



# Universidad Nacional de Río Negro

## Int. Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2017

- **Unidad** 04 – Astrofísica 2
- **Clase** UO4C03 – 16
- **Fecha** 24 Nov 2017
- **Cont** El fin?
- **Cátedra** Asorey
- **Web** [github.com/asoreyh/unrn-ipac](https://github.com/asoreyh/unrn-ipac)



# Contenidos: un viaje en el tiempo

**HOW DID OUR UNIVERSE BEGIN?**

**Early building blocks**  
The universe expands, cools  
In less than a nanosecond a repulsive energy field inflates space by a factor of a thousand. It fills it with a soup of subatomic particles called quarks.

**First nuclei**  
As the universe continues to cool, the lightest nuclei of hydrogen and helium form. Perhaps dark matter forms.

**First atoms, first light**  
As electrons begin orbiting nuclei, creating atoms, the glow from their infalling orbits is unveiled. This light is as far back as our instruments can see.

**The "dark ages"**  
For 300 million years this cold, dark soup of gas and radiation is the only light. Clumps of matter that will become galaxies glow brightest.

**Gravity wins: first stars**  
Dense gas clouds collapse under their own gravity. Clumps of dark matter that didn't fragment form galaxies and stars. Star fusion lights up the stars.

**Antigravity wins**  
After being slowed for billions of years, gravity, cosmic expansion accelerates again. The culprit: dark energy. Its nature: unclear.

**Today**  
The universe continues to expand, becoming ever less dense. As a result, fewer new stars and galaxies are forming.

**Unidades 3 y 4  
Cosmología**

**COSMIC QUESTIONS**

**Allá lejos y hace tiempo**

**WHAT IS OUR UNIVERSE MADE OF?**

**WHAT IS THE SHAPE OF OUR UNIVERSE?**

**Observable Universe**  
The universe began 13.8 billion years ago. Because it has been expanding ever since, the farthest observing edge is now 47 billion light-years.

**The Unknown Beyond**  
What we can't see. Possible shapes are:

**DO WE EXIST IN A MULTIVERSE?**

What came before the big bang? Maybe other big bangs. The uncertainty principle holds that even the vacuum of space has quantum energy fluctuations. Inflation theory says our universe had a period such a fast expansion—a random event that odds are had happened many times before. Our cosmos may be one in a sea of other universes—or nothing like ours. These other cosmos will very likely remain forever inaccessible to observation; their possibilities limited only by our imagination.

**Unidad 2  
Astrofísica  
Cálido y frío**

**Dark energy acts**

**Unidad 1  
Partículas 1  
todo es relativo**

**HOW WILL IT END?**

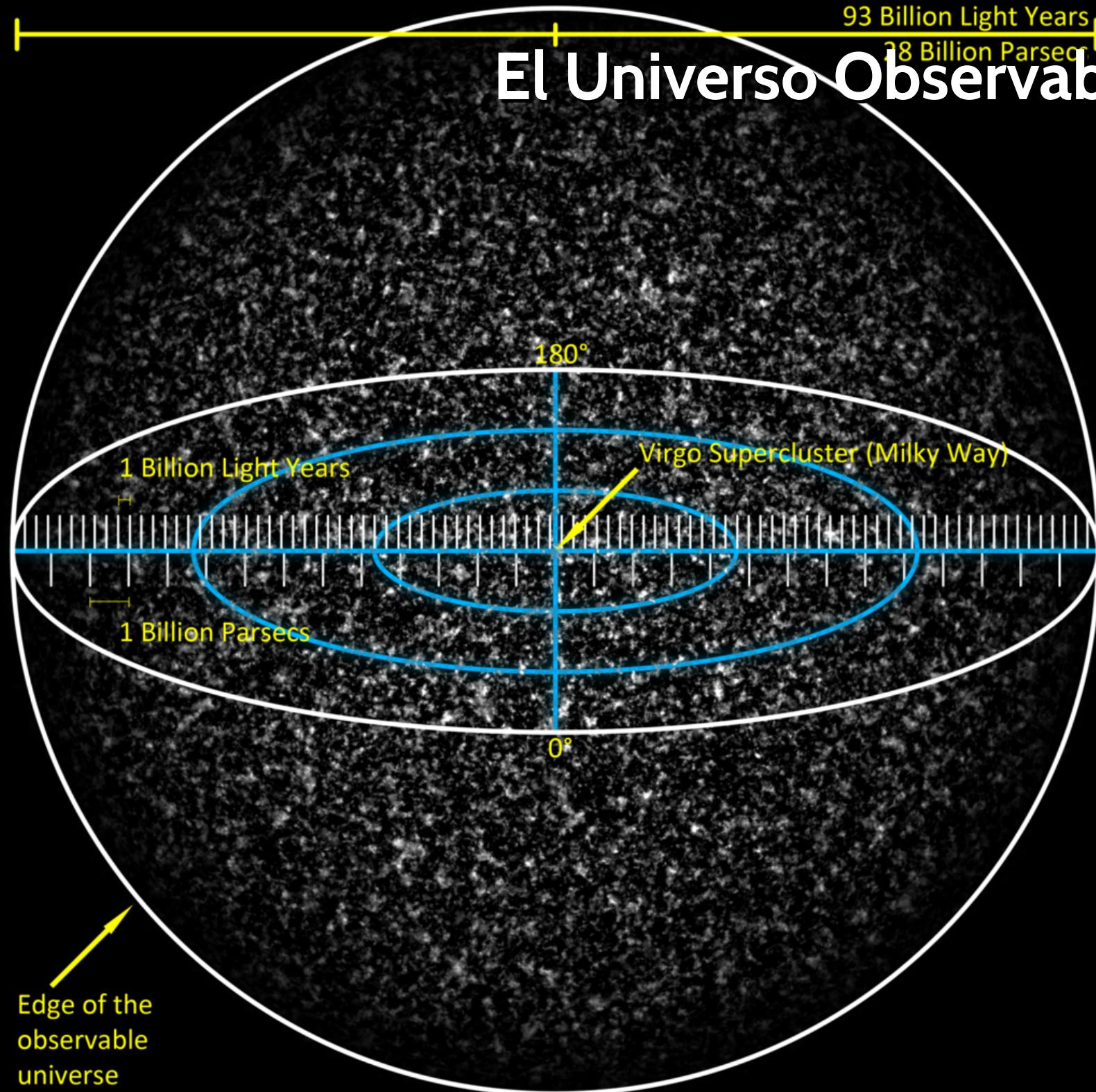
Which will win in the end, gravity or antigravity? Is the density of matter enough for gravity to halt or even reverse cosmic expansion, leading to a big crunch? It seems unlikely—especially given the power of dark energy, a kind of antigravity. Perhaps the acceleration in expansion caused by dark energy will trigger a big rip that shreds everything, from galaxies to atoms. If not, the universe may expand for hundreds of billions of years, long after all stars have died.

**By through the universe on my digital edition**

SOURCE: CHARLES BENNETT, JOHN C. MELTZER, AND ROBERT D. TROTTER, UNIVERSITY OF CHICAGO; COURTESY OF NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY

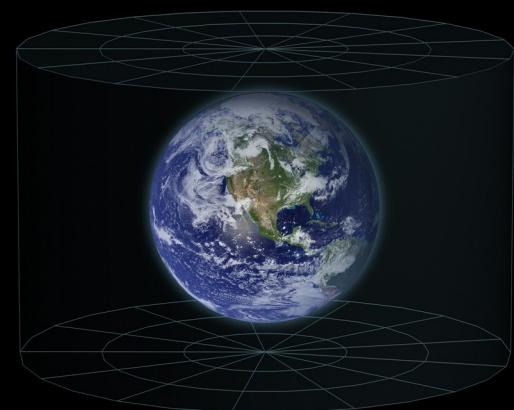
93 Billion Light Years  
28 Billion Parsecs

# El Universo Observable

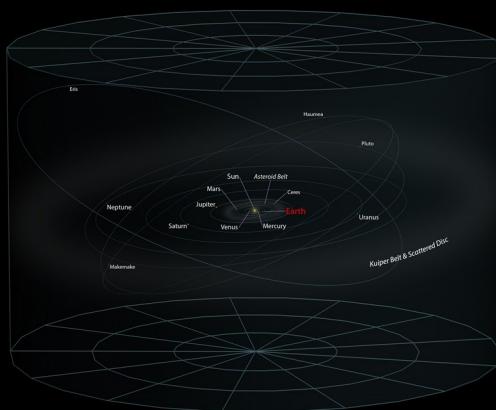


# El Universo Observable

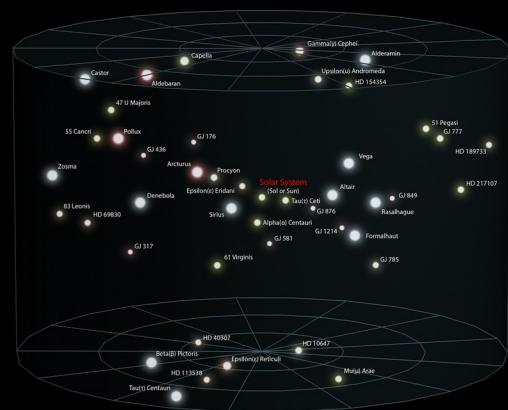
Earth



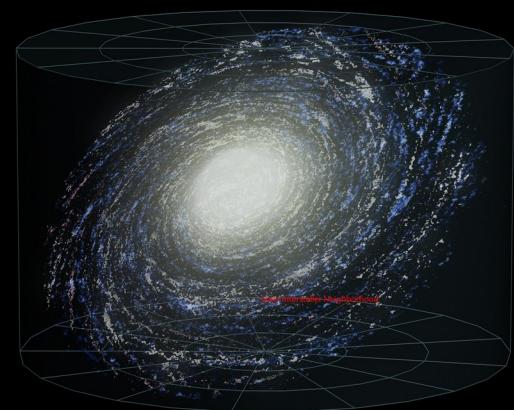
Solar System



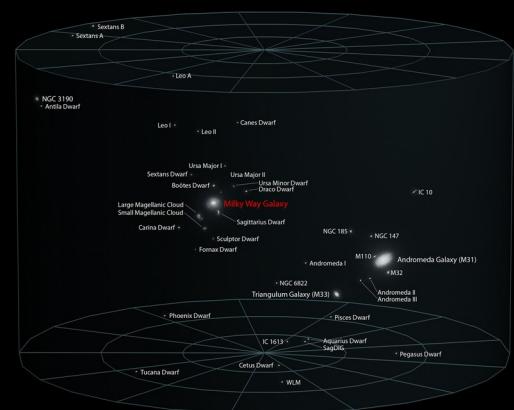
Solar Interstellar Neighborhood



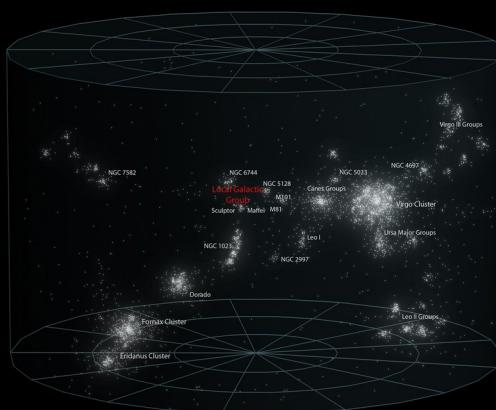
Milky Way Galaxy



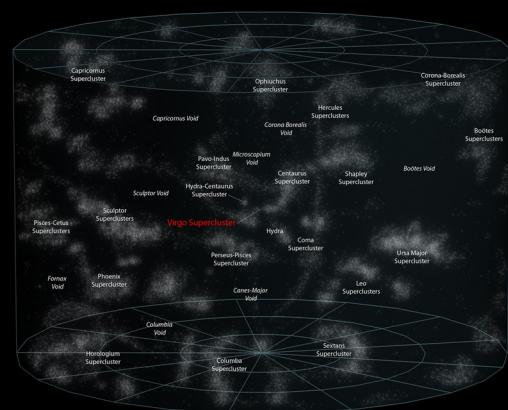
Local Galactic Group



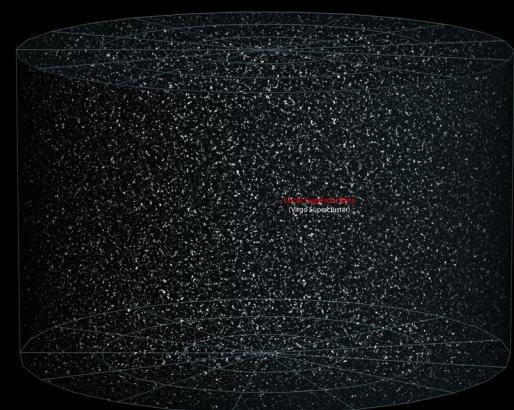
Virgo Supercluster

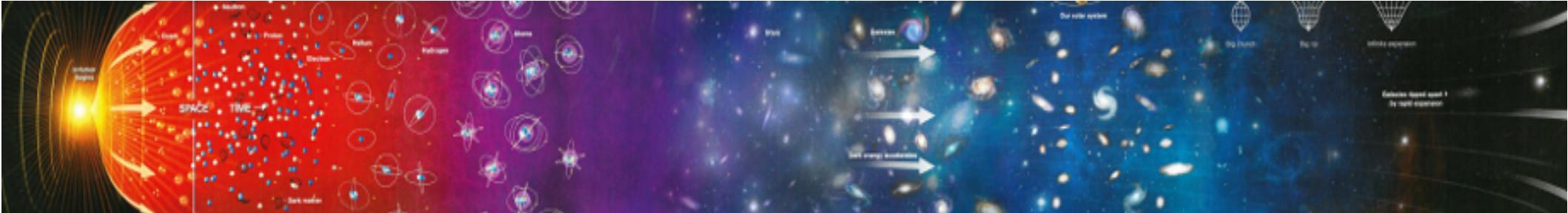


Local Superclusters



Observable Universe

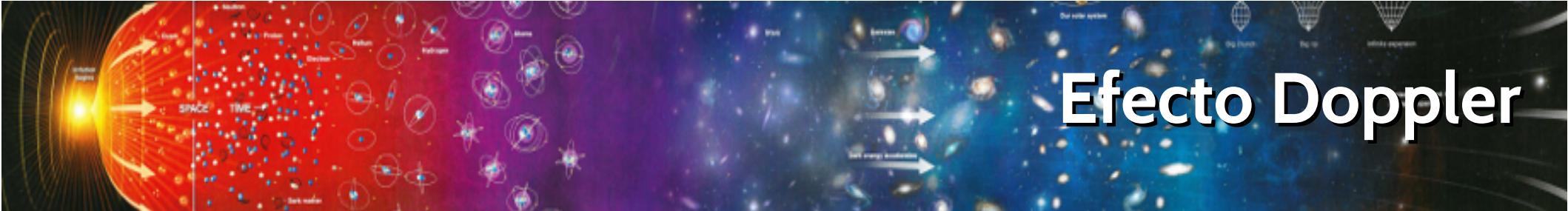




- Entonces....

¿Cuál es la fuerza más fuerte de la Naturaleza?

# Gravedad



# Efecto Doppler

*“Es el cambio aparente en la frecuencia de una onda causado por el movimiento relativo entre la fuente de las ondas y el observador”*

**Dr. Sheldon Cooper**

$$\Rightarrow x_0' = x_{rp} \Rightarrow Nt_2 = c(t_2 - t_f) \Rightarrow t_2 = \frac{ct_f}{(c-N)}$$

## Doppler relativista

$$\Rightarrow \text{Evento 1: } x_1=0, t_1=0 ; \text{ Evento 2: } x_2=Nt_2, t_2=\frac{ct_f}{(c-N)}$$

Las T.L.  $x'=N(x_2-Nt)$  y  $t'=\gamma(t-Nx/c^2)$

$$\Rightarrow \text{Evento 1: } x_1'=0 \quad (x_1=0, t_1=0) \quad y \quad t_1'=0.$$

$$\text{Evento 2: } x_2'=\gamma(Nt_2-Nt)=0 \quad y \quad t_2'=\gamma\left(t_2-\frac{N^2}{c^2}t_2\right)=t_2\gamma(1-\beta^2)=\frac{t_2\gamma}{\gamma^2}=\frac{t_2}{\gamma}$$

$$\Rightarrow x_2'=0 \quad y \quad t_2'=t_2/\gamma$$

Luego, recordando  $t_2=\frac{ct_f}{(c-N)}$   $\Rightarrow t_2'=\frac{ct_f}{(c-N)\gamma}=\frac{ct_f}{\gamma(1-\beta)\gamma}=\frac{ct_f}{(1-\beta)}\sqrt{\frac{1-\beta^2}{1+\beta}}=t_f\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$

$$\Rightarrow t_2' = t_f \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

¿Qué frecuencia observa  $O'$ ? Ve tener  $N$  ondas en un tiempo  $\Delta t'=t_2'-t_1'=t_2'$  o

$$f_0' = N/\Delta t' = \frac{N}{t_f} \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} \Rightarrow f_0' = f_0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$$

$$\frac{1-\beta}{1+\beta} < 1 \Rightarrow f_0' < f_0$$

Comienzo al rojo  
Si se alejan

Si se acercan  $\Rightarrow \beta \rightarrow -\beta$  (ya que  $N=-Nx$ )  $\Rightarrow$

$$f_0' = f_0 \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

Comienza el azul  
(freno y obs. se acercan).

# Corrimiento al rojo

$$\frac{f_o}{f_e} = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} < 1 \rightarrow f_o < f_e, \text{ y } f\lambda = c \Rightarrow f_o = \frac{c}{\lambda_o}, \text{ y lo mismo para } \lambda_e$$

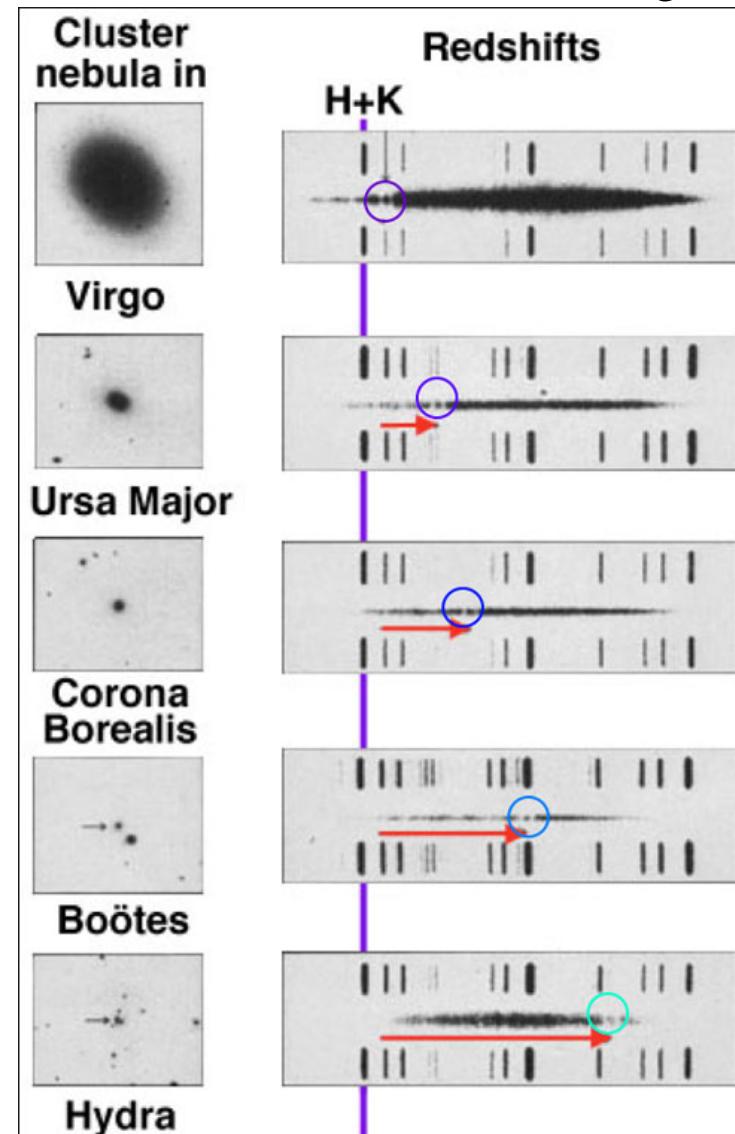
$$\frac{\lambda_o}{\lambda_e} = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} > 1 \rightarrow \lambda_o > \lambda_e$$

$$\text{Def. } z \equiv \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} \Rightarrow 1+z = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

**z es el corrimiento al rojo.**

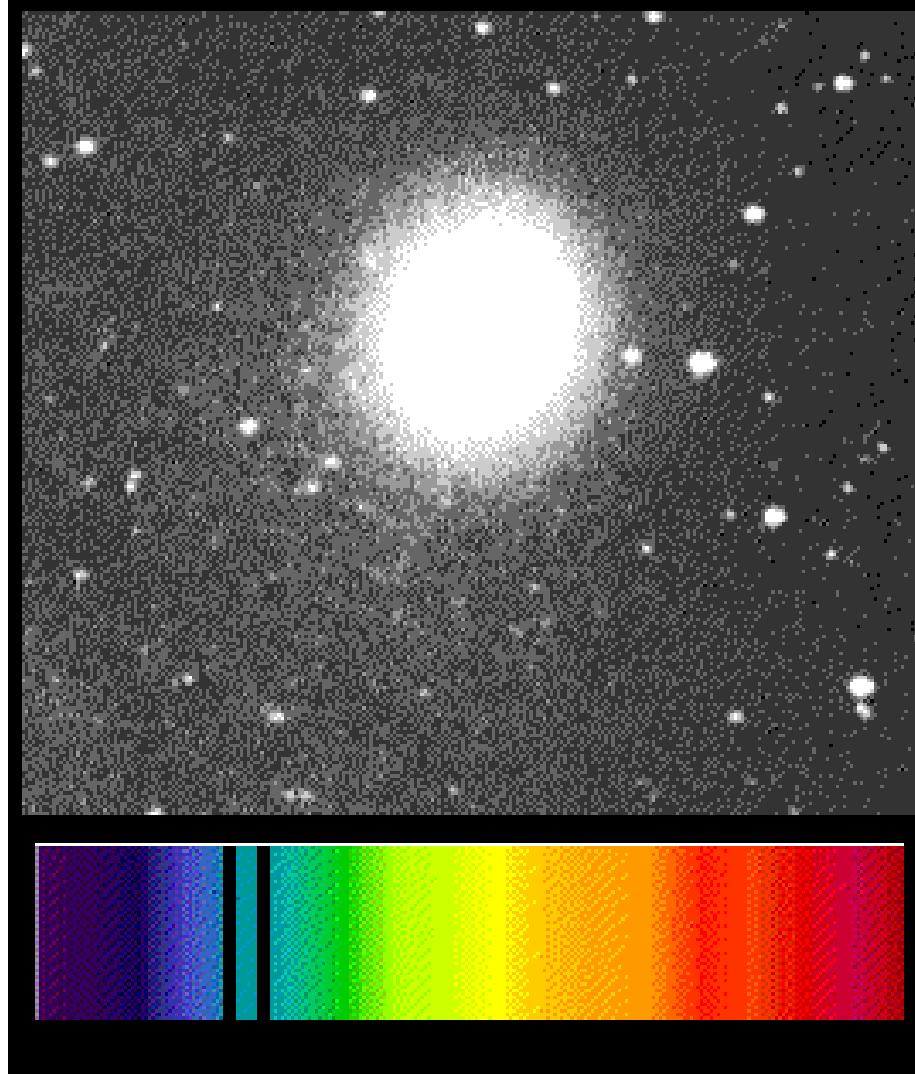
Se puede probar que si  $v \ll c$

$$z \approx \beta$$

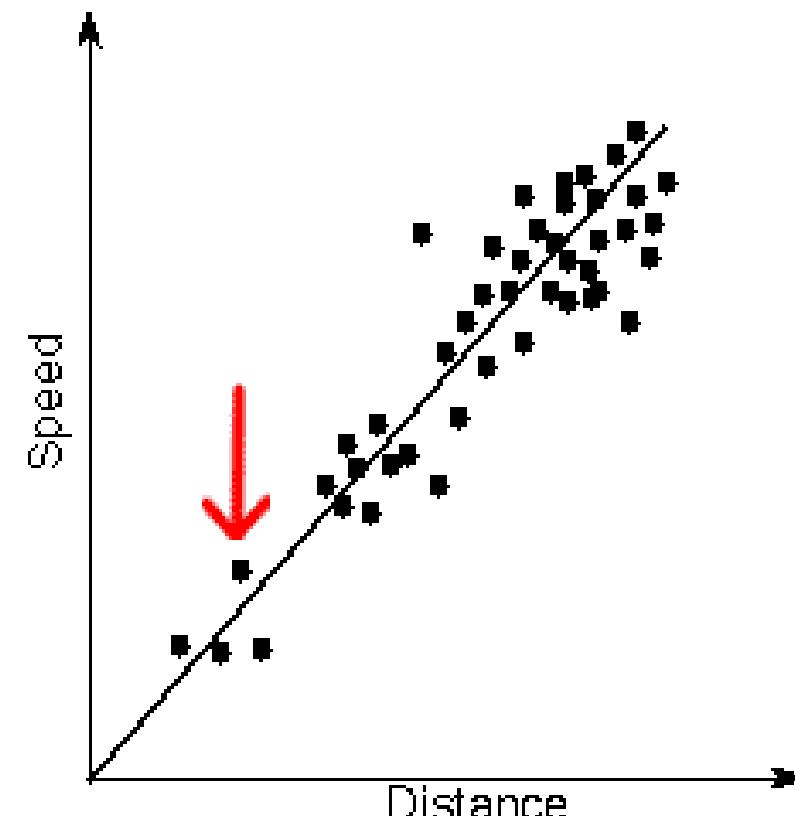




# El Universo se expande



**Hubble Law**  
recession speed =  $H_0 \times$  distance



$$V = H_0 \times d$$

Nov 24, 2017

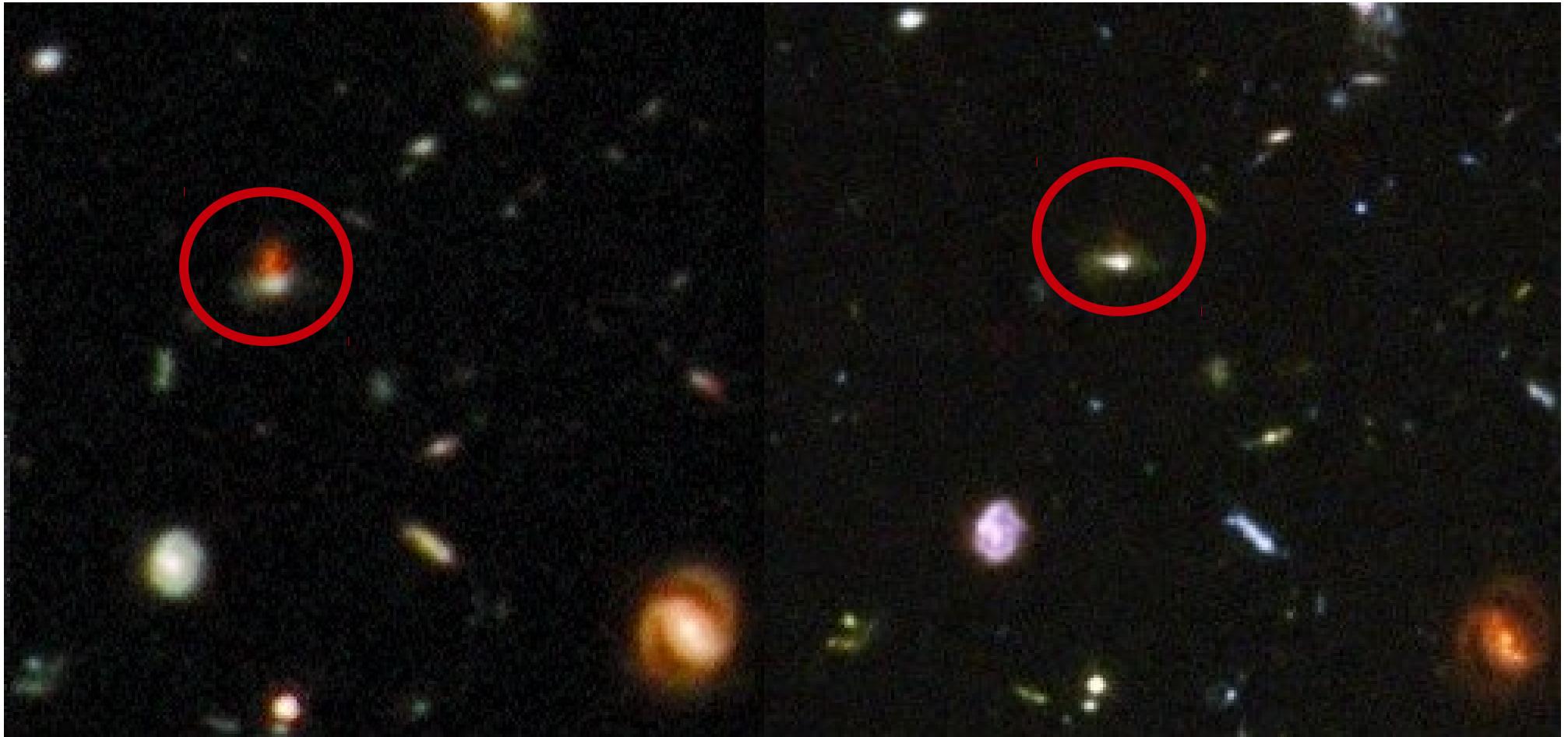
$$H_0 = 67 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

H. Asorey - IPAC 2017 - 16

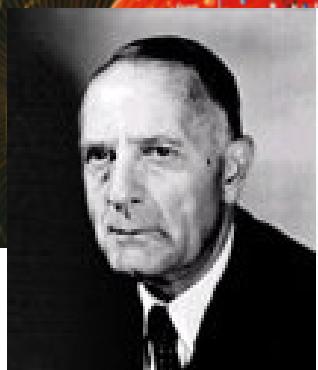


# ¿y más allá del “rojo”? Encuentre las diferencias

HST, infrarrojo

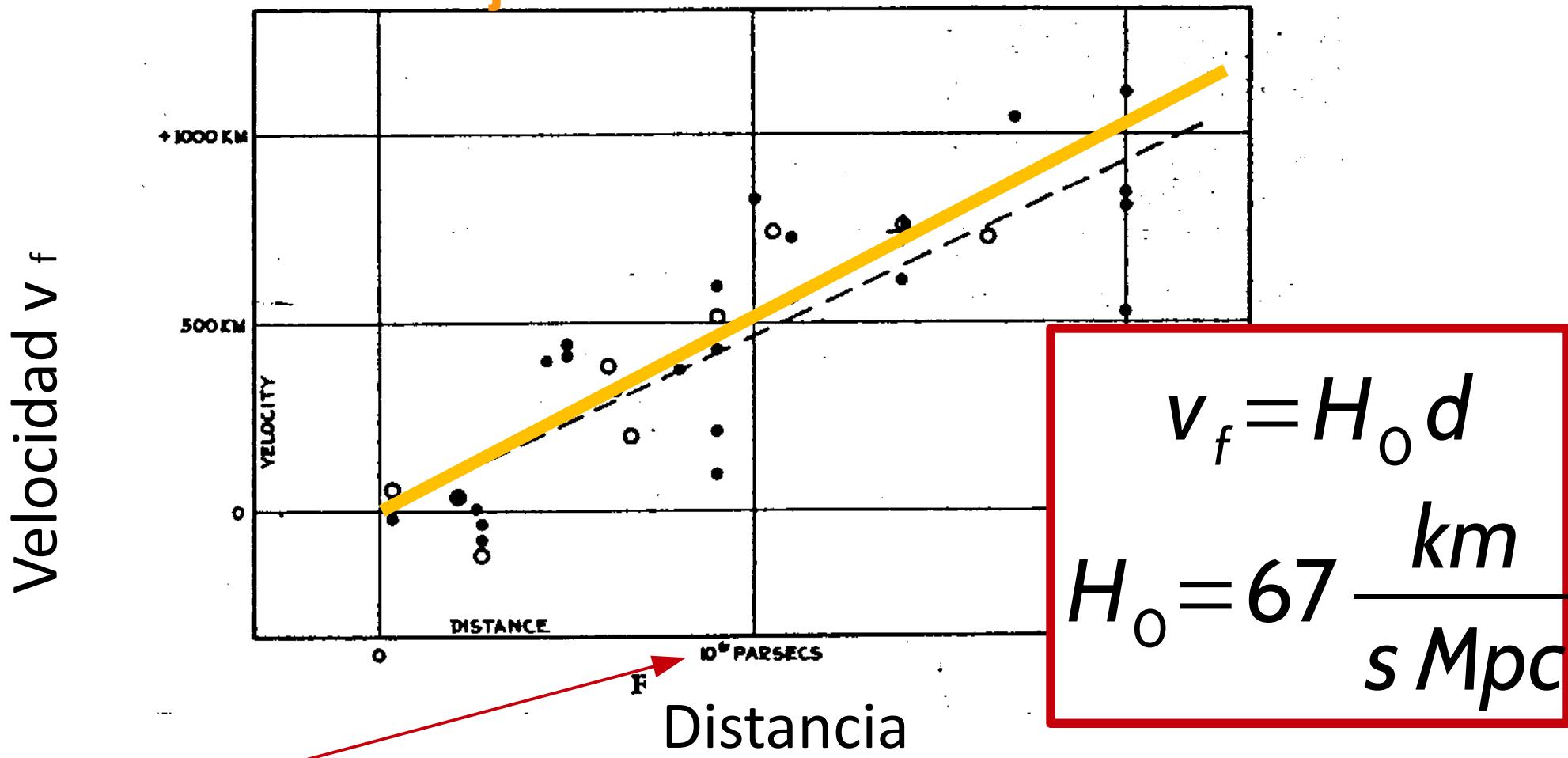


HST, visible

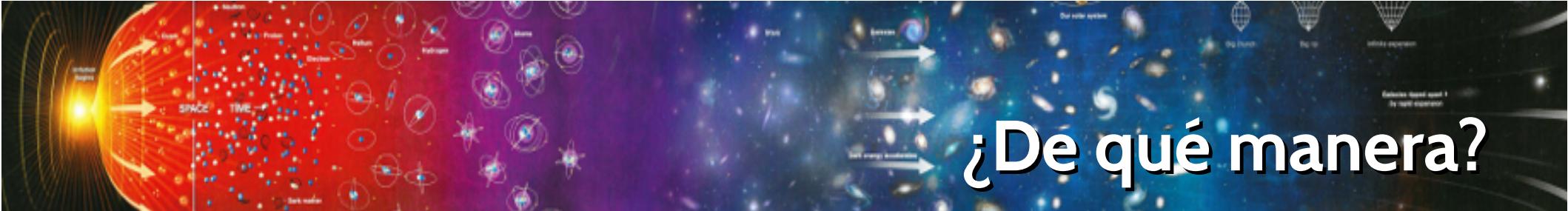


# Ley de Hubble: el Universo se expande

Un objeto situado a 1 Mpc de la Tierra  
se aleja a una velocidad de 67 km/s



$$10^6 \text{ parsecs} = 1 \text{ Mpc (megaparsec)} = 3.085 \times 10^{22} \text{ m}$$



¿De qué manera?





# Una torta de chips de chocolate



- La velocidad depende de la distancia entre los chips
- Cada uno piensa que es el “centro del Universo”
- Pero ninguno lo es

# Horizontes en el Universo

- Radio de Hubble: distancia a la cual la velocidad de expansión es igual a  $c$

$$r_H(t) = \frac{c}{H}(t)$$

- Horizonte cosmológico: la distancia que se propagó la luz desde el inicio del Universo. Como el universo se expande, esto no es “simplemente”  $13.8 \times 10^9$  años luz

Hoy es  $14.4 \text{ Gpc} = 46.9 \text{ Gal}$



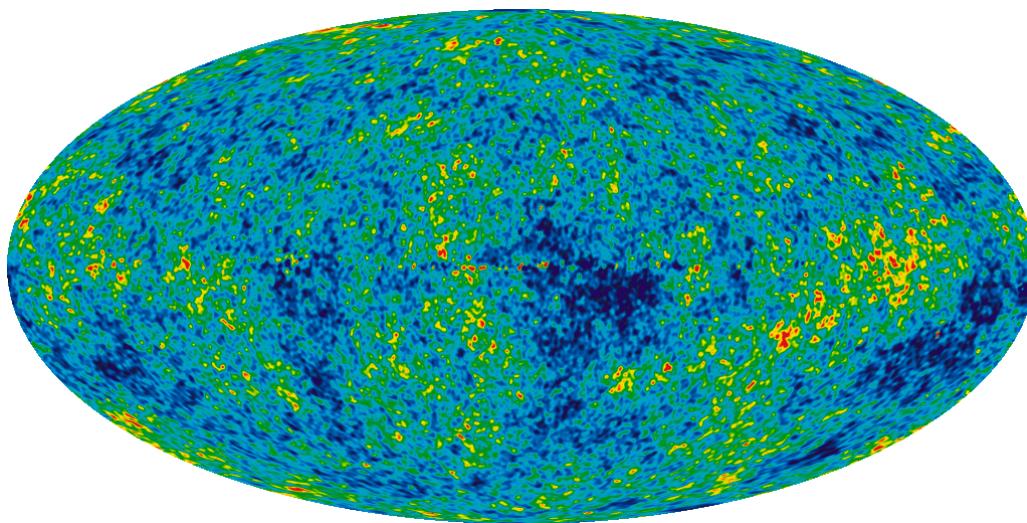
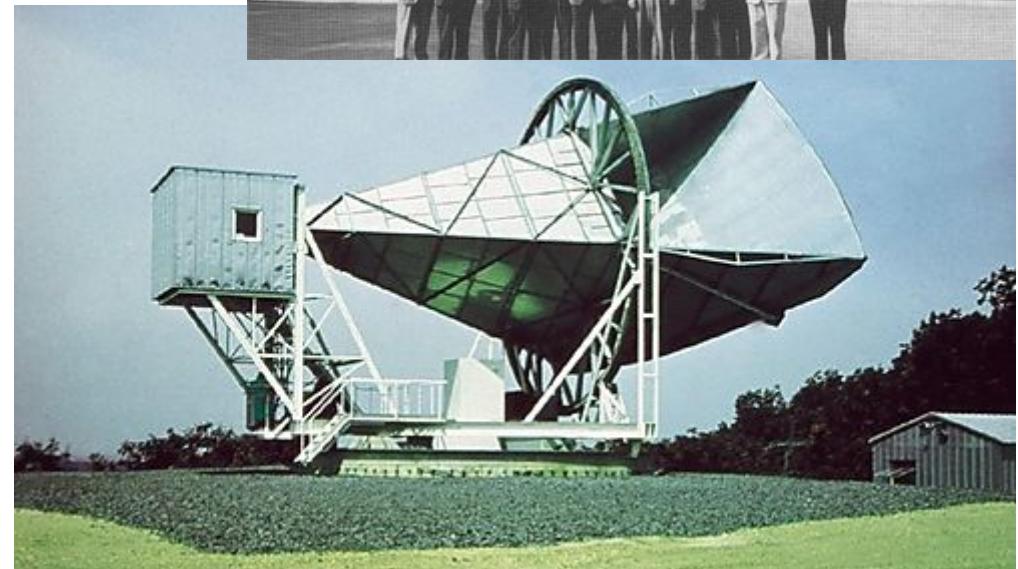
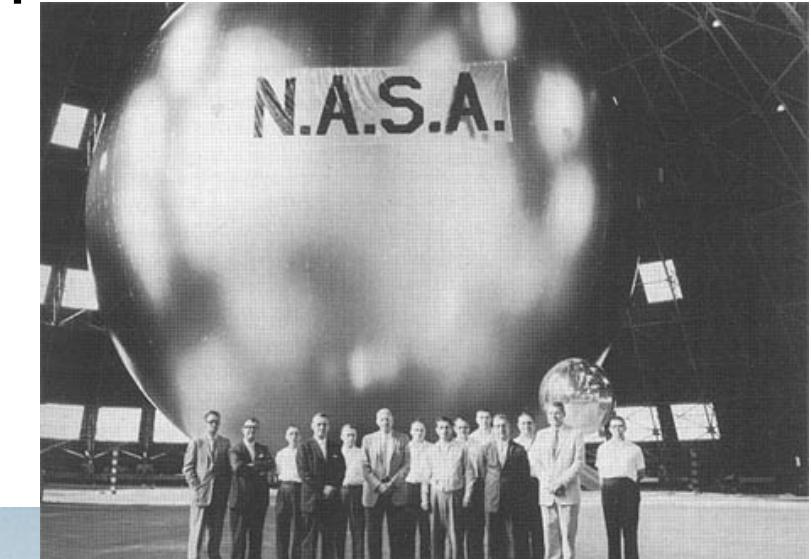
# Pero si el Universo está en expansión....

- ... siempre lo estuvo?
- Estado estacionario
  - Creación continua de materia (hidrógeno)
$$1 \frac{M_{\odot}}{Mpc^3}$$
  - Universo homogéneo e isótropo
- generación inicial
  - Principio cosmológico: las propiedades del Universo son las mismas para todos los observadores
  - Altas temperaturas y densidades
  - Expansión y enfriamiento



# The Big Bang Theory

- Alpher & (Bethe) & Gamow → Paper alfabético
- Penzias & Wilson (1965)
- $\lambda=7.35$  cm
- ¿Energía? ¿Temperatura?



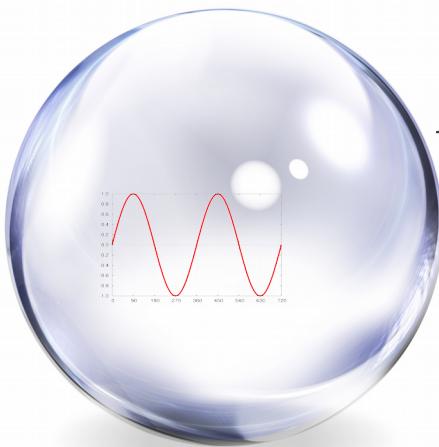


# Materia y energía en la expansión

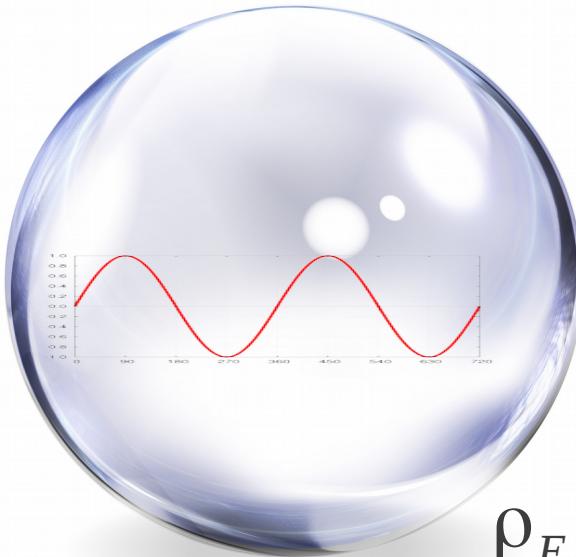
$$E=mc^2$$



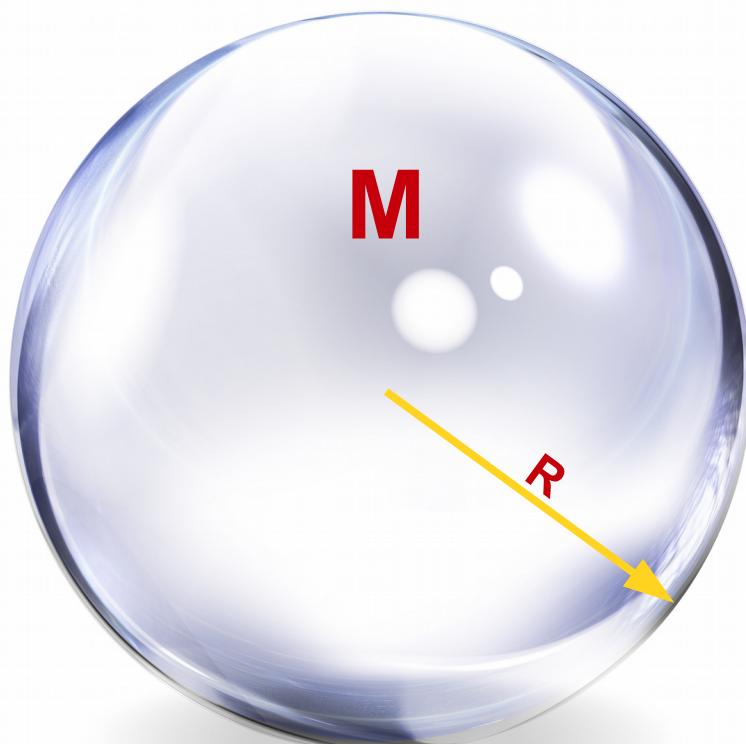
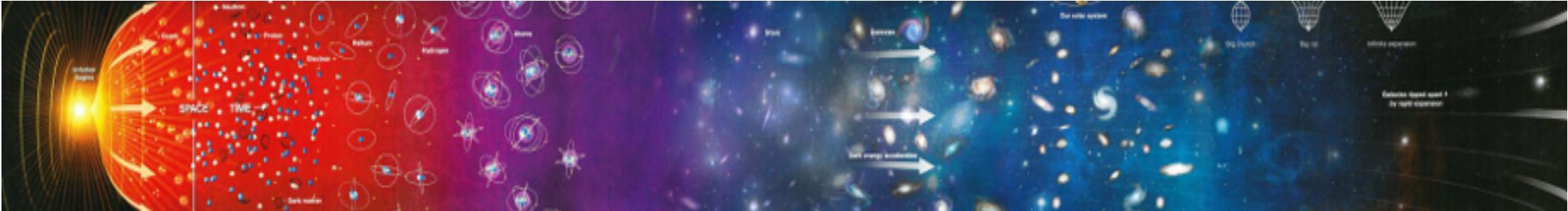
$$E=\frac{hc}{\lambda}$$



$$\rho_E \sim (1/R^4)$$



$$\rho_M \sim 1/R^3$$



$$\frac{\rho_c}{m_p} = 6 \text{ protones/m}^3$$

- Densidad crítica:  
Densidad para la cual la gravedad detendrá la expansión del Universo
- ¿Cómo podemos calcularla?

$$\rho_c = \frac{3 H_0^2}{8 \pi G}$$

$$\Omega_i \equiv \frac{\rho_i}{\rho_c}$$

# Densidad crítica

La velocidad de expansión para un objetos es

$$N = H_0 d$$

Será una estrella de radio  $R$ . Luego la superficie se aleja del centro

Con velocidad  $N = H_0 R$

¿Podrá escaparse de la atracción del centro del universo?

$$r_E = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Si la estrella tiene densidad  $\rho$  y volumen  $V \Rightarrow \rho = M/V \Rightarrow$

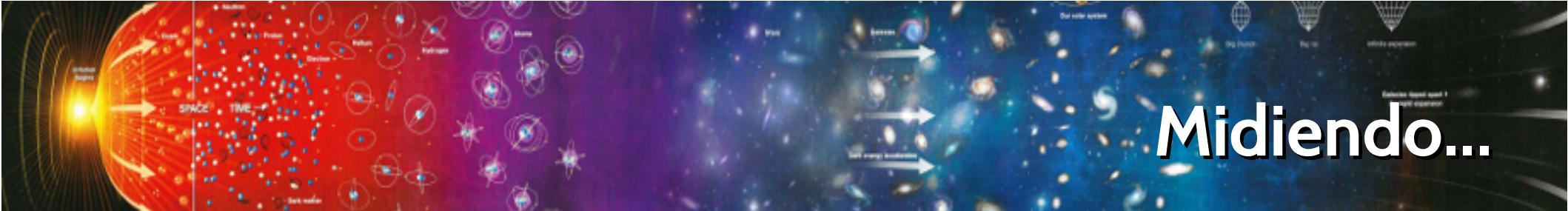
$$M = \rho \frac{4}{3} \pi R^3 \Rightarrow N_E^2 = \frac{2G}{R} \rho \frac{4}{3} \pi R^3 \Rightarrow \rho = \frac{3 N_E^2}{8\pi G R^2}$$

Reemplazando  $N_E^2 = H_0^2 R^2 \Rightarrow$

$$\rho_c = \frac{3 H_0^2 R^2}{8\pi G R^2} \Rightarrow$$

$$\boxed{\rho_c = \frac{3 H_0^2}{8\pi G}}$$

Densidad crítica



# Midiendo...

- Defino:  $\Omega = \rho / \rho_c$
- Ahora mido el contenido de materia del Universo
- Obtengo:

$$\Omega = 1.01 \pm 0.01$$



# ¡Entendimos el Universo!





# Alto, ¿cómo lo medimos...?

- La distribución de materia y energía del Universo, ¿es uniforme?
- ¿Cuánta materia y cuanta energía?
- ¿Qué otros factores debemos tener en cuenta?

# Historia térmica del Universo

- El tamaño del Universo, define una especie de temperatura, en el sentido de que a menor radio, mayor densidad, más interacciones, mayor energía media
- Recordemos, para un mol ( $n=1$ ) de gas ideal:

$$PV = RT \text{ ó } PV = N_A k_B T \text{ y entonces } R = N_A k_B$$

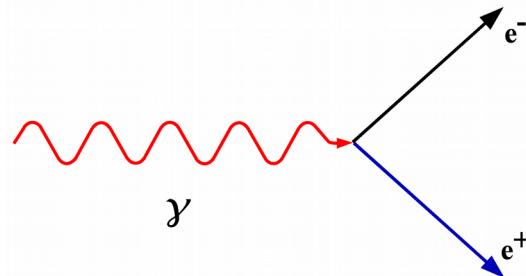
donde  $k_B$  es Boltzmann y  $N_A$  es Avogadro:

$$k_B = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K, ó } k_B = 8.61733 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

- Y en general  $\langle E \rangle \propto k_B T$

# Historia térmica del Universo

- Pensemos en la producción de pares. Sólo ocurre si



$$E_\gamma > 2m_e c^2$$

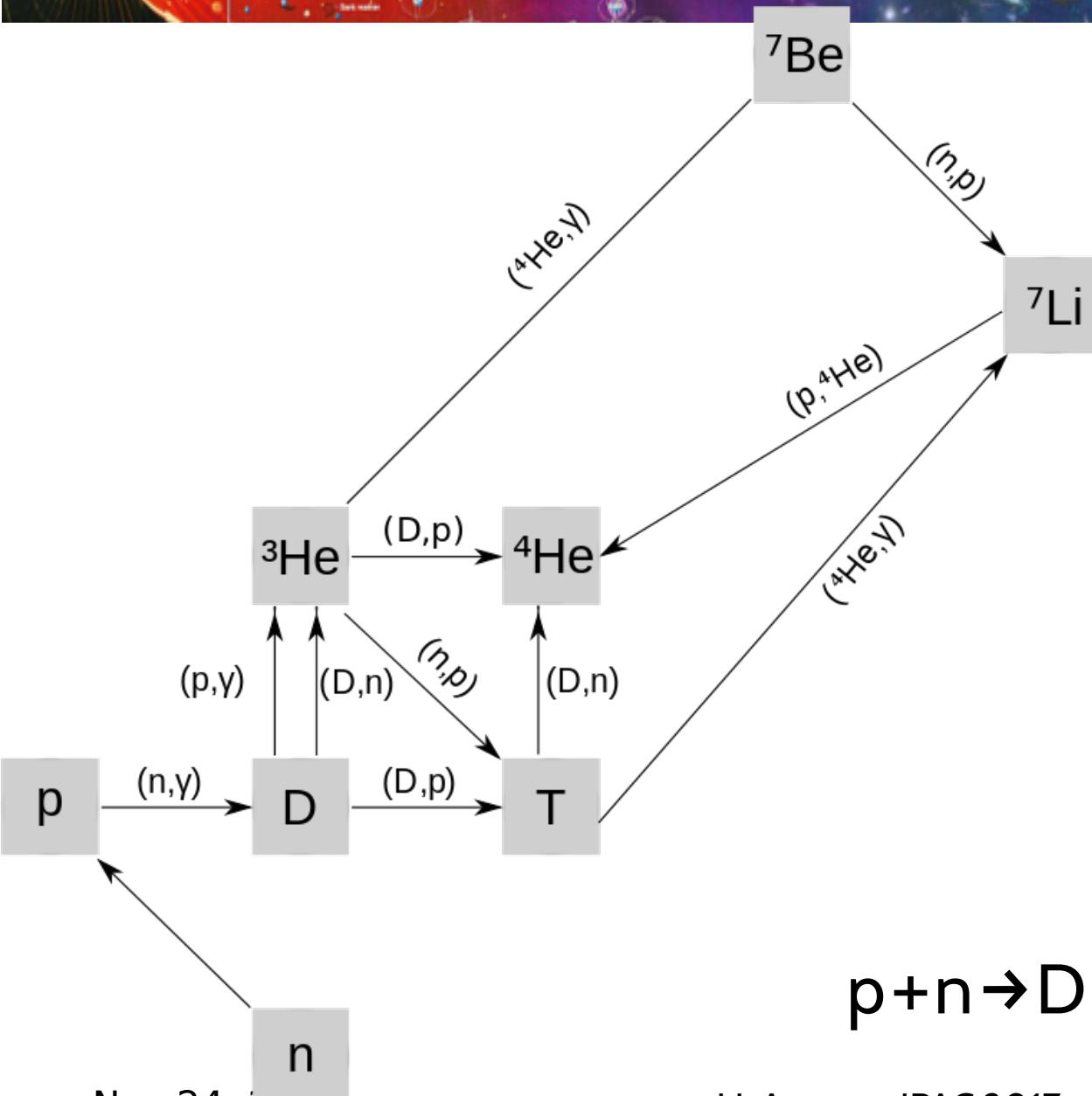
- Y lo mismo para la aniquilación de pares
- Estos procesos pueden ocurrir si la energía media es tal que hay una población con energías suficientes para que ocurran.
- A medida que el Universo se expande, la energía media disminuye, y por ende la temperatura, y procesos que antes eran posibles, ahora no lo son



# Recombinación

- Unos 378 kA (kilo años) después del Big Bang ( $z=1100$ ), la temperatura media era de 4000 K, orden  $\sim$  eV
  - Notar que 4000 K con un corrimiento de 1100, y si fuera lineal  $4000\text{K}/1100 \simeq 3.6\text{ K}$  (sin embargo, no es lineal)
  - La tasa de formación de átomos simples es alta, y aparecen poblaciones de átomos neutros
  - Des-ionización directa es ineficiente  $\rightarrow$  produce un fotón de 13.6eV que reioniza un átomo cercano
  - Des-ionización de niveles excitados, decaen a  $n=2$ , y luego
    - Lyman-alpha ( $n=2 \rightarrow n=1$ , UV, 121.6nm)
    - Decaimiento de 2 fotones

# Nucleosíntesis en el big-bang



- Formación de átomos simples
- Principal fuente de hidrógeno y helio
- Los átomos pesados se forman en la nucleosíntesis estelar (supernovas)
- Notación:

$$p + n \rightarrow D + \gamma, \text{ se escribe } p(n, \gamma)D$$

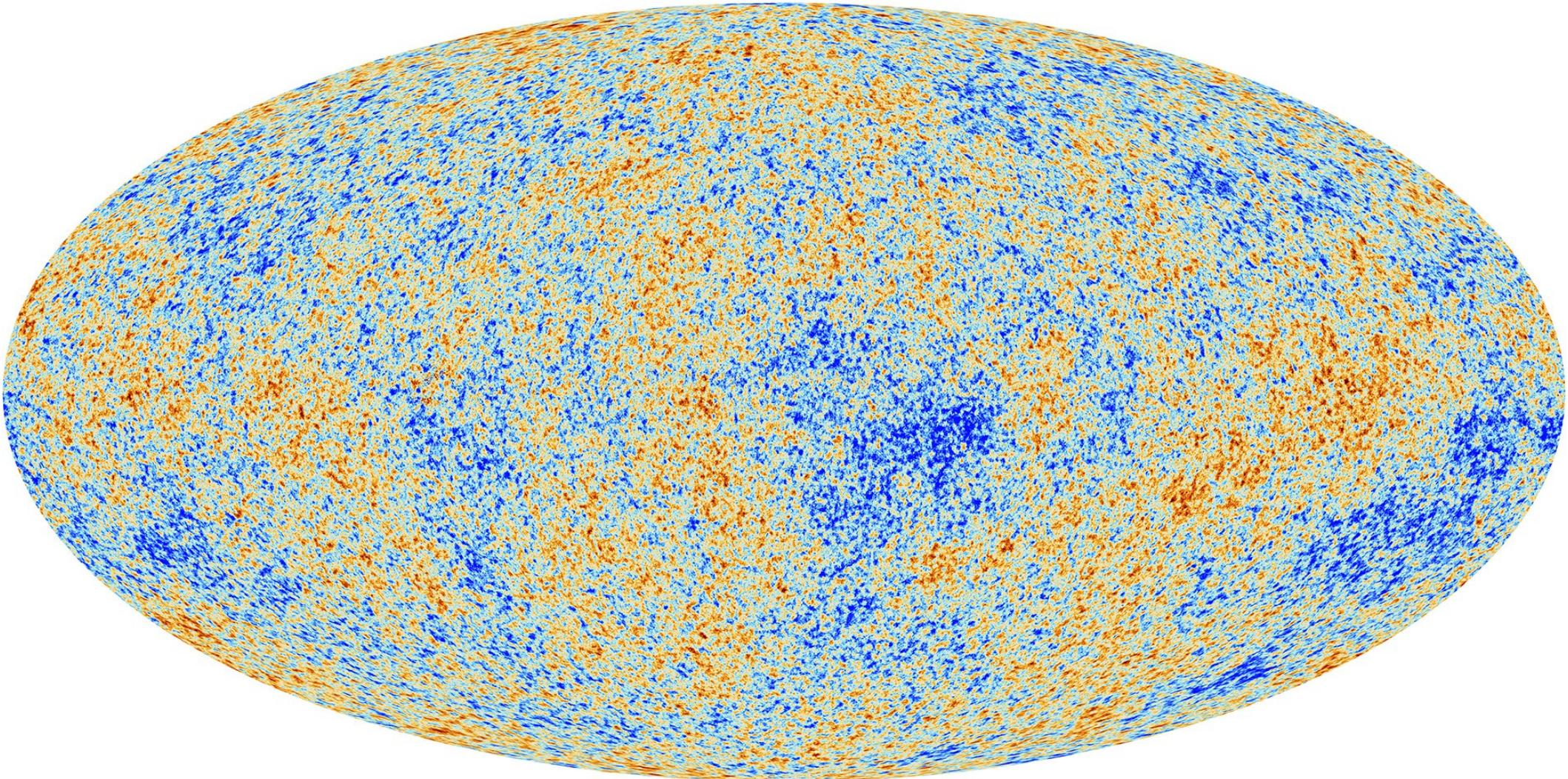


# Muy poco después de la recombinação

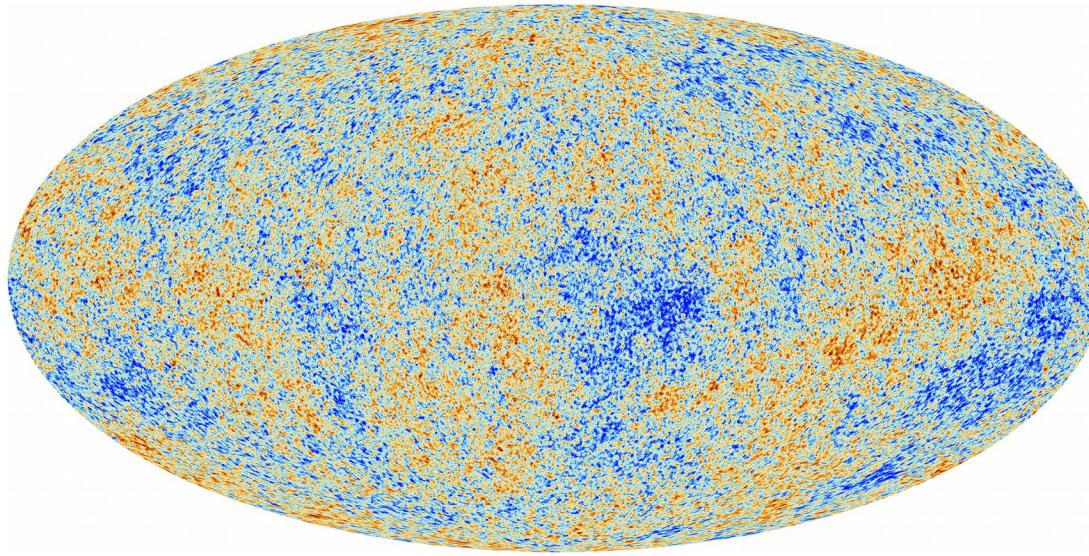
- Los electrones formaron átomos, y la densidad de electrones cae abruptamente
- La disminución de electrones disminuye la tasa de interacción Compton, y además el Universo se está expandiendo
- El Universo se vuelve transparente, los fotones continúan propagándose hasta hoy, perdiendo energía por la expansión (redshift!)



# Una foto del Universo a $z=1100$



# Una foto del Universo a z=1100



- Fotones, microondas

$$T = (2.726 \pm 0.0013) \text{ K}$$

$$n_\gamma = 430 \text{ fotones/cm}^3$$

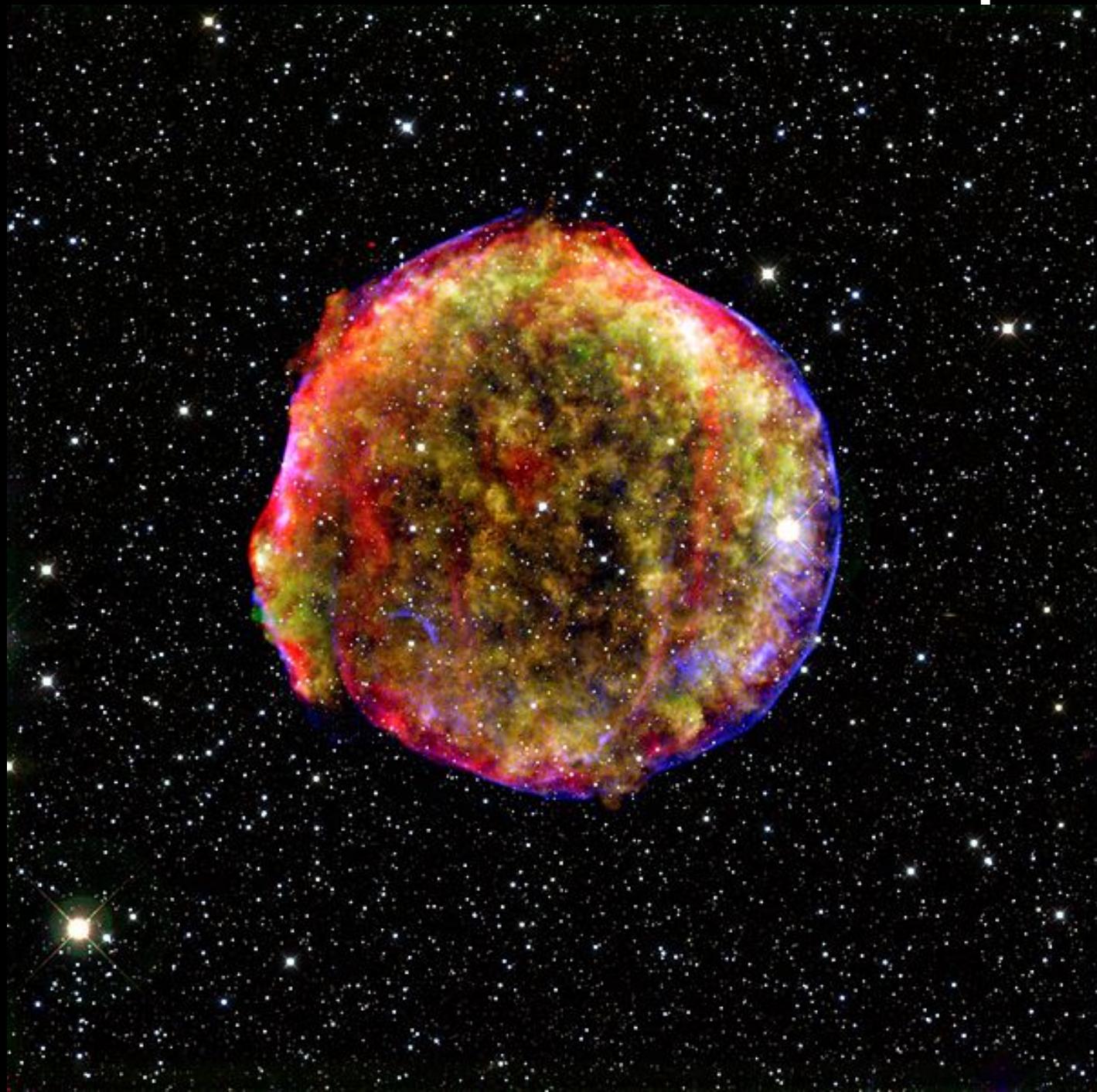
$$\langle E_\gamma / V \rangle = 0.25 \text{ eV/cm}^3$$



# Modelo ΛCMB parámetros que “mejor” describen al Universo

Parámetro	Valor	Descripción
<b>Parámetros básicos</b>		
$H_0$	$73.2^{+2.4}_{-3.2} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$	parámetro de Hubble
$\Omega_b$	$0.0444^{+0.0042}_{-0.0035}$	Densidad bariónica
$\Omega_m$	$0.266^{+0.025}_{-0.040}$	Densidad total de materia (bariones + materia oscura)
$\tau$	$0.079^{+0.029}_{-0.032}$	camino óptico hasta la reionización
$A_s$	$0.813^{+0.042}_{-0.052}$	Amplitud de fluctuación escalar
$n_s$	$0.948^{+0.015}_{-0.018}$	Índice espectral escalar
<b>Parámetros Derivados</b>		
$\rho_0$	$0.94^{+0.06}_{-0.09} \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3$	Densidad crítica
$\Omega_\Lambda$	$0.732^{+0.040}_{-0.025}$	Densidad de energía oscura
$z_{\text{ion}}$	$10.5^{+2.6}_{-2.9}$	Desplazamiento al rojo de la reionización
$\sigma_8$	$0.772^{+0.036}_{-0.048}$	Amplitud de fluctuación de galaxias
$t_0$	$13.73^{+0.13}_{-0.17} \times 10^9 \text{ años}$	Edad del universo

# Supernovas Ia

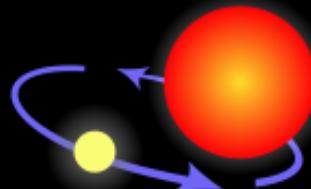


# “Velas estándares”

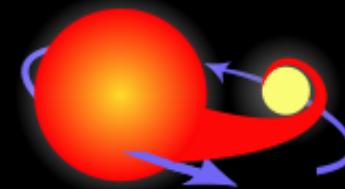
## The progenitor of a Type Ia supernova



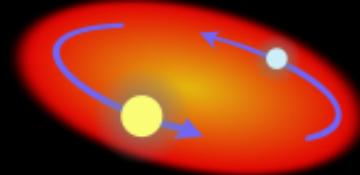
Two normal stars are in a binary pair.



The more massive star becomes a giant...



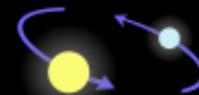
...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.



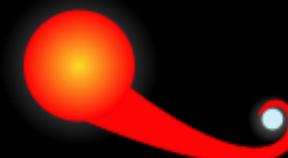
The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral toward within a common envelope.



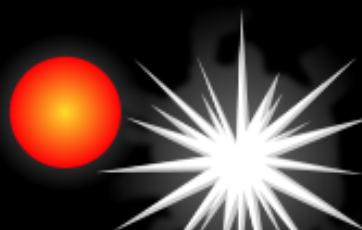
The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



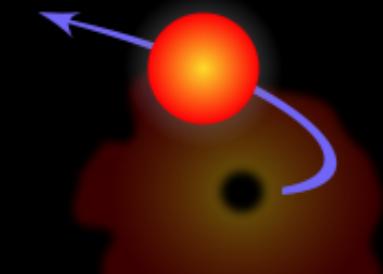
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.

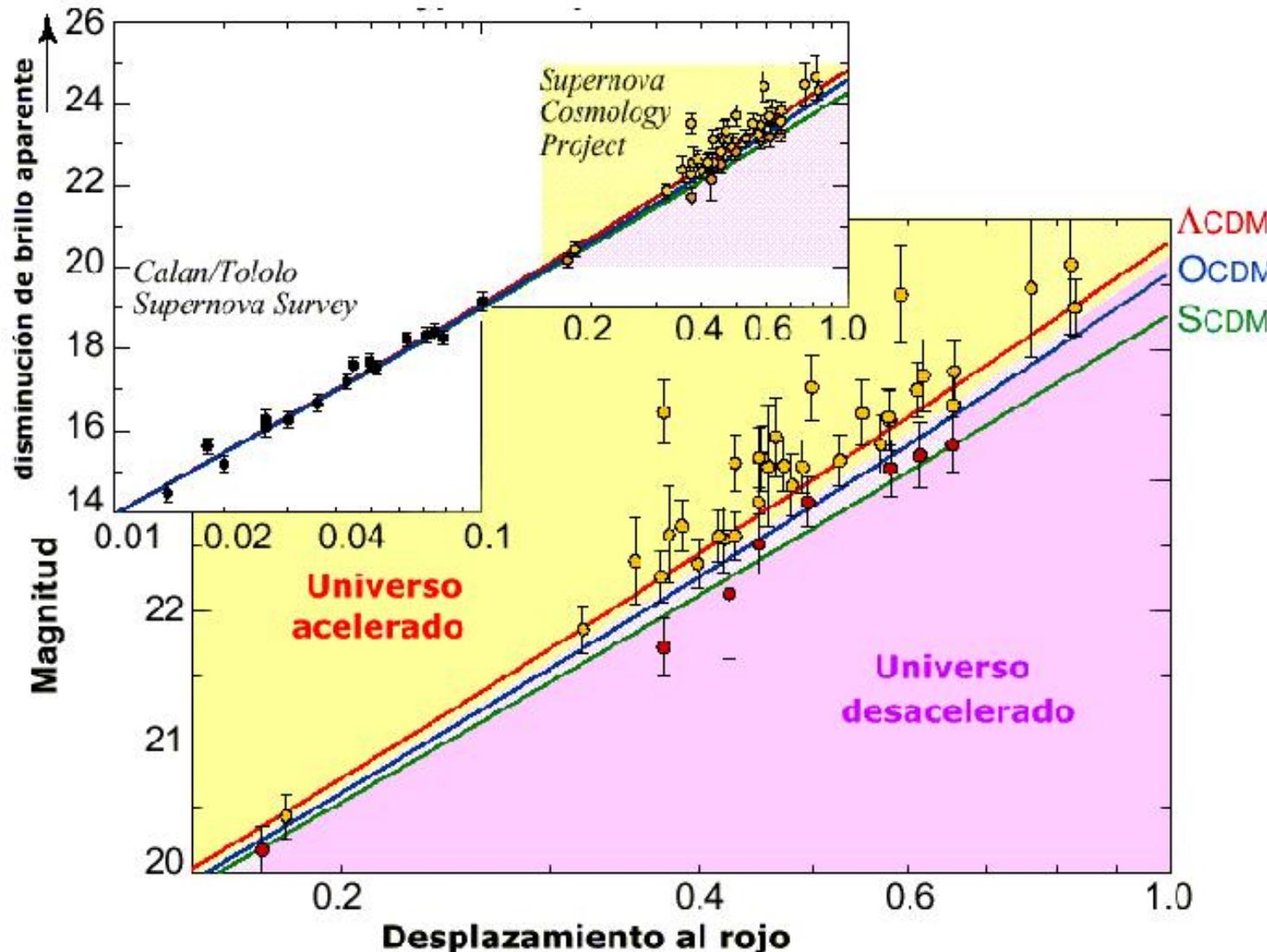


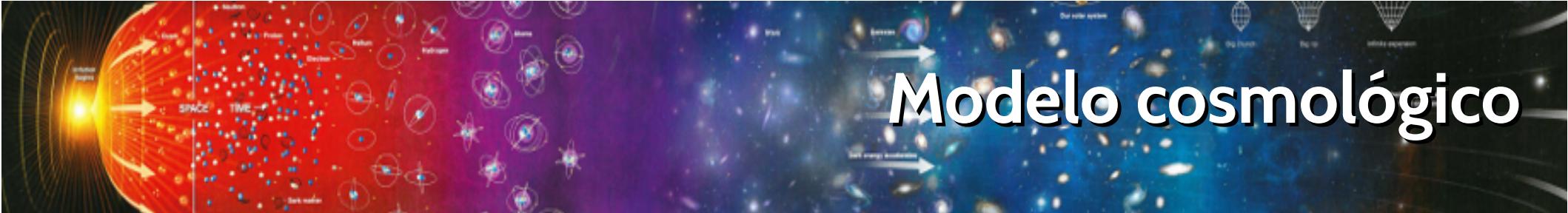
The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...



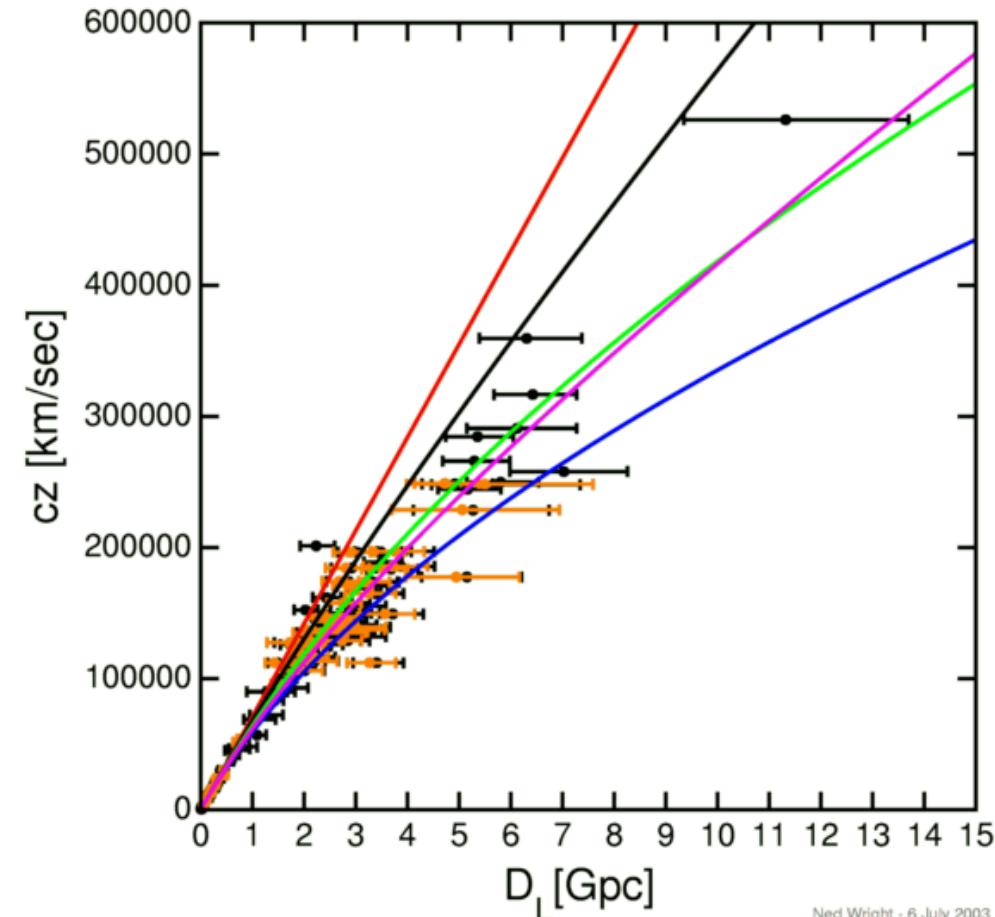
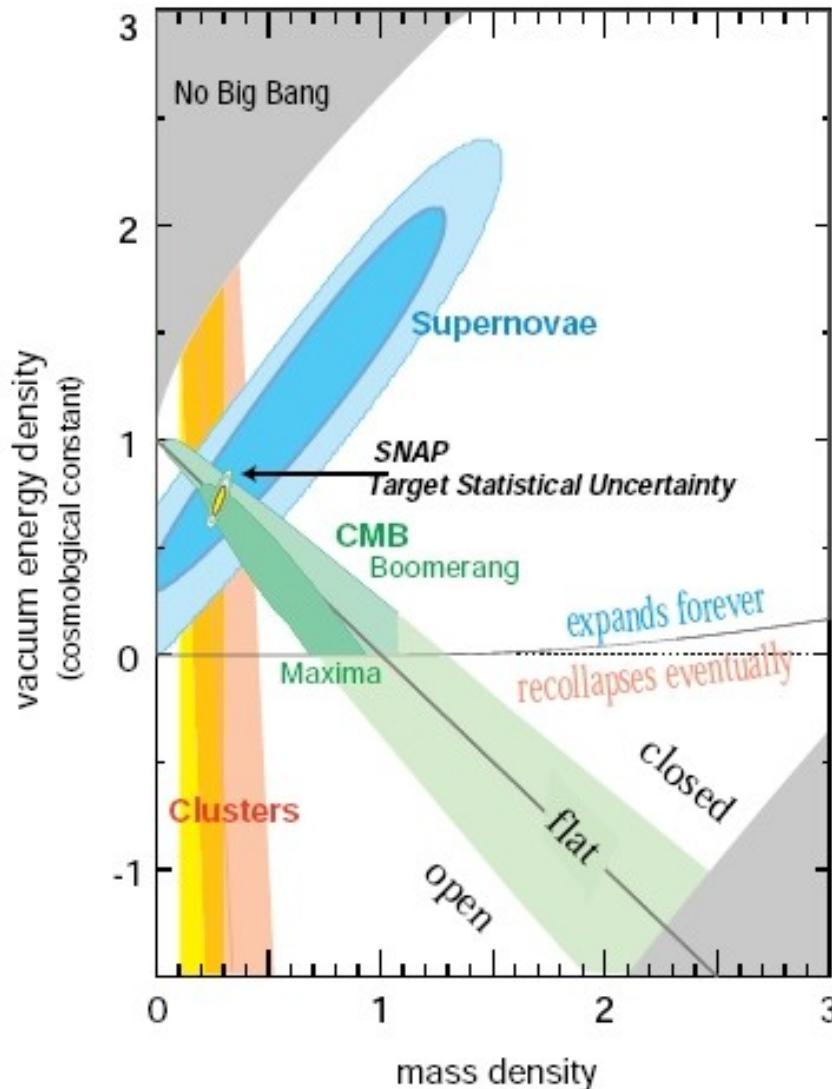
...causing the companion star to be ejected away.

# Expansión acelerada





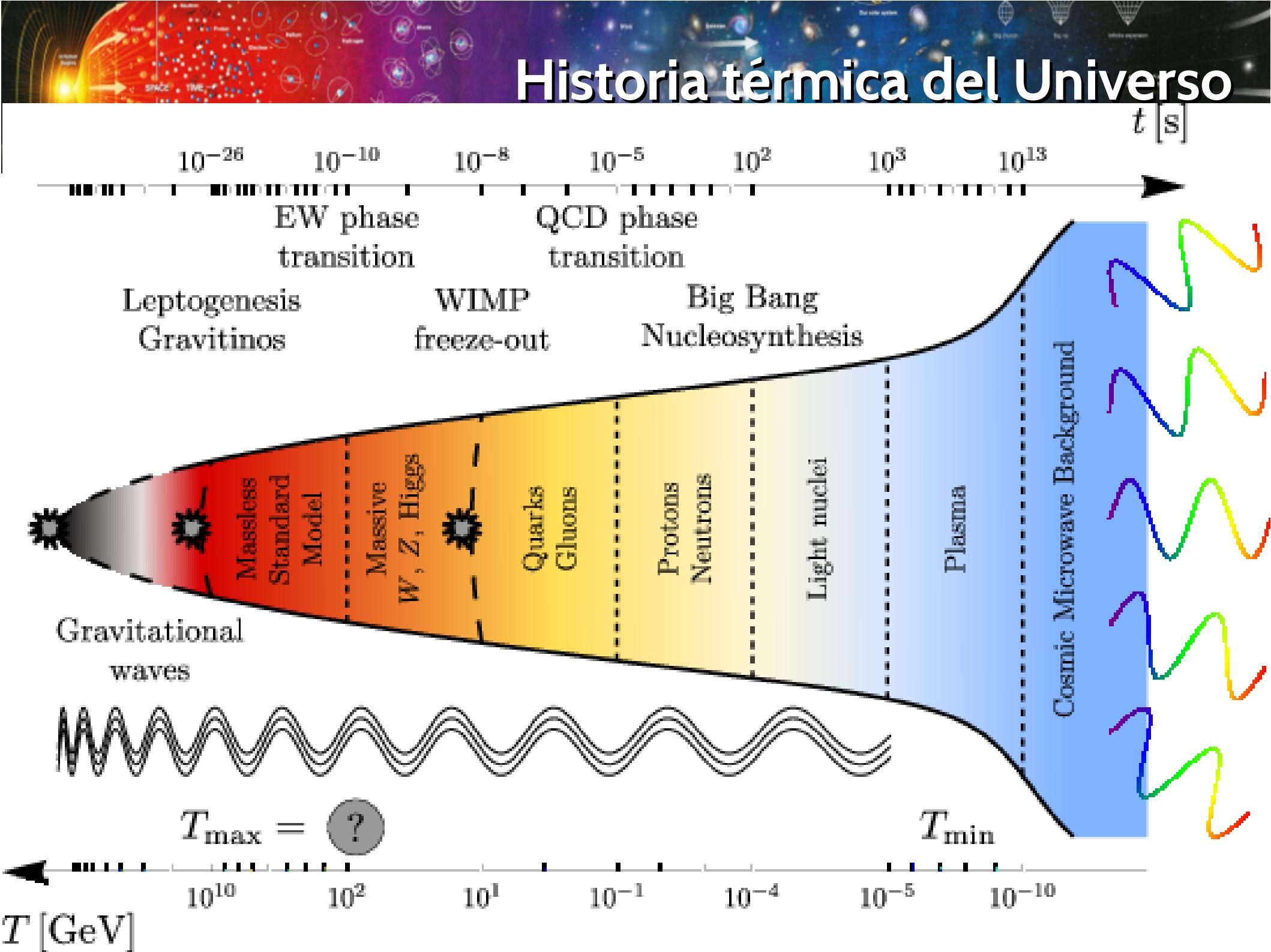
# Modelo cosmológico



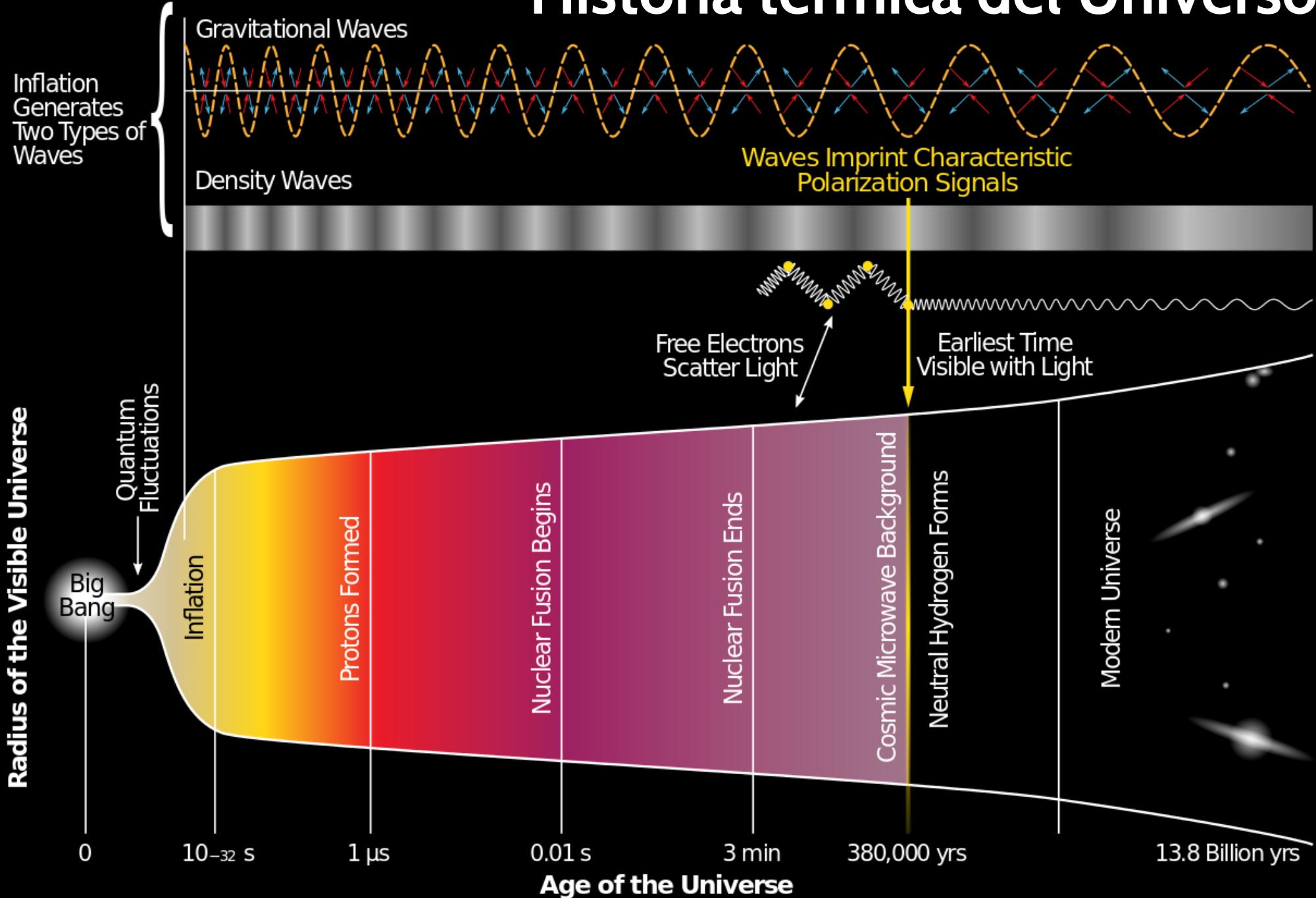
# Bienvenidos al lado oscuro



# Historia térmica del Universo



# Historia térmica del Universo



# Historia térmica del Universo

Época	Tiempo	Redshift	Temp.	Descripción
Planck	$<10^{-43}$ s	→ infinito	$>10^{32}$ K	La física actual no es capaz de predecir los sucesos en esta época
Gran Unificación	$<10^{-36}$ s	→ infinito	$>10^{29}$ K	Unificación global de las fuerzas de interacción
Inflación y Electrodébil	$<10^{-36}$ s	→ infinito	$>10^{28}$ K → $10^{22}$ K	Expansión exponencial del Universo (Inflación) por un factor $10^{26}$ . La temperatura baja $10^6$ en $10^{-33}$ s. Se separa la fuerza fuerte de la electrodébil
Quarks	$>10^{-12}$ s	→ infinito	$>10^{12}$ K	QGP (Quark gluon plasma). Aún no hay hadrones, aunque las interacciones ya están separadas
Hadrones	$10^{-6}$ s → 1 s	→ infinito	$10^{10}$ K – $10^9$ K	Se forman los hadrones (bariones y mesones). Protones, neutrones, ...
Leptones	1 s → 10 s	→ infinito	$10^9$ K	Leptones, antileptones y fotones en equilibrio térmico (creación de pares)

# Historia térmica del Universo

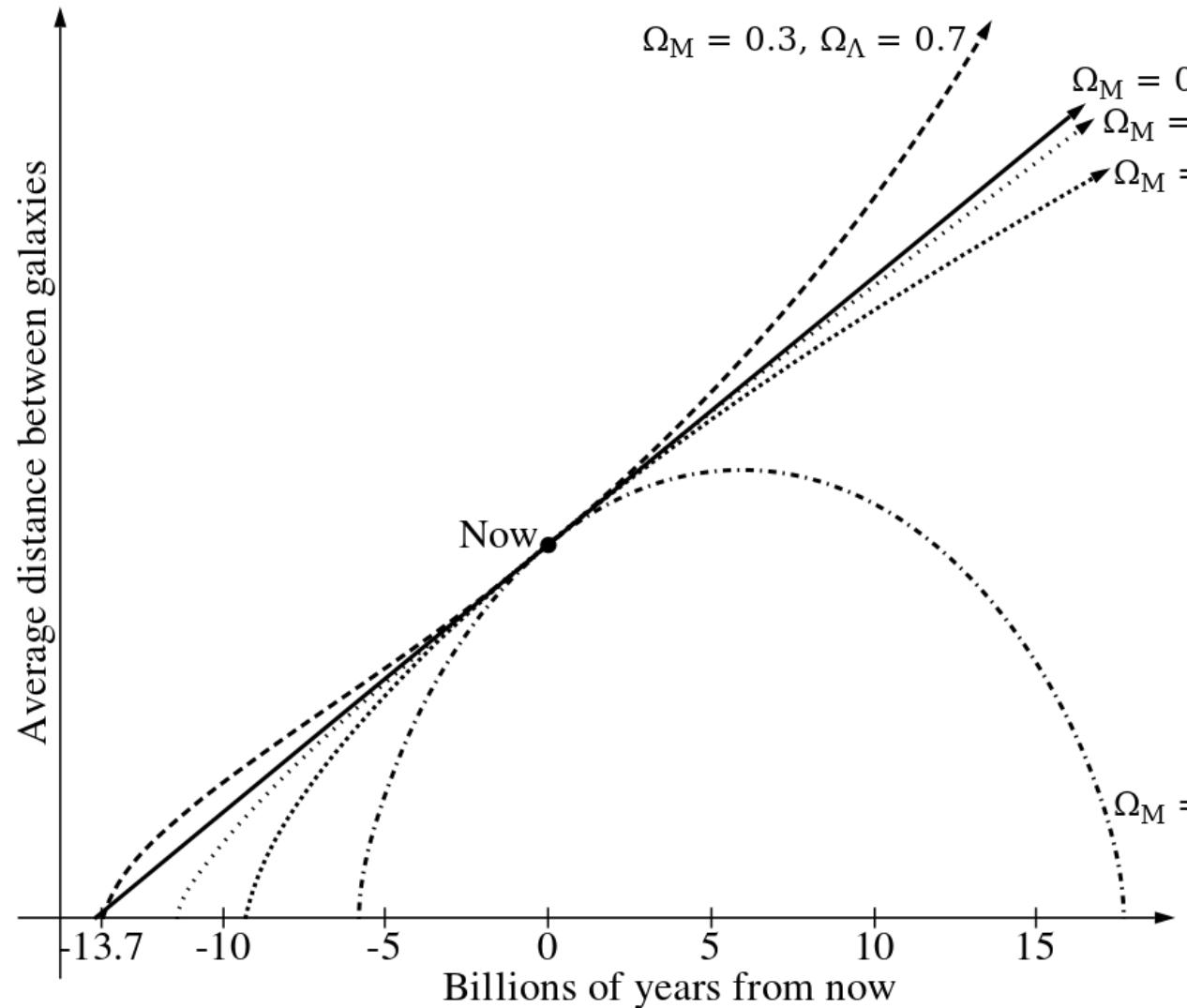
Época	Tiempo	Redshift	Temp.	Descripción
Nucleo-síntesis	$10 \text{ s} - 10^3 \text{ s}$		$10^{11} \text{ K} - 10^9 \text{ K}$	Se forman los primeros núcleos
Fotones	$10 \text{ s} - 10^{13} \text{ s}$		$10^9 \text{ K} - 10^3 \text{ K}$	El universo es un plasma de núcleos, electrones y fotones
Era de Materia	<b>47 kA – 10 GA</b>	<b>3400 – 0.4</b>	<b><math>10^4 \text{ K} - 4 \text{ K}</math></b>	<b>La densidad de energía total está dominada por los componentes de materia → desaceleración de la expansión</b>
Recombinación	380 kA	01100	4000 K	Se forman los primeros átomos simples al combinarse protones con electrones (H, He, Li) Los fotones dejan de estar en equilibrio térmico, y el universo se vuelve transparente → CMB
Edades oscuras	380 kA – 150 MA	1100 - 20	4000 K – 60 K	Hay átomos pero aún no se forman las primeras estrellas

# Historia térmica del Universo

Época	Tiempo	Redshift	Temp.	Descripción
Era Estelar	150 MA - 100 GA	20 - (-1) (z=0 hoy)	60 K - 0,03 K	Formación de las estrellas de la 3ra población hasta el cese de formación estelar
Reionización	150 MA - 1 GA	20 - 6	60 K - 19 K	La radiación estelar reioniza la materia
Galaxias	1 GA – 10 GA	6 – 0.4	19 K – 4 K	Se forman las galaxias y empiezan a agruparse en clusters de complejidad creciente
Energía Oscura	> 10 GA	< 0.4	< 4 K	La expansión es dominada por la energía y no la materia. Comienza la expansión acelerada. Se forma el sistema Solar.
Hoy	13.8 GA	0	2.7 K	Usted está aquí
Futuro lejano	> 100 GA	<(-1)	< 0.1 K	El Universo se oscurece más y más a medida se expande aceleradamente. Las estrellas mueren pero se dificulta la formación de nuevas.

# Historia térmica del Universo

## El futuro



- **Big crunch ( $\Omega > 1$ )**: la gravedad eventualmente domina la expansión hasta el colapso gravitatorio
- **Big Bounce**: big bang luego del big crunch
- **Big Rip**: si la densidad de la energía oscura aumenta, entonces la aceleración es cada vez mayor → ruptura del espacio tiempo
- **Abierto ( $\Omega < 1$ )**: la expansión continúa para siempre
- **Plano ( $\Omega = 1$ )**: la expansión continúa para siempre, pero en forma desacelerada ( $v=0$  a  $t=\infty$ )



¡Gracias! ¡Nos vemos pronto!  
(en el final...)

*That's all Folks!*