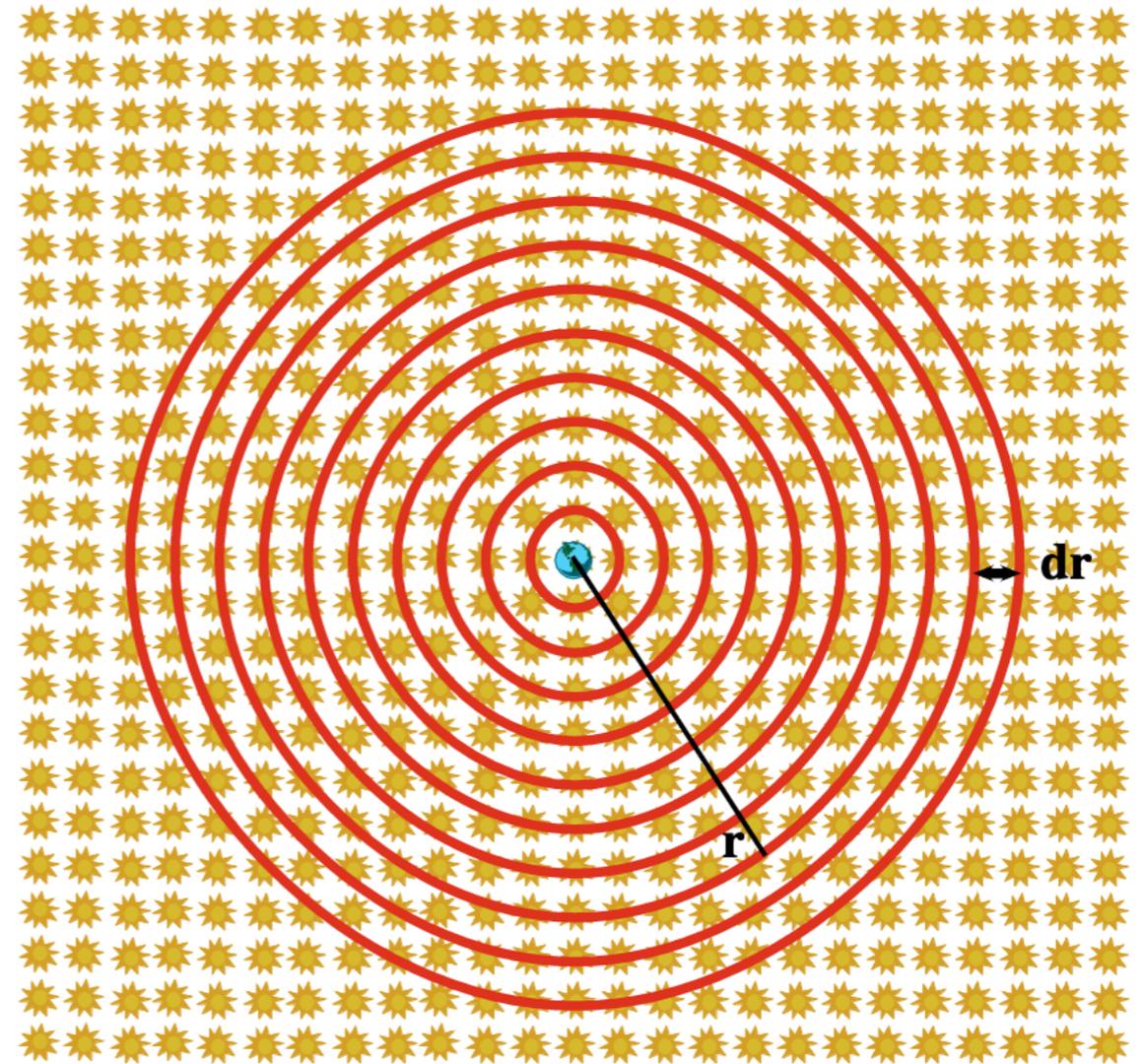


sondeo 2dF Galaxy Redshift Survey (CfA)



Paradoja de Olbers

- Notado por Kepler (XVI) y otros: ¿por qué el cielo nocturno es oscuro?
- Si el Universo fuera infinito, homogéneo, isotrópico, e invariante, en cada dirección que miramos nuestra línea de visión encontraría una galaxia u otra fuente de luz
 - => el cielo nocturno sería brillante



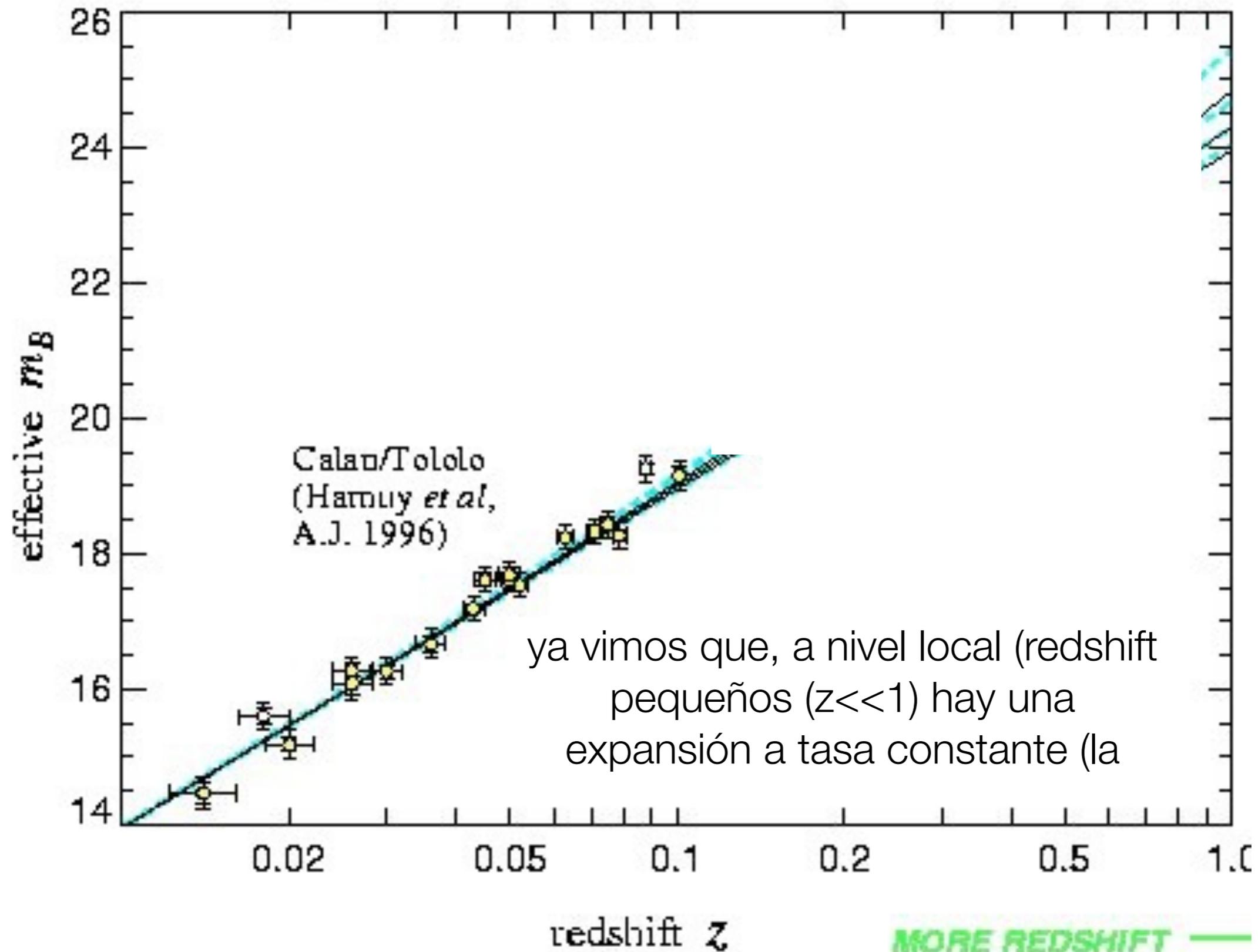
- Esto se resuelve notando que **si el Universo tuviera una edad finita**, aún siendo infinito, la luz de las galaxias más distantes no habría tenido tiempo de alcanzarnos

Datos Observados

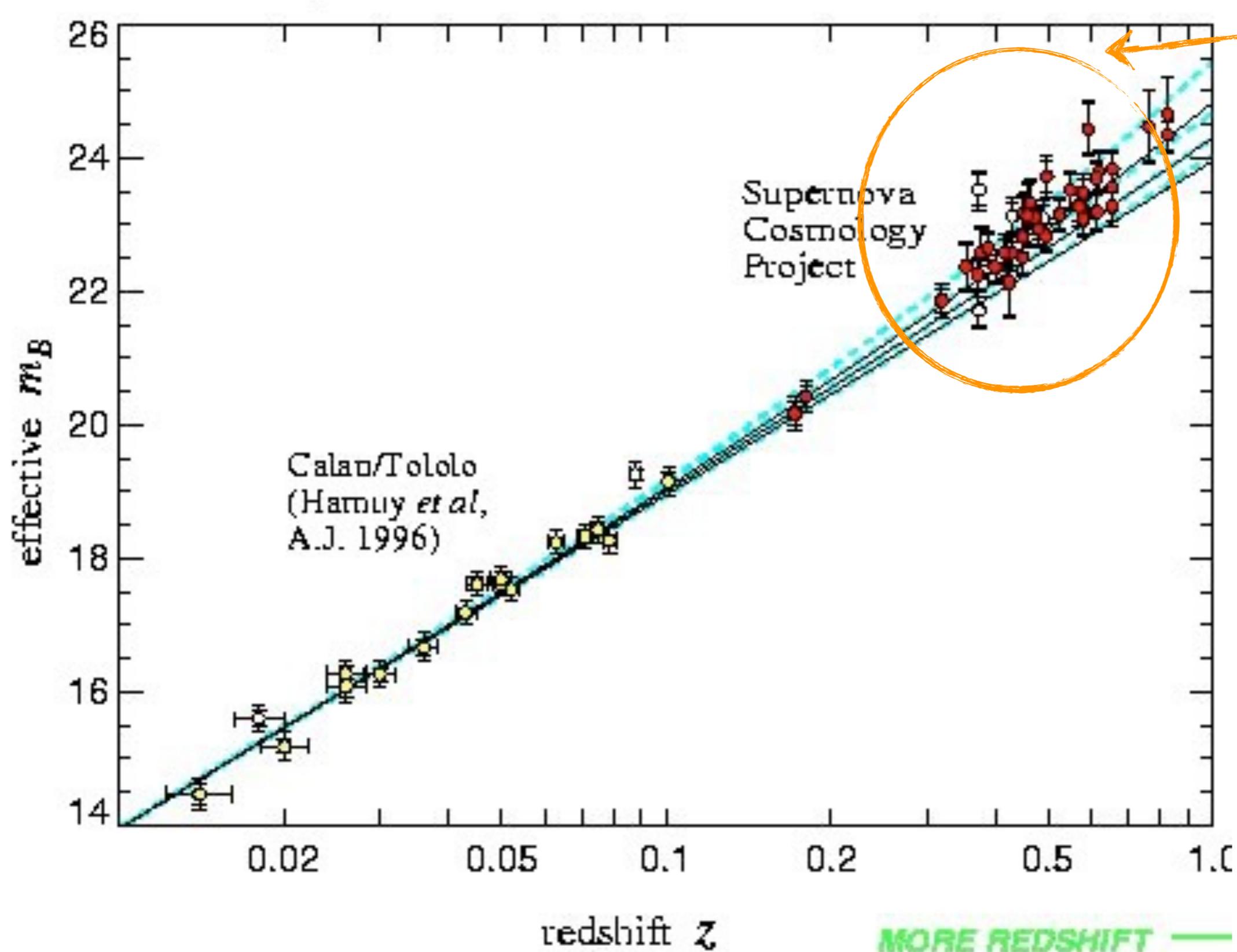
1. Estructura a Gran Escala => Isotropía y Homogeneidad

2. Ley de Hubble => el Universo se expande

EXPANSIÓN ACELERADA Y ENERGÍA OSCURA



EXPANSIÓN ACELERADA Y ENERGÍA OSCURA



Las supernovas más distantes son más débiles de lo esperado, i.e.

La **expansión** no es lineal, es **acelerada**

Datos Observados

1. Estructura a Gran Escala => Isotropía y Homogeneidad
2. Ley de Hubble-Lemaître => el Universo se *expande de forma acelerada*
3. Edad finita del Universo (Ley de Hubble-Lemaître, paradoja de Olbers)
4. Fondo Cósmico de Microondas

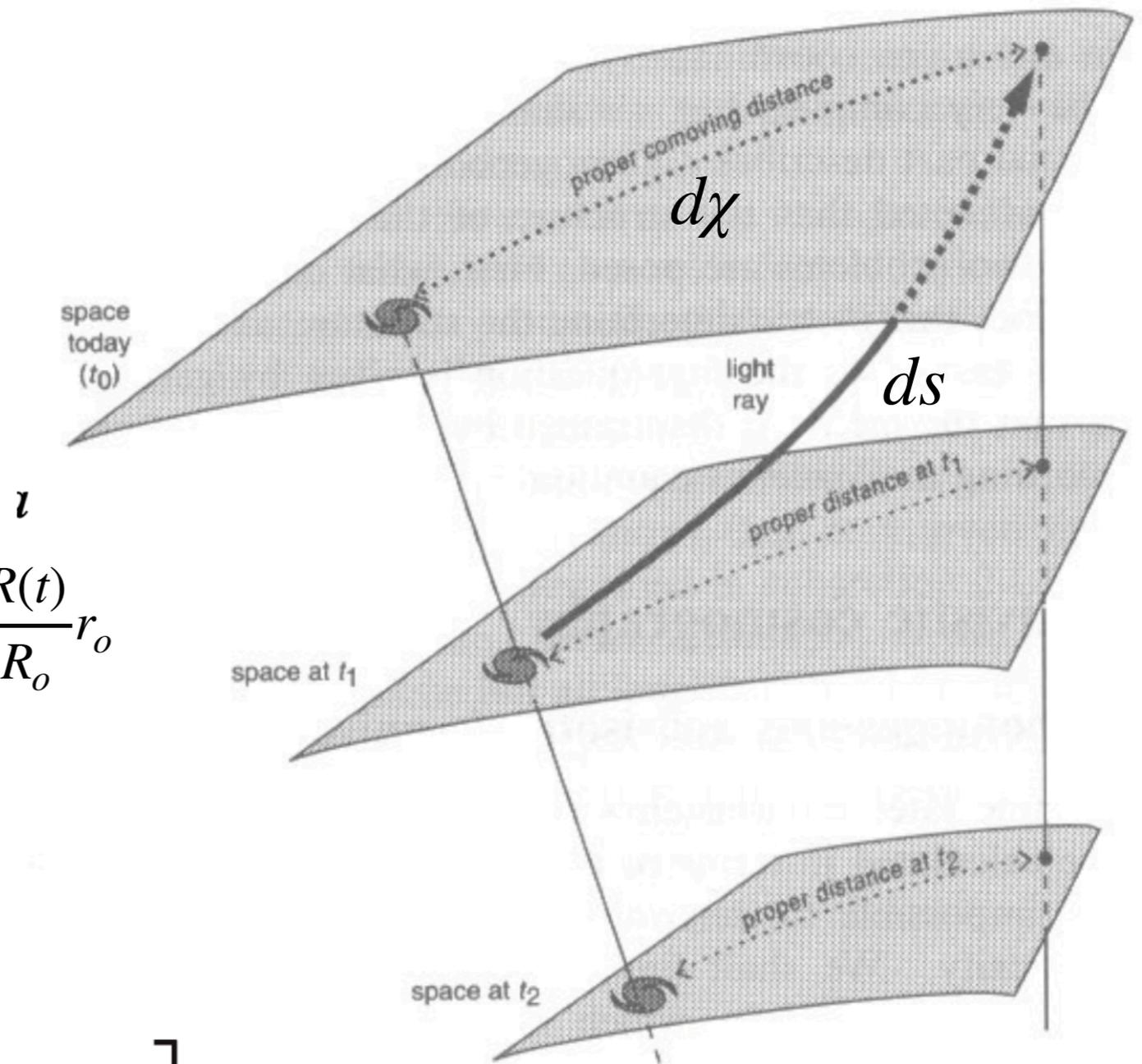
Geometría del Universo

- El modelo del Universo va a describir la evolución temporal del factor de escala $R(t)$
- La distancia propia ds tiene dos componentes la espacial, más la temporal
- $R(t)$ describe la expansión $r(t) = \frac{R(t)}{R_0} r_0$

$$ds^2 + c^2 dt^2 = R^2(t) d\chi^2$$

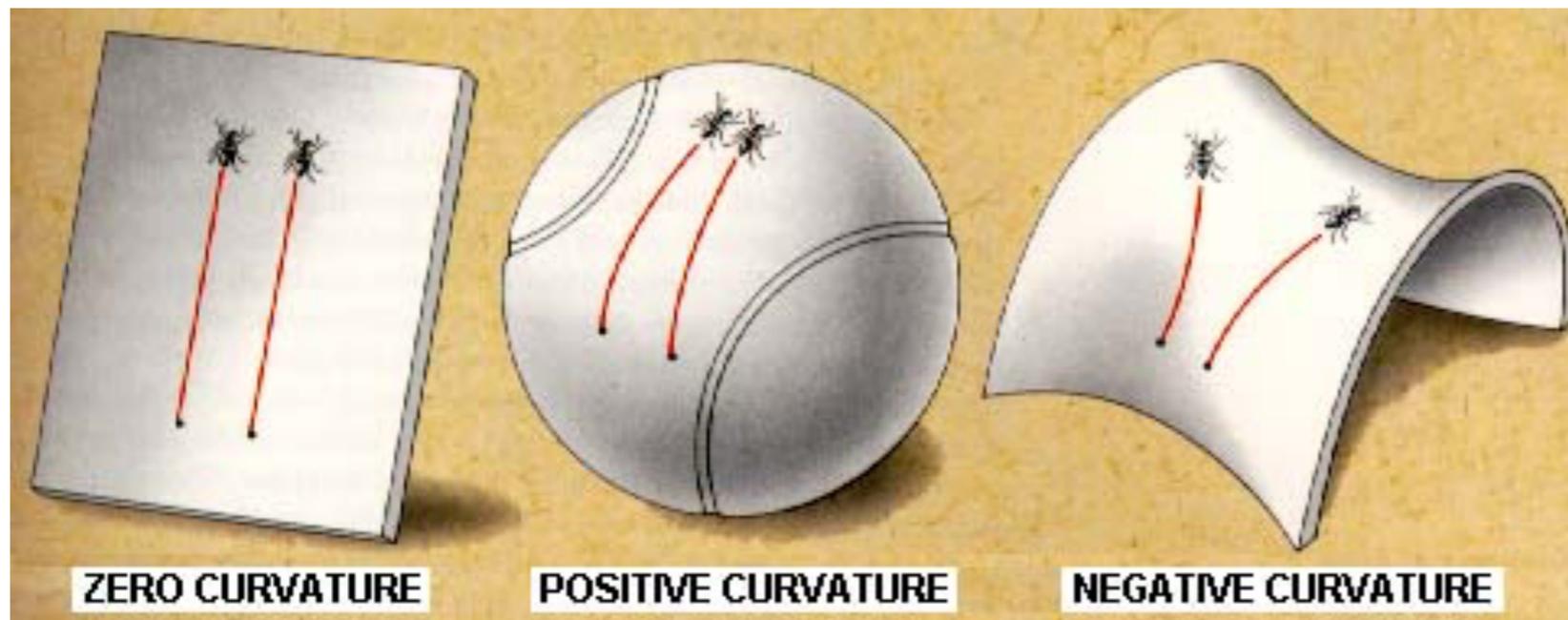
$$ds^2 = -c^2 dt^2 + R^2(t)$$

$$\times \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \cos^2 \theta d\phi^2) \right]$$



Geometría del Universo

- La constante k describe la geometría $ds^2 = -c^2 dt^2 + R^2(t)$
- $k=0$ Espacio plano (euclídeo) $\times \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \cos^2 \theta d\phi^2) \right]$
- $k>0$ Cerrado (curvatura positiva) \rightarrow volumen de Universo finito (pero *sin* borde)
- $k<0$ Abierto (curvatura negativa) \rightarrow volumen de Universo infinito



Ecuaciones de Friedmann: Modelo Einstein-deSitter

- Para conocer la evolución del Universo debemos escribir (y resolver) una ecuación de movimiento para el factor de escala $R(t)$ $m\ddot{R} = F$

- Universo considerando sólo masa/gravedad: $\ddot{R} = -\frac{4\pi}{3}G\rho R$

- Expresando la densidad de materia ρ en términos de ρ_0 la de $t=0$ (y tomando $R_0 = 1$, tenemos por conservación de la masa que: $\rho = \rho_0 R^{-3}$

- Sustituyendo en la ec. de movimiento: $\ddot{R} = -\frac{4\pi}{3}\frac{G\rho_0}{R^2}$

Notar que si $\rho_0 \neq 0$

=> en este modelo el Universo no puede ser estático, tiene que contraerse o expandirse

Ecuaciones de Friedmann

- Manipulando esta ecuación (ver Kutner Cap. 20) se llega a

$$\frac{d}{dt} \left[\dot{R}^2 - \frac{(8\pi G \rho_0 / 3)}{R} \right] = 0$$

- que podemos integrar directamente, teniendo:

$$\dot{R}^2 - \frac{(8\pi G \rho_0 / 3)}{R} = -k$$

- k es la constante de integración. Ésta es la misma constante de la que hablábamos antes y que define la curvatura del Universo. Reescribiendo usando otra vez que $\rho = \rho_0 R^{-3}$ tenemos:

$$\left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 - \frac{8}{3} \pi G \rho = -\frac{k}{R^2}$$

Ecuaciones de Friedmann

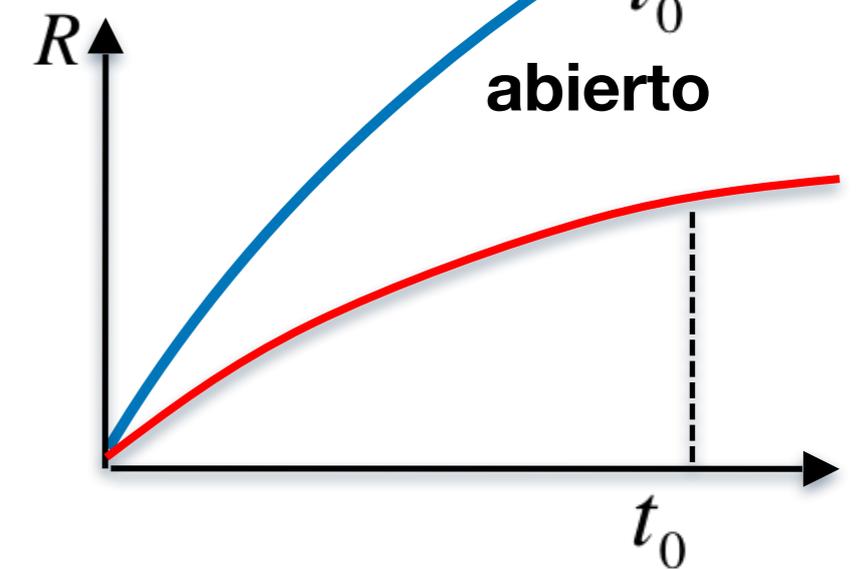
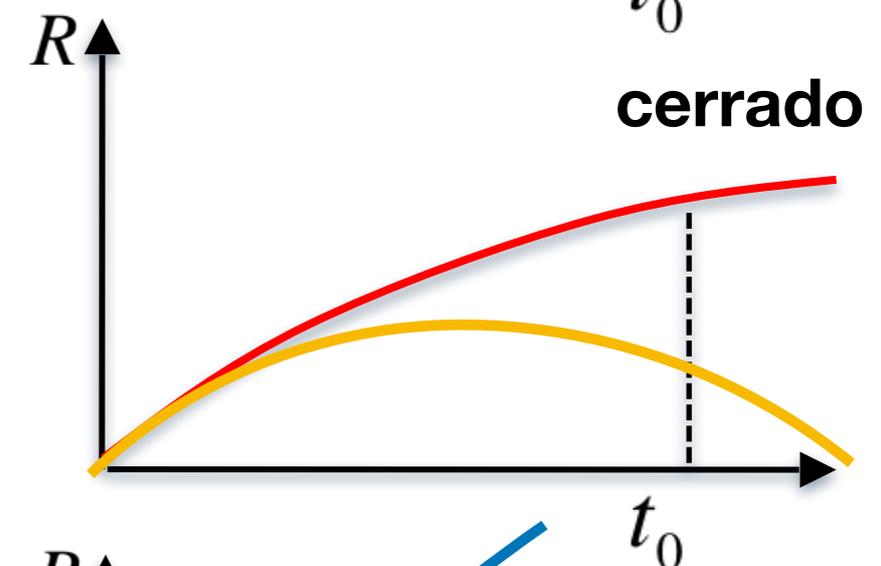
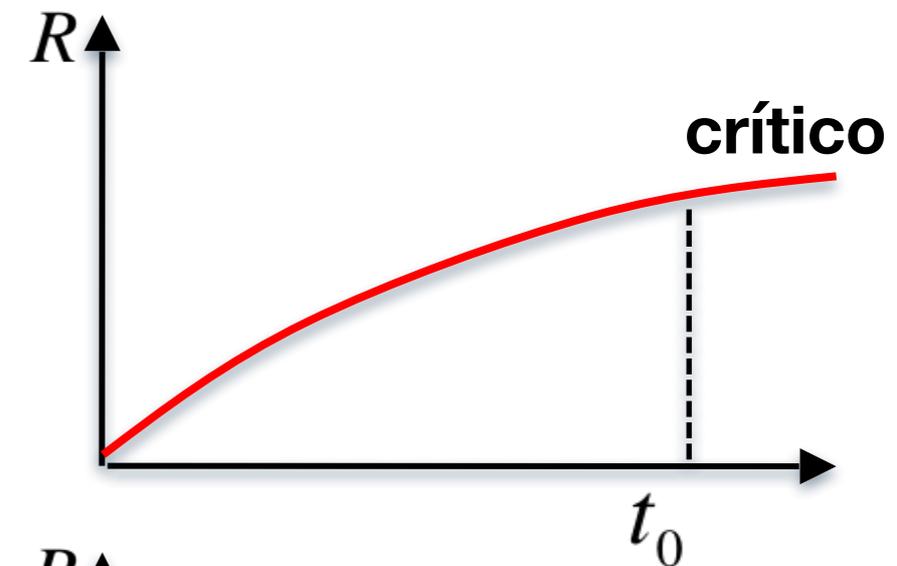
- k determina cómo será la evolución del Universo

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho = -\frac{k}{R^2}$$

$k = 0$ $\Rightarrow \dot{R}$ es >0 siempre pero la expansión continua a una tasa cada vez menor (desacelerada). Se llama **Universo crítico o plano**

$k > 0$ $\Rightarrow \dot{R}$ es inicialmente positiva pero alcanza un máximo (la gravedad domina) y el Universo colapsa. Se llama **Universo cerrado**

$k < 0$ $\Rightarrow \dot{R}$ siempre es positivo, diverge. La expansión nunca se detiene. Se llama **Universo abierto**



Ecuaciones de Friedmann

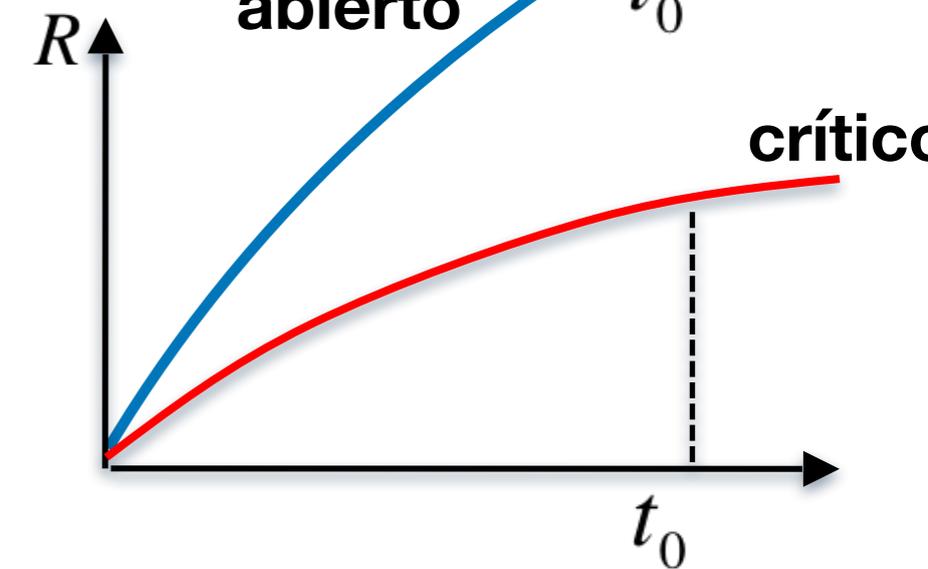
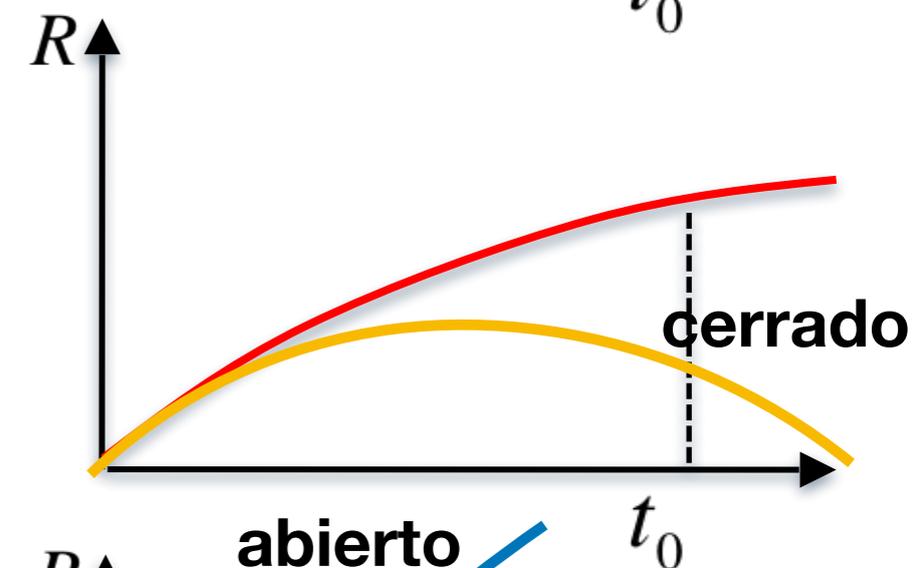
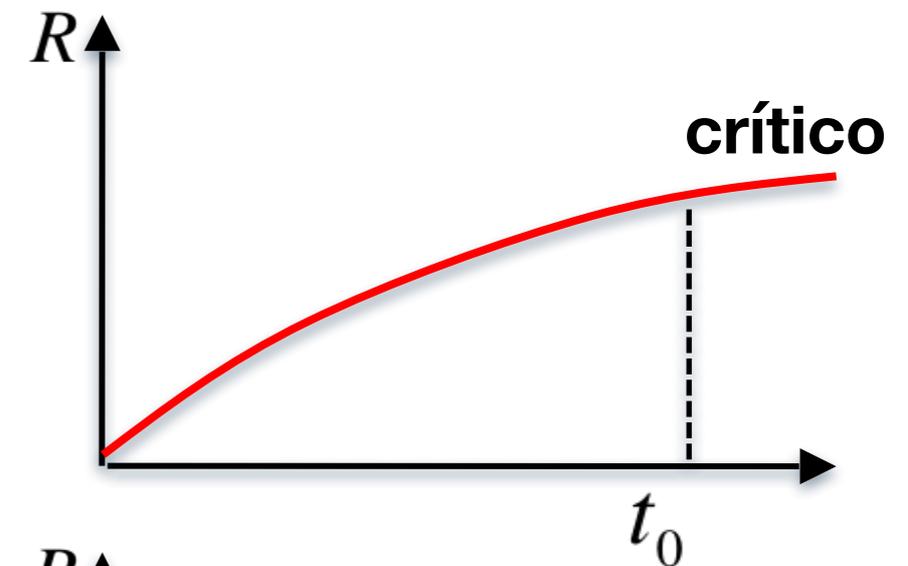
- k determina cómo será la evolución del Universo

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho = -\frac{k}{R^2}$$

$k = 0$ $\Rightarrow \dot{R}$ es >0 siempre, la expansión continua a una tasa cada vez menor (desacelerada). Se llama **Universo crítico o plano**

$k > 0$ = la densidad ρ_c tal que $k=0$ (el Universo es plano) se llama **densidad crítica**

$k < 0$ $\Rightarrow \dot{R}$ siempre es positivo, diverge. La expansión nunca se detiene. Se llama **Universo abierto**



Ecuaciones de Friedmann

- La ec. anterior la planteamos considerando únicamente la acción de la gravedad (modelo de Einstein-deSitter). En general, se puede incluir otro término, opuesto a la gravedad

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{1}{3}\Lambda c^2 - \frac{kc^2}{R^2}$$

- El 3er término tiene una constante Λ , llamada **constante cosmológica**. Einstein lo introdujo en sus ecuaciones al ver que en la ec. del modelo de Einstein-deSitter (solo gravedad) no se podía obtener un Universo estático (hizo esto *antes de que Hubble observara la expansión del Universo*). Al observarse la expansión lo desechó
- El término de la **constante cosmológica** permite ahora tener un Universo en expansión, con diferente geometría, incluso con $k=0$

Observables

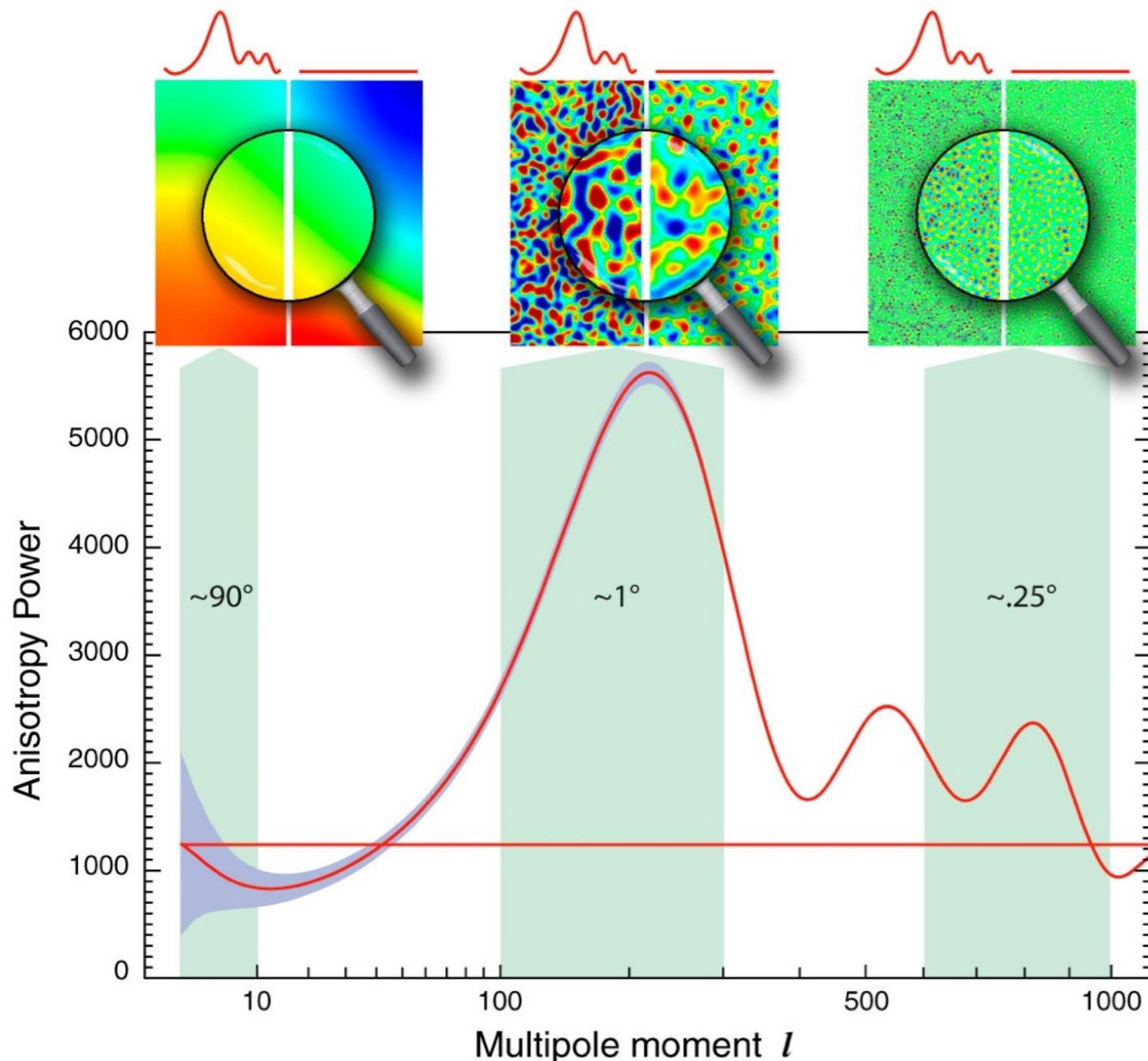
1. Estructura a Gran Escala => Isotropía y Homogeneidad
2. Ley de Hubble-Lemaître => el Universo se **expande de forma acelerada**
3. Edad finita del Universo (Ley de Hubble-Lemaître, paradoja de Olbers)
4. Fondo Cósmico de Microondas

recordar que **ya sabemos que el Universo se expande de forma acelerada** (Ley de Hubble-Lemaître SN Ia)

nos falta conocer su geometría k para poder definir el modelo

Ecuaciones de Friedmann

- El tamaño angular de las fluctuaciones del CMB está dado por el tamaño del horizonte en el momento de la última dispersión. El horizonte es la distancia que puede viajar un fotón durante la edad del universo (en ese momento).



- El modelo de Universo determina el tamaño del horizonte (fija la curvatura y la edad del Universo)
- Esto define una regla estándar a diferentes edades del Universo
- Así, estudiando la distribución de tamaños de las fluctuaciones del CMB se puede medir la curvatura
- WMAP obtuvo que **$k=0$!! (el Universo es plano) \Rightarrow la densidad del Universo es la densidad crítica**

Observables

1. Estructura a Gran Escala => Isotropía y Homogeneidad
2. Ley de Hubble-Lemaître => el Universo se **expande de forma acelerada**
3. Ley de Hubble-Lemaître (paradoja de Olbers) => Edad finita del Universo
4. Fondo Cósmico de Microondas => superficie de último scattering / Big Bang
5. Fluctuaciones o Anisotropías del Fondo Cósmico de Microondas => **la curvatura es plana**

Ecuaciones de Friedmann

- Las fluctuaciones del CMB muestran que **$k=0$ (el Universo es plano)**
- Las SNIa muestran que la expansión es acelerada
- Éstos dos hechos no son posibles simultáneamente en el modelo de Einstein-deSitter
- Por lo tanto la **constante cosmológica es no nula!**
 - este término es el que denominamos **energía oscura**

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{1}{3}\Lambda c^2 - \frac{kc^2}{R^2}$$