Universidad Nacional de Río Negro
Int. Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2019

- **Unidad** 04 – El Big Bang
- **Clase** U04 C01
- **Fecha** 19 Nov 2019
- **Cont** Universo en expansión
- **Cátedra** Asorey

Contenidos: un viaje en el tiempo

Unidad 4
El Big Bang
Allá lejos y hace tiempo

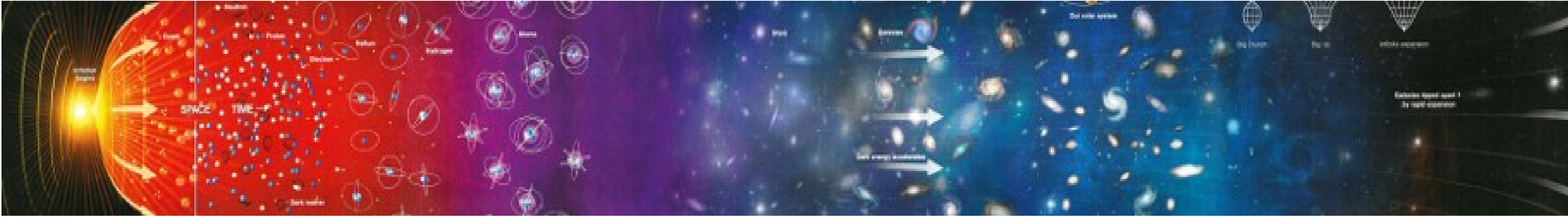
Unidad 3
Cosmología
No es lo que se ve
Sino lo que se palpa

Unidad 2
Astrofísica
Cálido y frío

Unidad 1
Partículas 1
todo es relativo

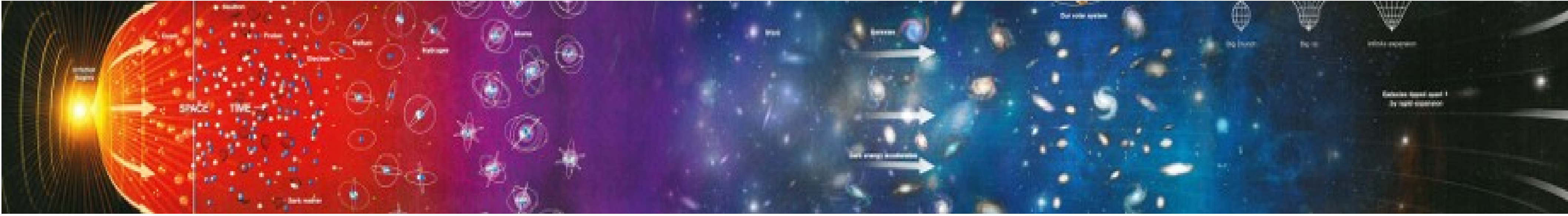
Relatividad general

- Charlamos sobre la relatividad general y la curvatura del espacio tiempo



- Entonces….

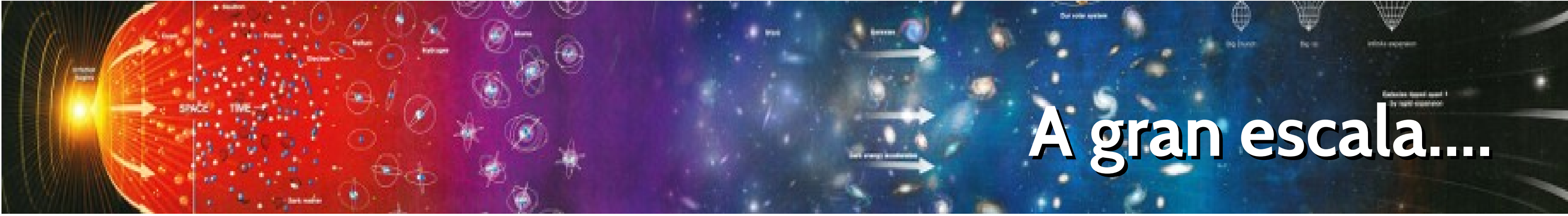
¿Cuál es la fuerza **más fuerte** de la Naturaleza?



- Entonces....

¿Cuál es la fuerza **más fuerte** de la Naturaleza?

Gravedad

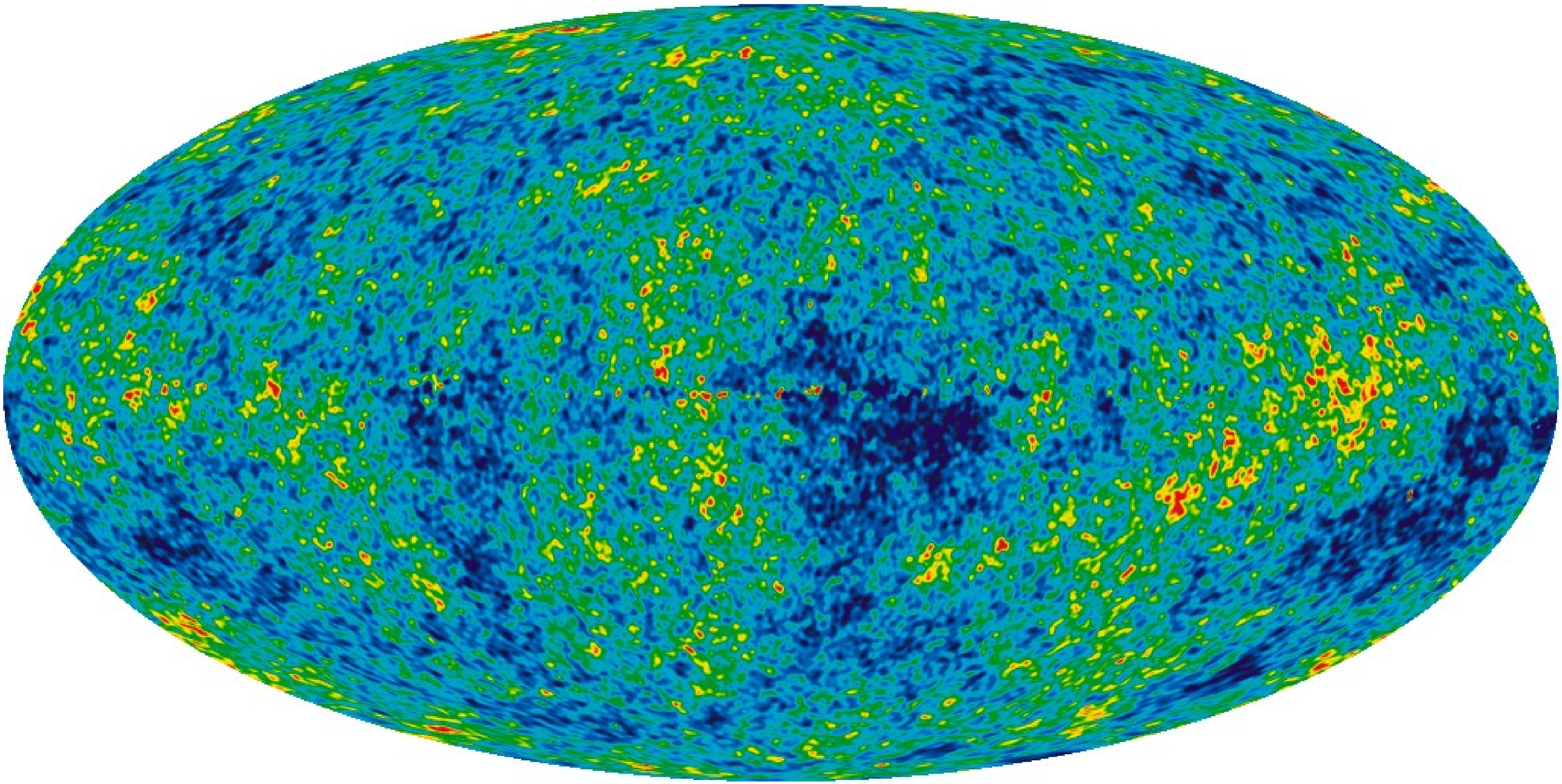


A gran escala....

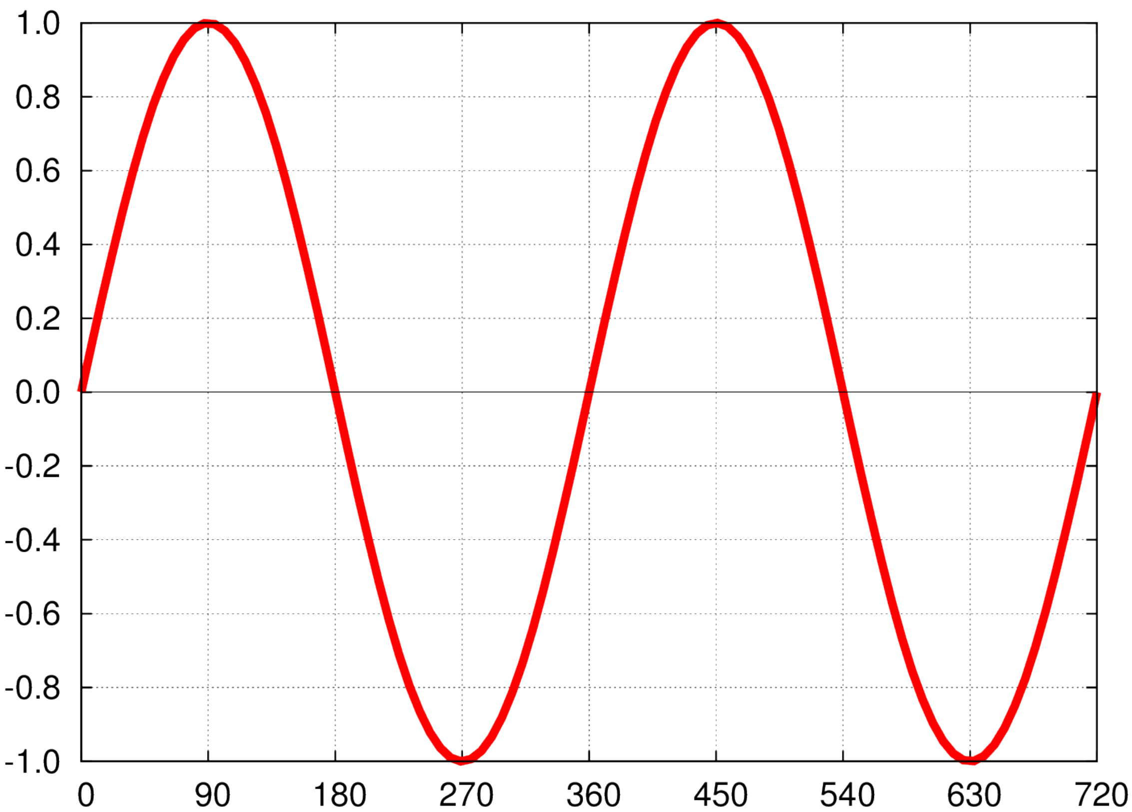
- … la expansión del Universo compensa la gravedad
- ¿Qué pasará a escalas más pequeñas?
- Las inhomogeneidades grumos se agrupan y crecen
- Se necesita más tiempo para formar grumos más grandes

Nestun, con grumos

A las escalas más grandes...



Propiedades de una onda



- λ: longitud de onda
- f: frecuencia
- **$c = \lambda \times f$**
- Ondas EM (luz):
- **$E = h f = h c / \lambda$**

  $c = 3\text{x}10^{8}$ m/s

  $h = 6.6261\text{x}10^{-34}$ Js

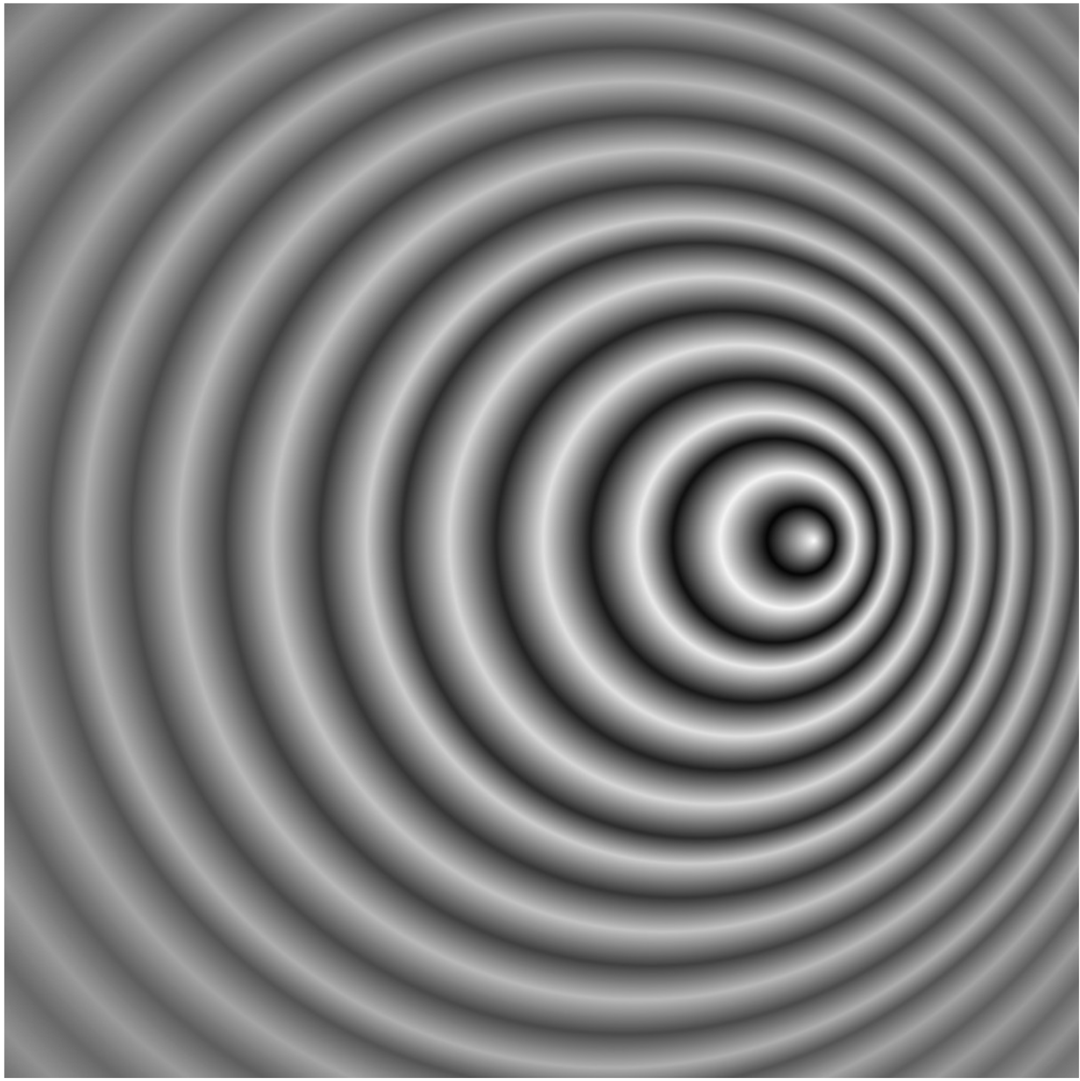
Efecto Doppler

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

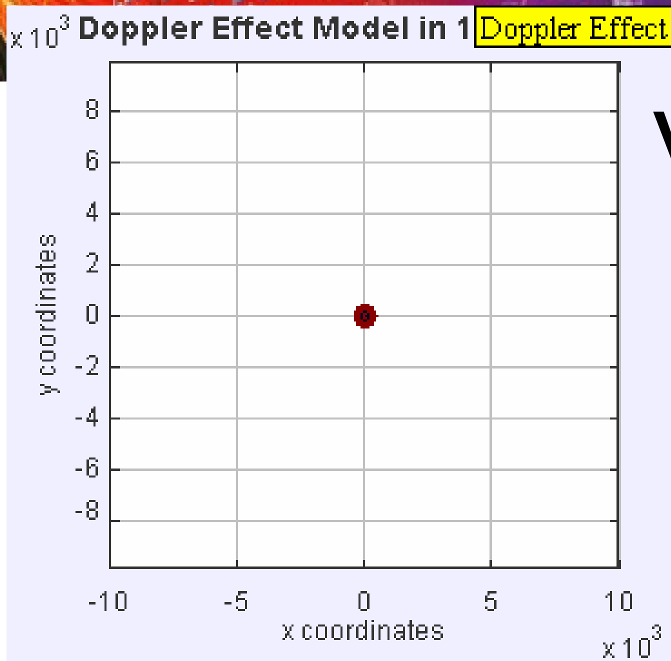
Dr. Sheldon Cooper

Efecto Doppler en la luz

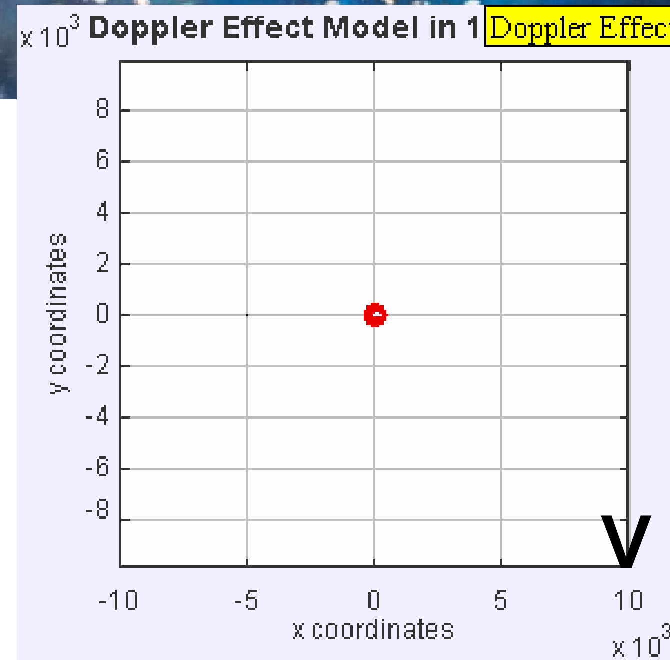
- Pensar en el lanzamiento de pelotas a frecuencia constante
- El efecto doppler es un fenómeno ondulatorio



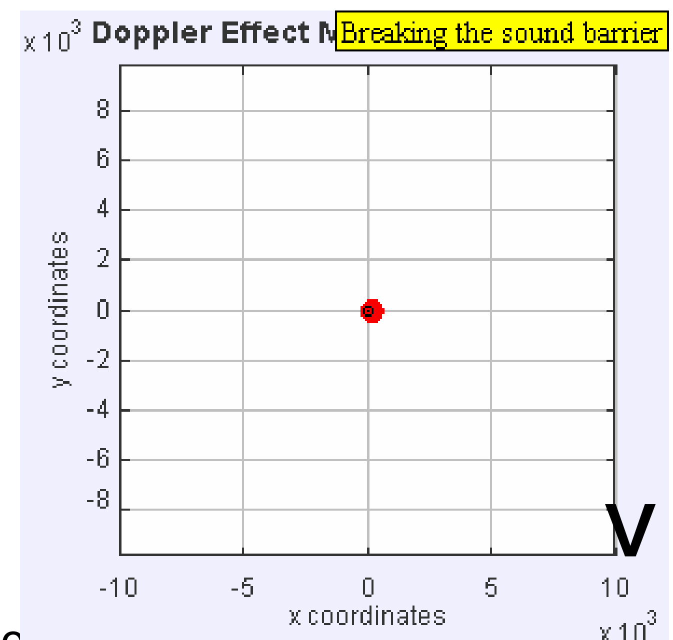
Efecto Doppler



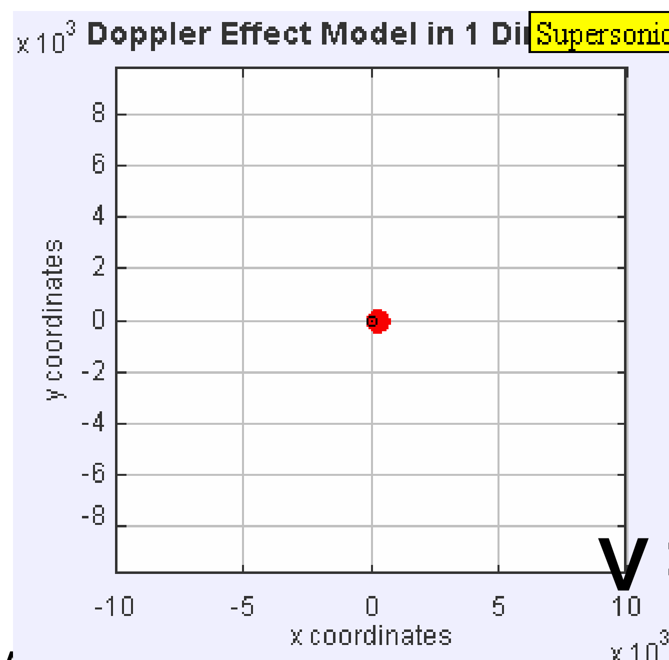
$v = 0$



$v = 0{,}7\, v_s$



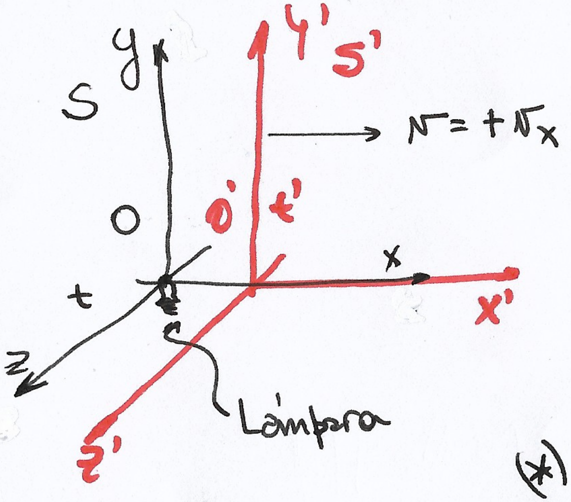
$v = 1\, v_s$



$v = 1{,}4\, v_s$

Doppler relativista

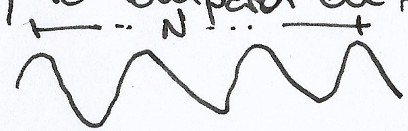
Sean dos Observadores en sistemas S y S':



Vínculos:

a $t = t' = 0$; $O = O'$

En ese momento, la lámpara emite un pulso de luz con N ondas



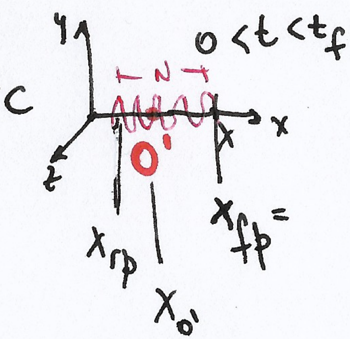
En el frame S, el observador O registra el pulso comienza $t = t_0 = 0$ y

(*) finaliza a $t = t_f$. Luego, la frecuencia emitida es

$$f_0 = N/t_f - t_0 \Rightarrow \boxed{f_0 = N/t_f}$$

Definamos dos eventos: 1: el frente del pulso alcanza O' (visto desde O) x_1, t_1

2: el final del pulso alcanza O' (visto desde O). x_2, t_2



Evento 1: Visto en S, ocurre a $t_1 = 0$; $x_1 = 0$

Evento 2: Visto en S, el pulso avanza sobre el Observador O', ya que $v < c$

$\Rightarrow$ El frente del pulso está en $x_{fp} = ct$; $x_{O'} = vt$

y la retaguardia del pulso en $x_{rp} = 0$ a $t = t_f$ (ver *)

Cuando $t = t_2 \Rightarrow x_{rp} = x_{O'} \Rightarrow x_{rp} = c\underbrace{(t_2 - t_f)}$

es el tiempo desde que la retaguardia estaba en el origen hasta que alcanza al Obs. O'

y además $x_{O'} = v t_2$

Luego el evento 2 ocurre cuando $\boxed{x_{O'} = x_{rp}}$

Doppler relativista

$\Rightarrow \quad x_{0'} = x_{rp} \Rightarrow v t_2 = c(t_2 - t_f) \Rightarrow t_2 = \dfrac{c\,t_f}{(c-v)}$

$\Rightarrow$ Evento 1: $x_1 = 0$; $t_1 = 0$; Evento 2: $x_2 = v t_2$, $t_2 = \dfrac{c\,t_f}{(c-v)}$

Las T.L. $x' = \gamma(x - vt)$ y $t' = \gamma(t - vx/c^2)$

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

Evento 2: $x_2' = \gamma(v t_2 - v t_2) = 0$ y $t_2' = \gamma\left(t_2 - \dfrac{v^2}{c^2} t_2\right) = t_2 \gamma (1 - \beta^2) = \dfrac{t_2 \gamma}{\gamma^2} = \dfrac{t_2}{\gamma}$

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

Luego, recordando $t_2 = \dfrac{c\,t_f}{(c-v)} \Rightarrow t_2' = \dfrac{c\,t_f}{(c-v)\gamma} = \dfrac{\cancel{c}\,t_f}{\cancel{c}(1-\beta)\gamma} = \dfrac{t_f \sqrt{1-\beta^2}}{(1-\beta)} = \dfrac{t_f \sqrt{1-\beta}\sqrt{1+\beta}}{(1-\beta)}$

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

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

$f_{0'} = N/\Delta t' = \dfrac{N}{t_f}\sqrt{\dfrac{1-\beta}{1+\beta}} \Rightarrow \boxed{f_{0'} = f_0 \sqrt{\dfrac{1-\beta}{1+\beta}}}$

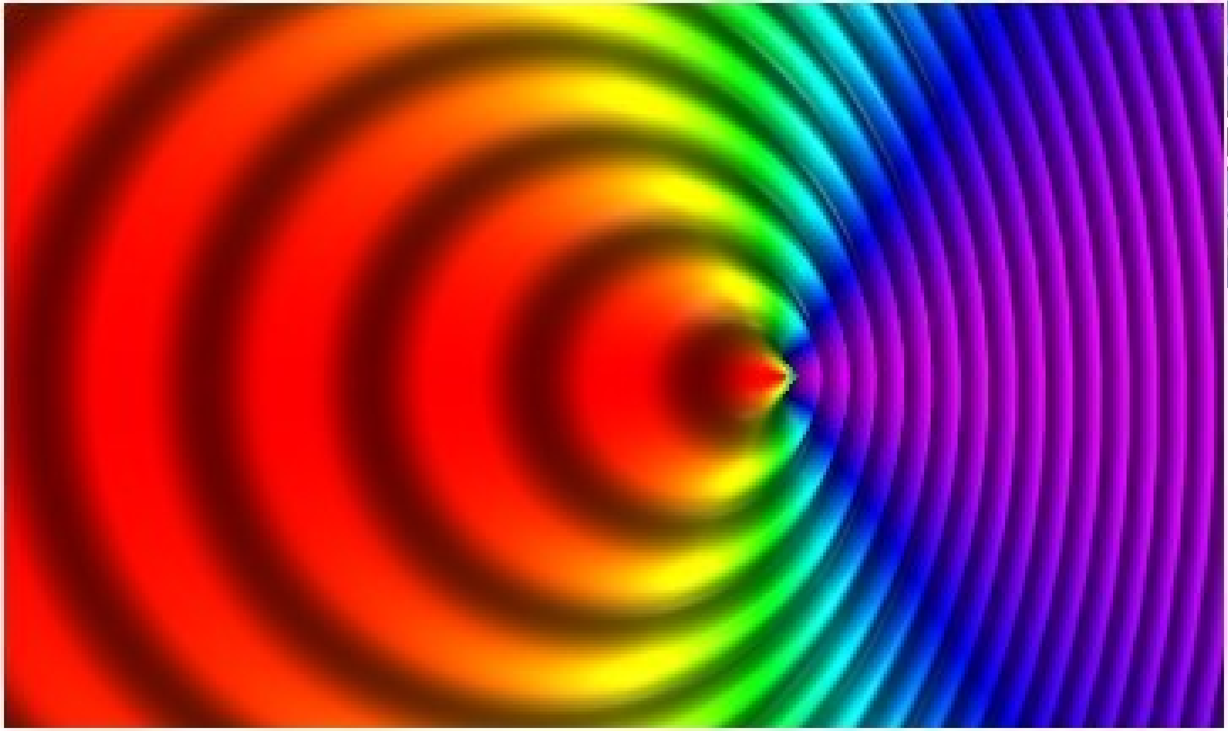
$\dfrac{1-\beta}{1+\beta} < 1 \Rightarrow f_0' < f_0$

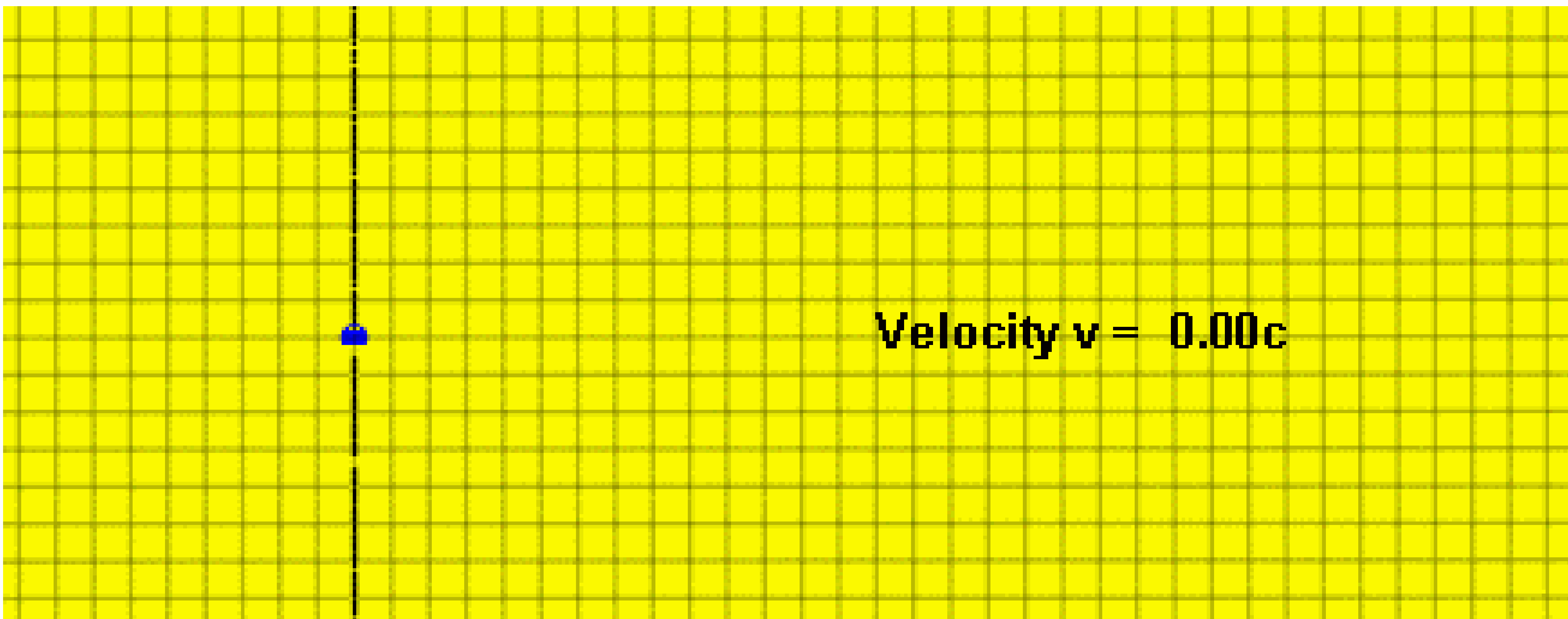
Corrimiento al rojo si se alejan

Si se acercan $\Rightarrow \beta \to -\beta$ (ya que $v = -v_x$) $\Rightarrow$

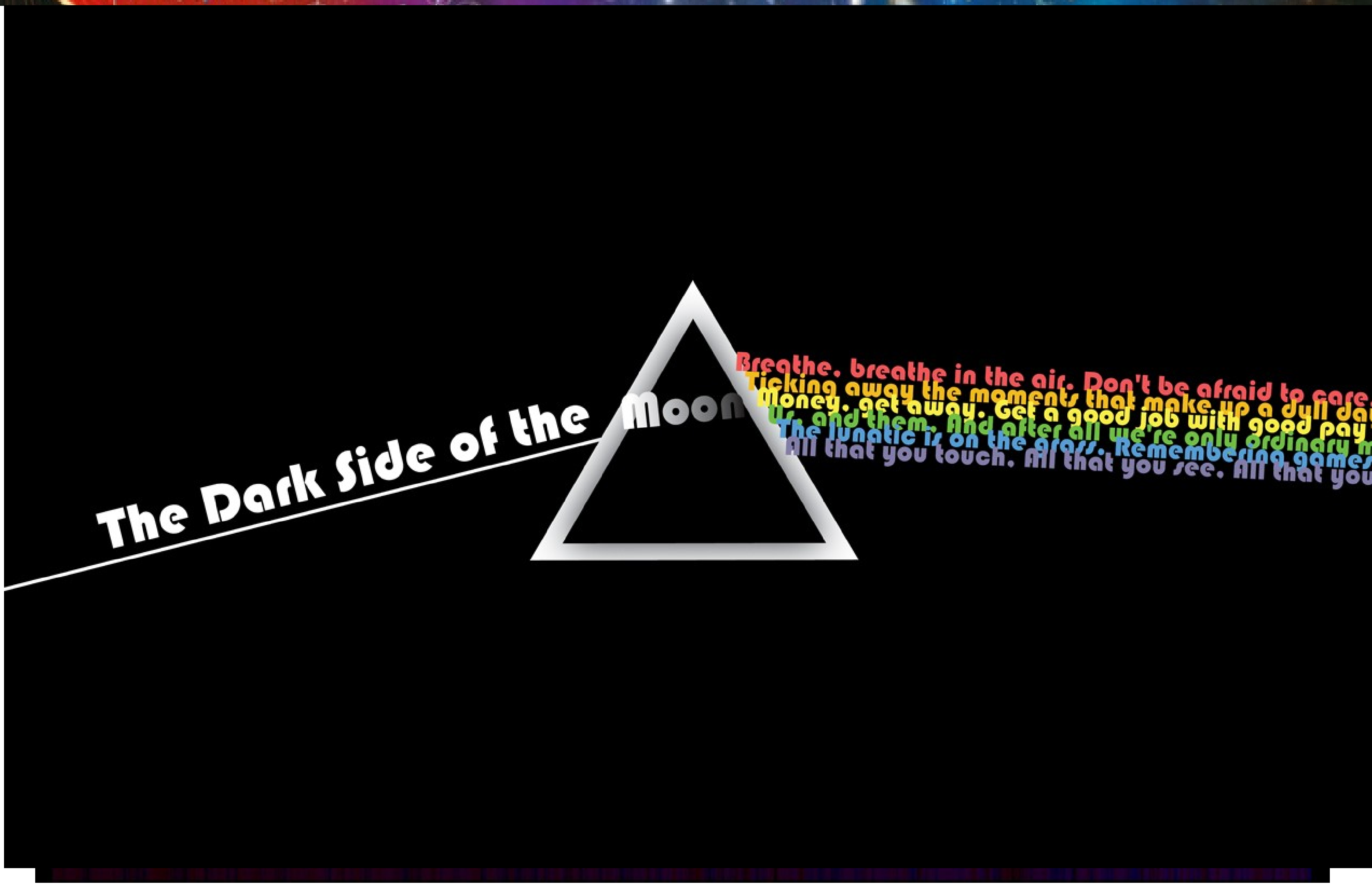
$\boxed{f_{0'} = f_0 \sqrt{\dfrac{1+\beta}{1-\beta}}}$ Corrimiento al azul (fuente y obs. se acercan).

to Doppler relativsta

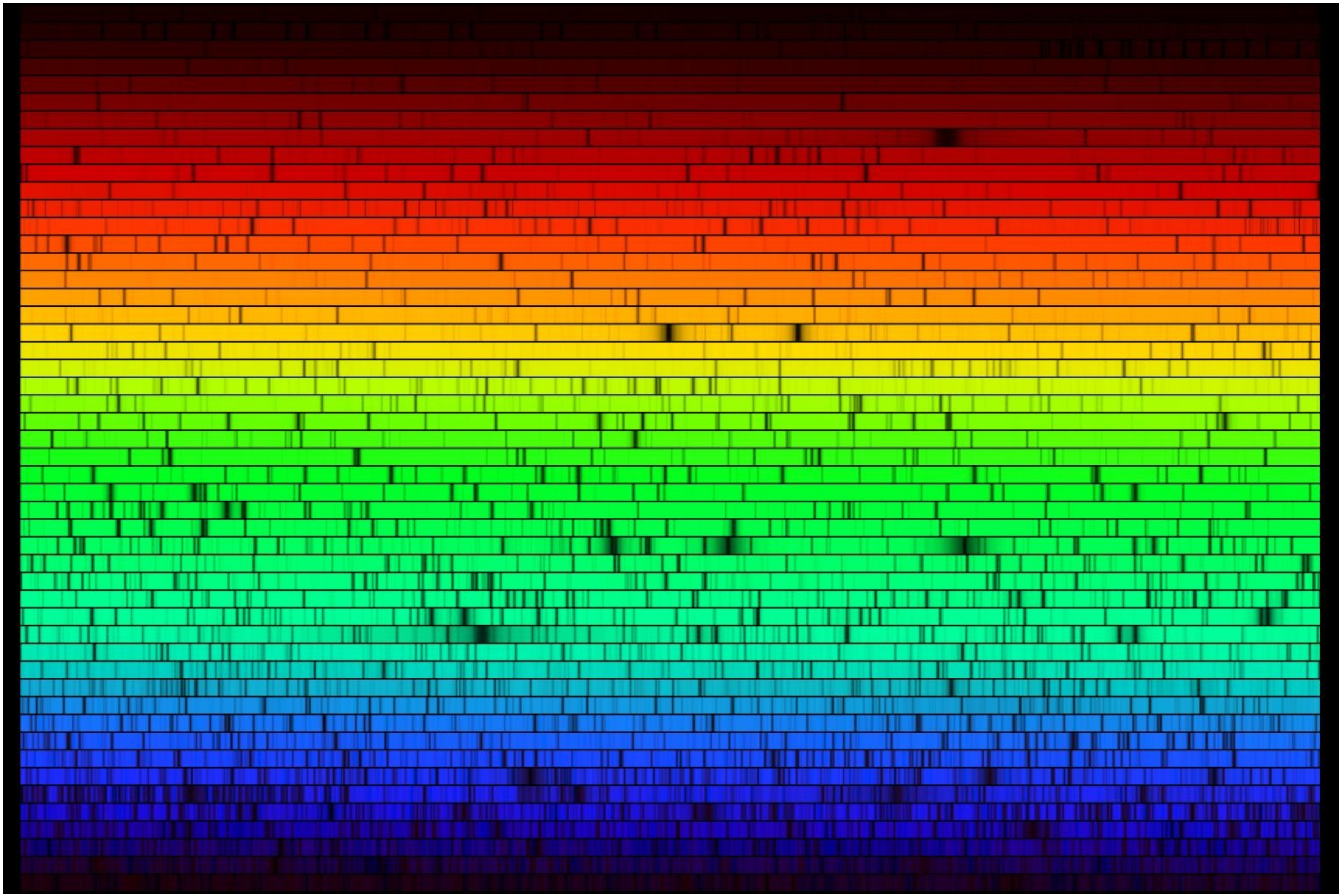


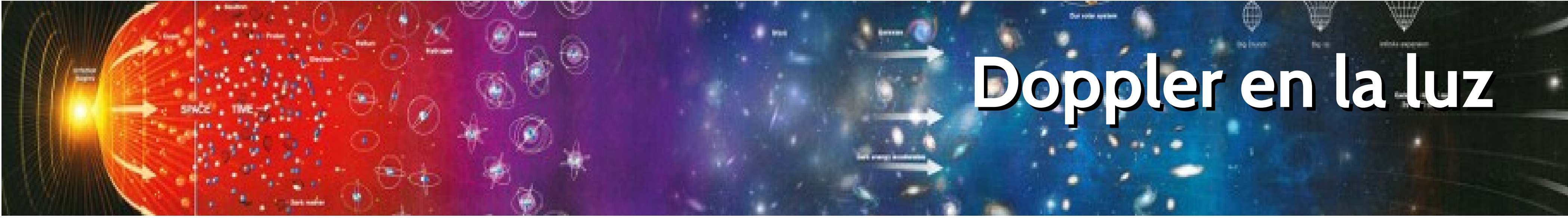


Mirando al Sol con un buen prisma

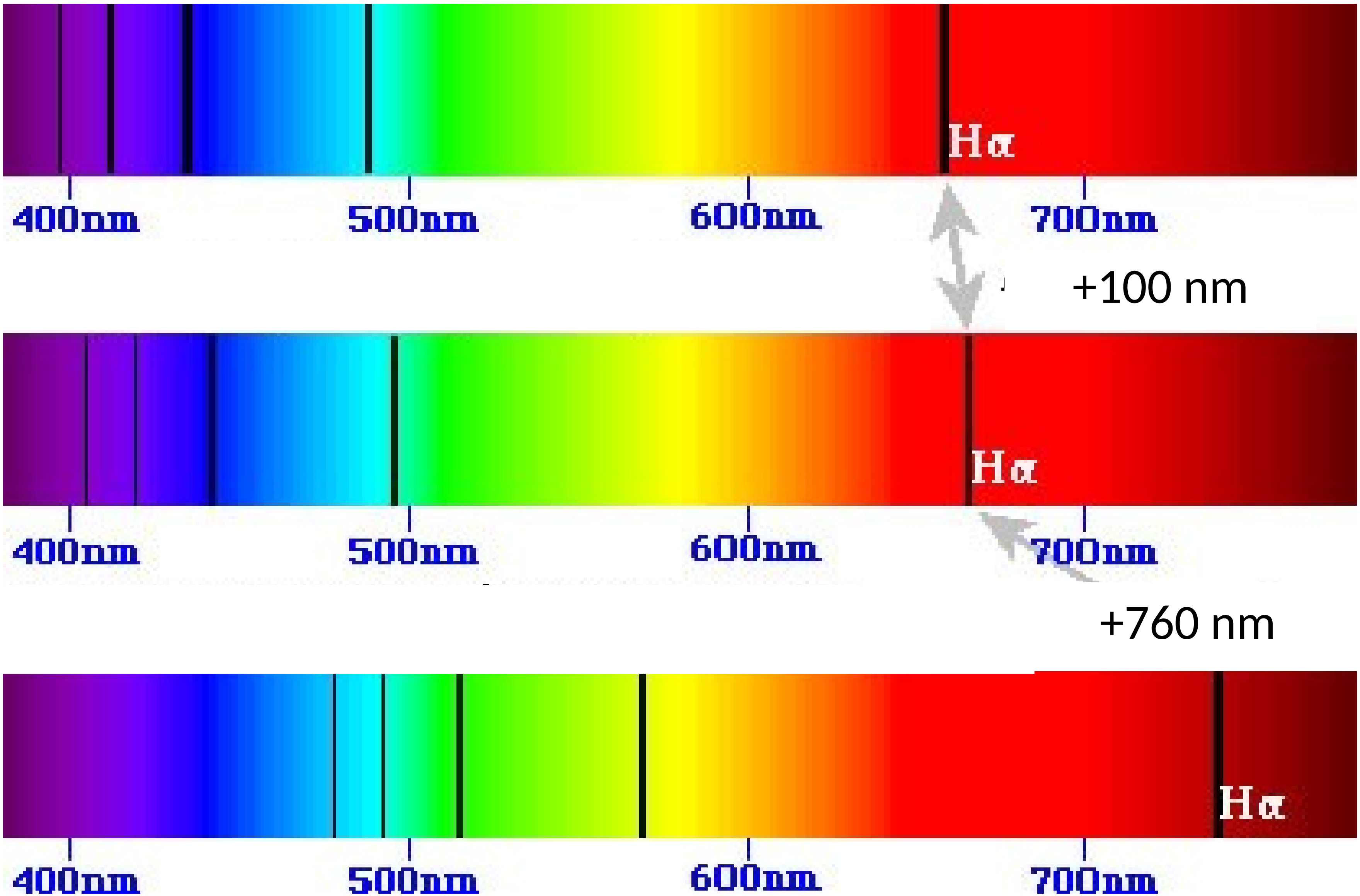


Mirando al Sol con un buen prisma





Doppler en la luz



Corrimiento al rojo

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

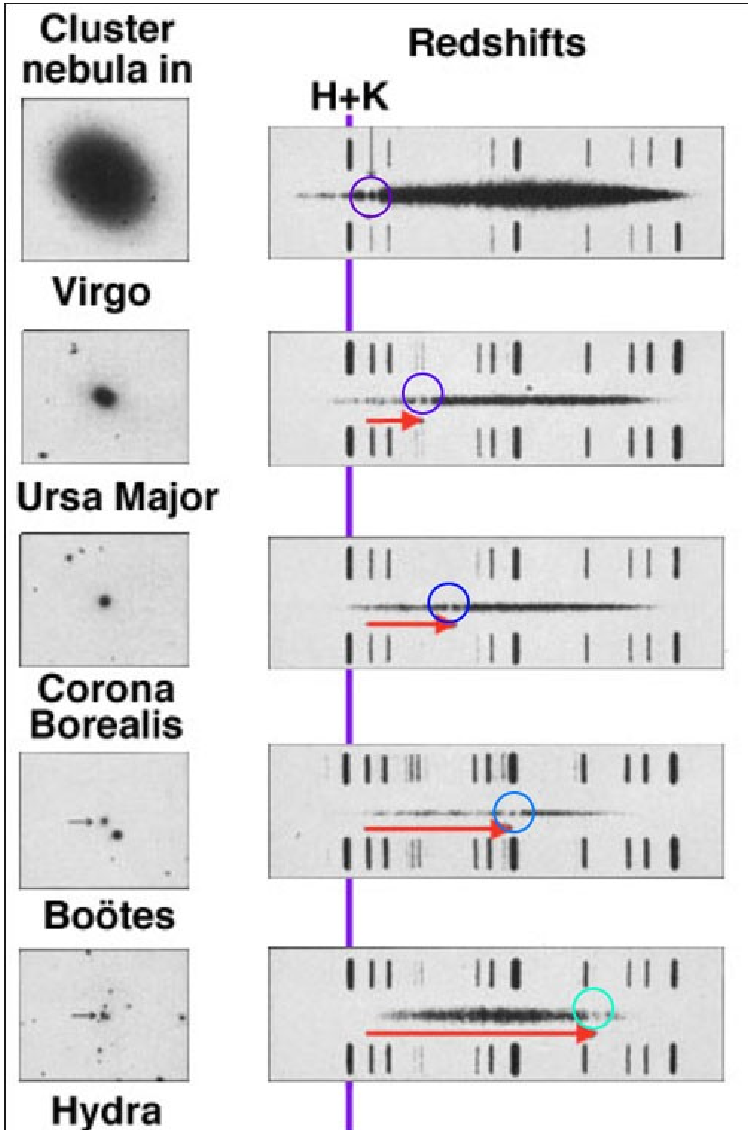
$$\frac{\lambda_o}{\lambda_e}=\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}>1\rightarrow \lambda_o>\lambda_e$$

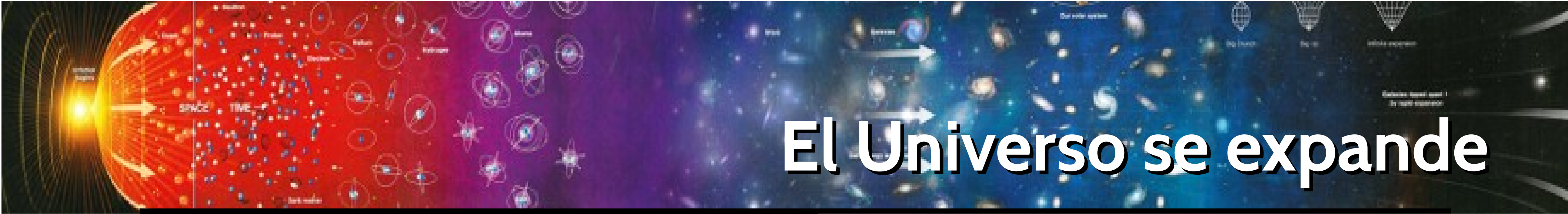
$$\text{Def. } z\equiv\frac{\lambda_o-\lambda_e}{\lambda_e}\Rightarrow 1+z=\frac{\lambda_o}{\lambda_e}=\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

z es el corrimiento al rojo.

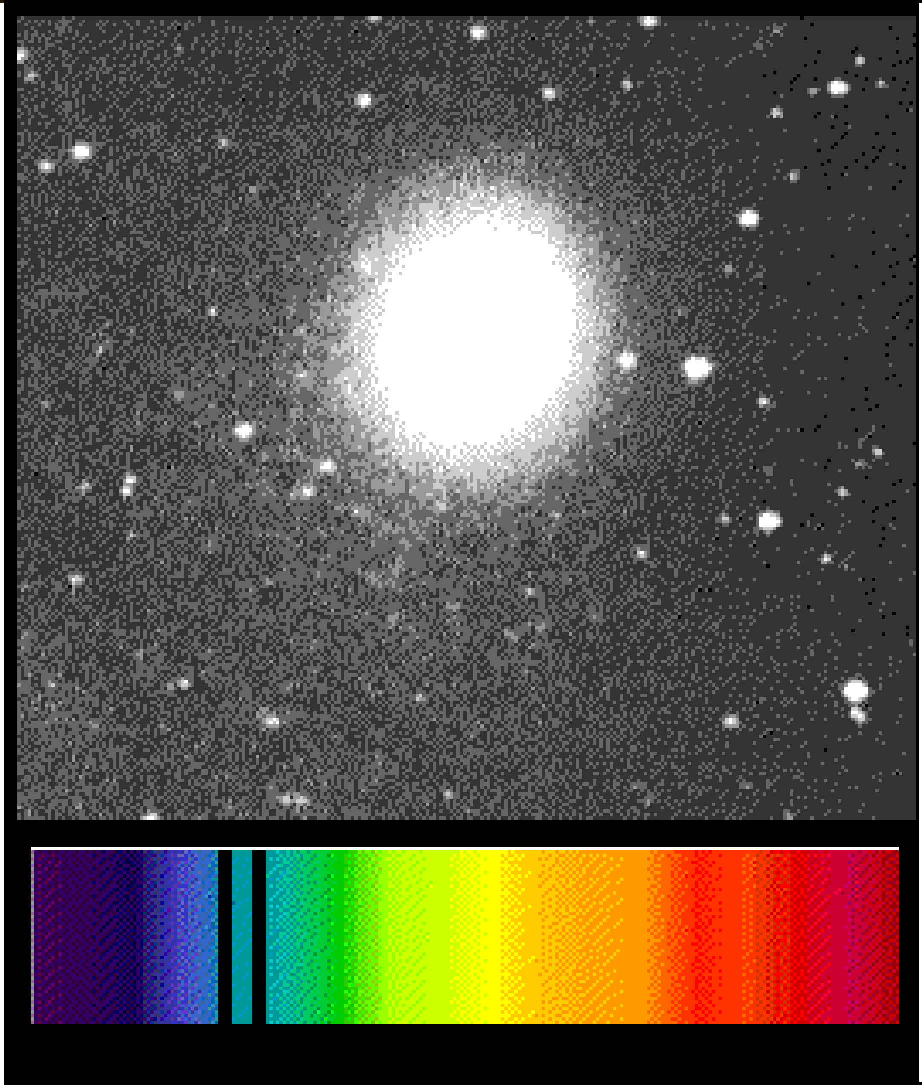
Se puede probar que si $v \ll c$

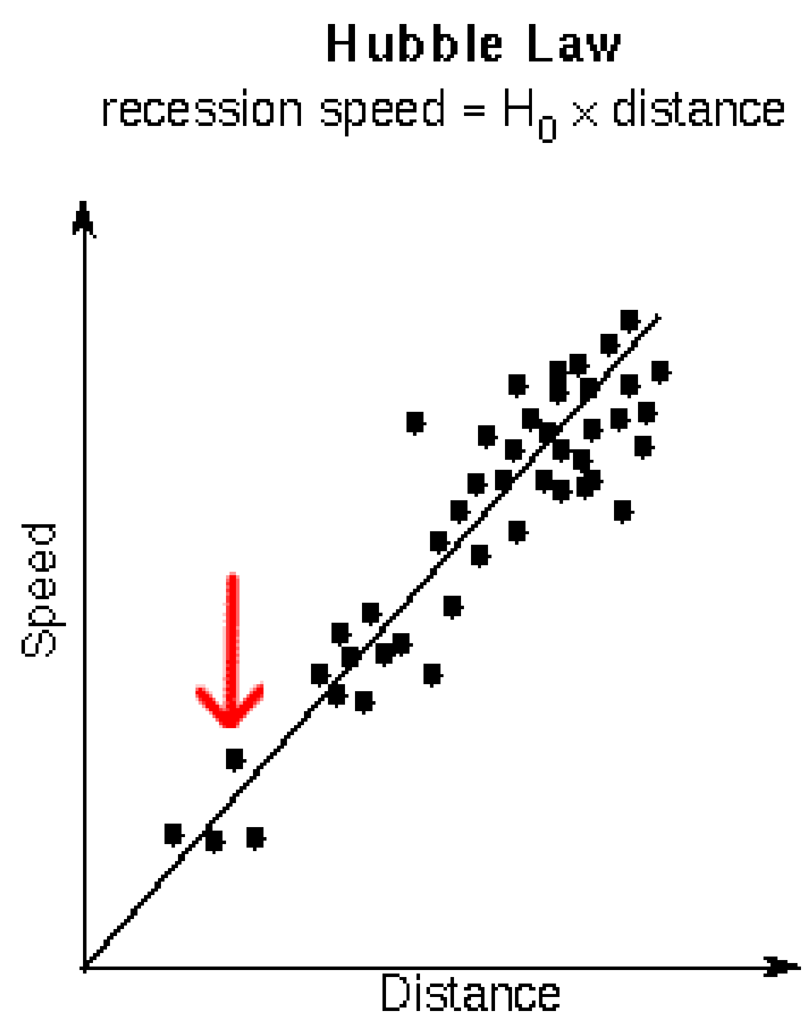
$$z\simeq\beta$$





El Universo se expande



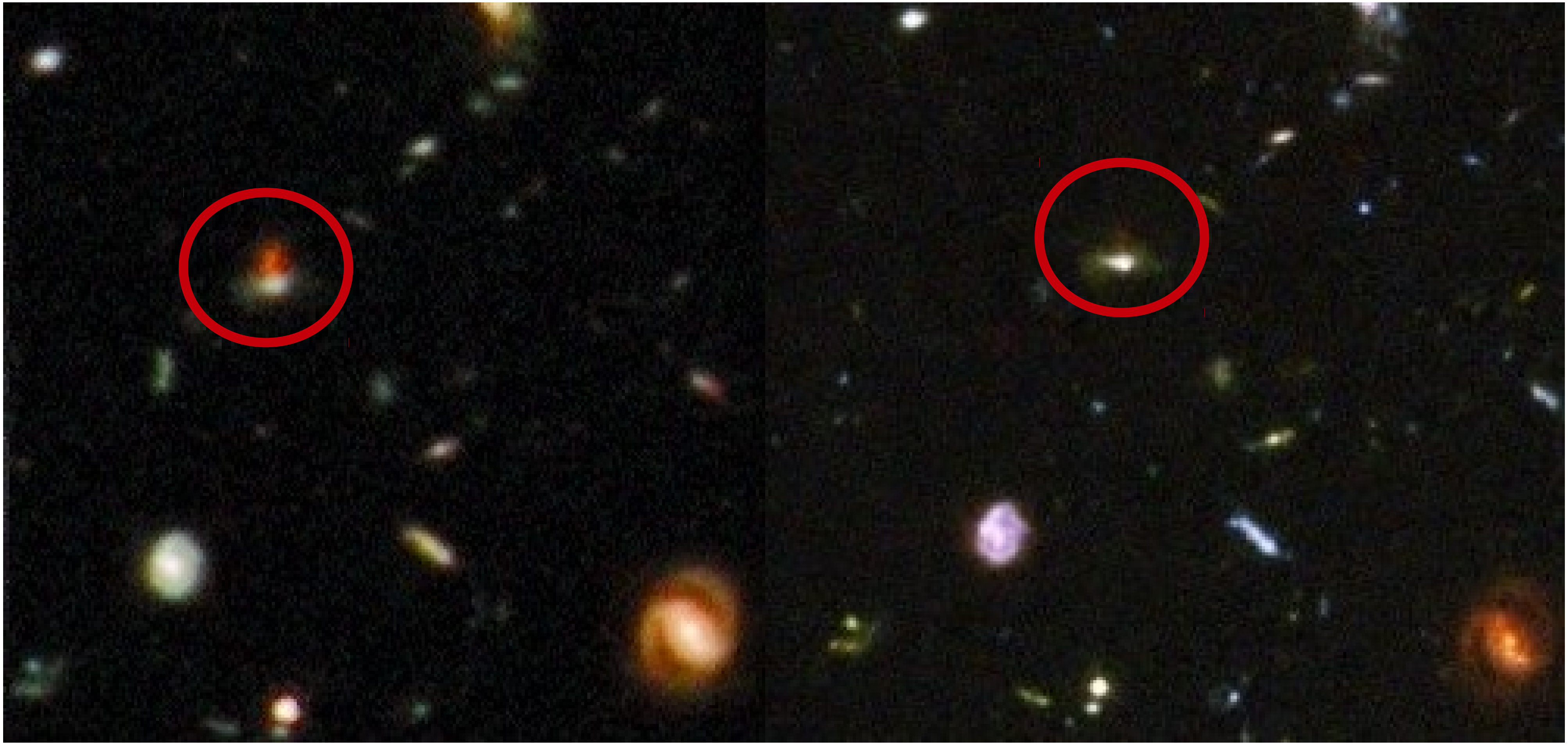


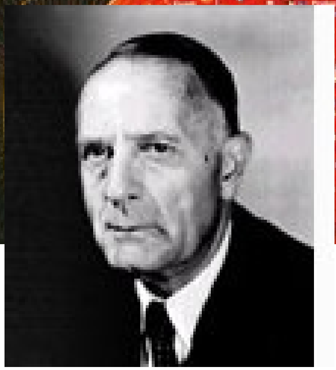
$$V = H_0 \times d \qquad H0 = 67\ \mathrm{km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}}$$

¿y más allá del "rojo"? Encuentre las diferencias

HST, infrarrojo

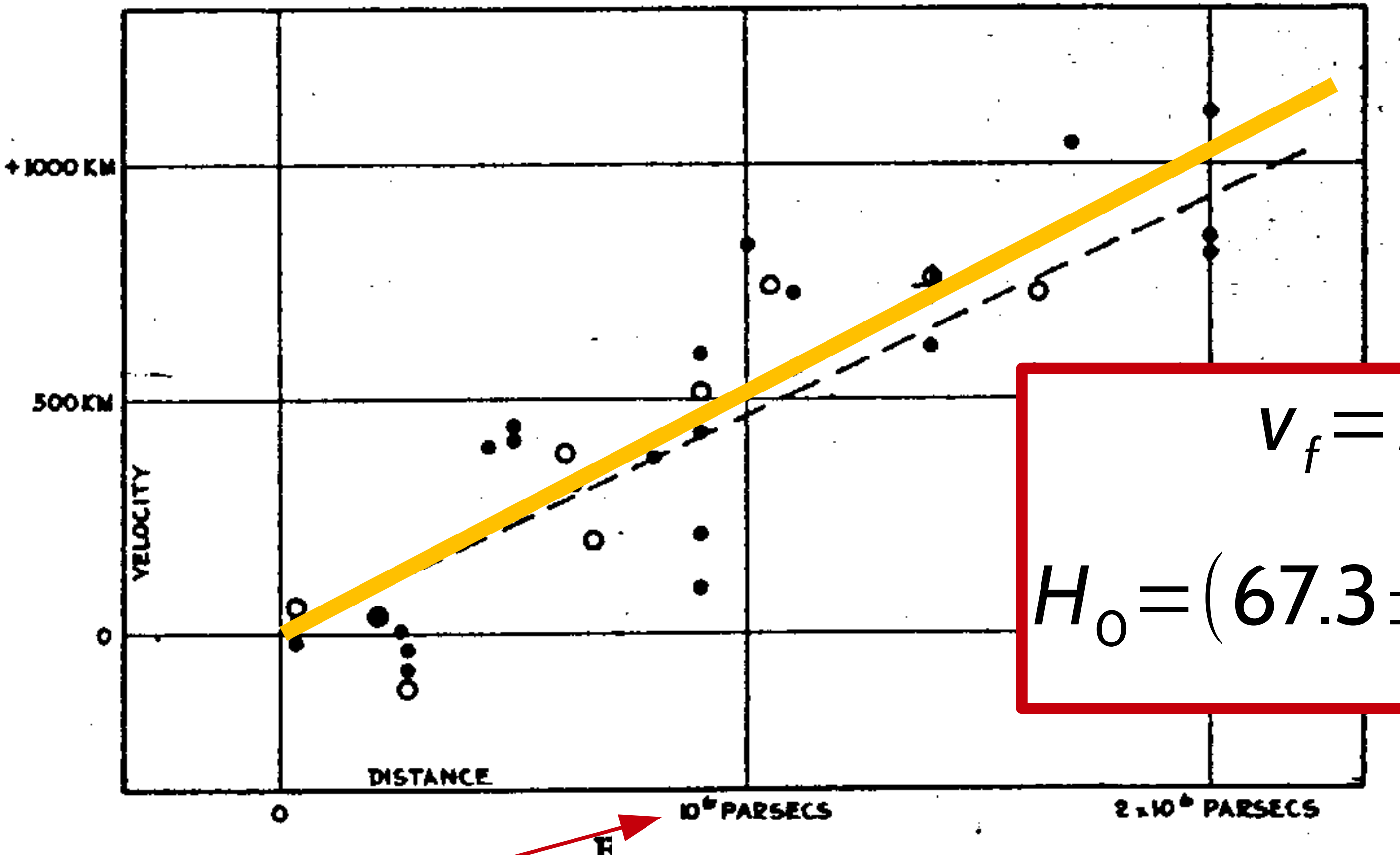
HST, visible





Ley de Hubble: el Universe se expande

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



$$v_f = H_0 d$$

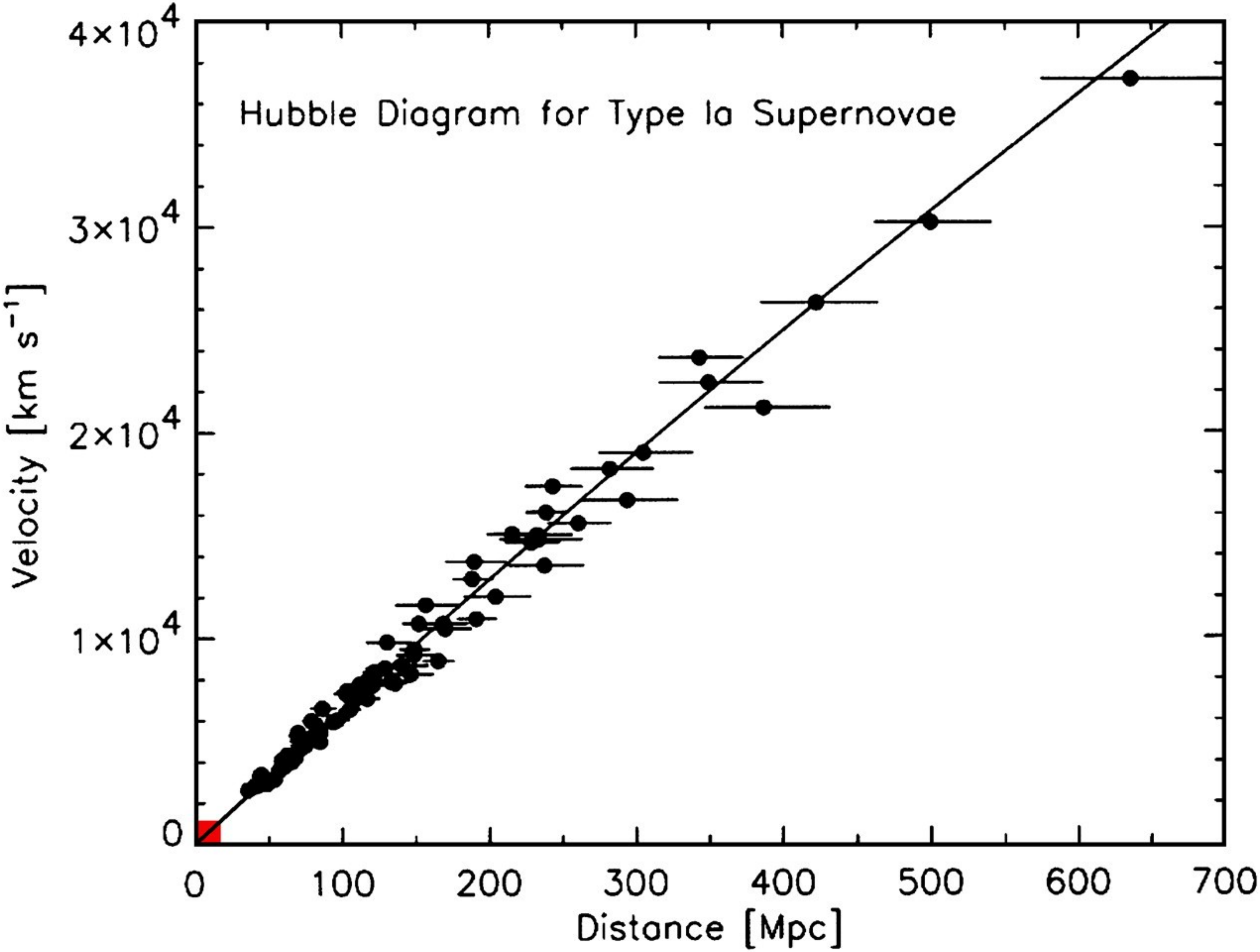
$$H_0 = (67.3 \pm 1.2) \frac{km/s}{Mpc}$$

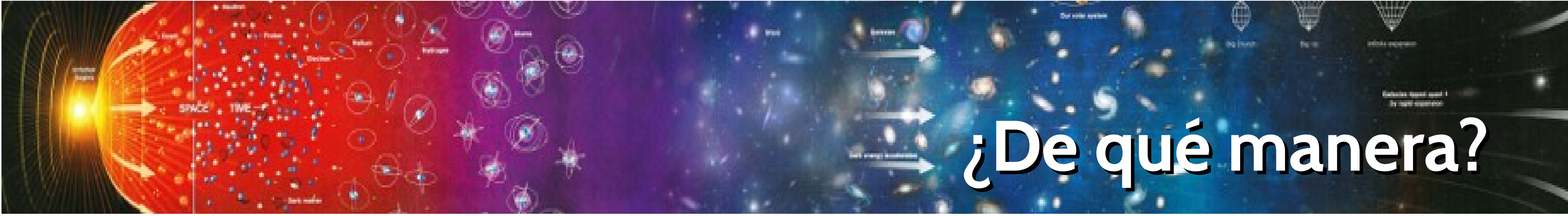
Velocidad v_f

Distancia

10^6 parsecs = 1 Mpc (megaparsec) = 3.085×10^{22} m

Ley de Hubble en Siglo XXI





¿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” 13.8x10^9 años luz

Hoy es 14.4 Gpc = 46.9 Gal

Pero si el Universo está en expansión....

- ... siempre lo estuvo?

- Estado estacionario
  - Creación contínua de materia (hidrógeno)

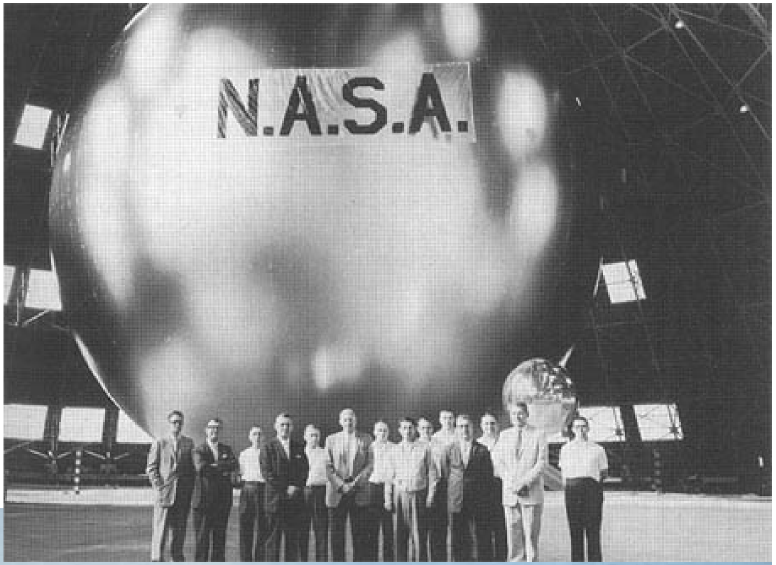
$$1 \frac{M_{\odot}}{Mpc^{3}}$$

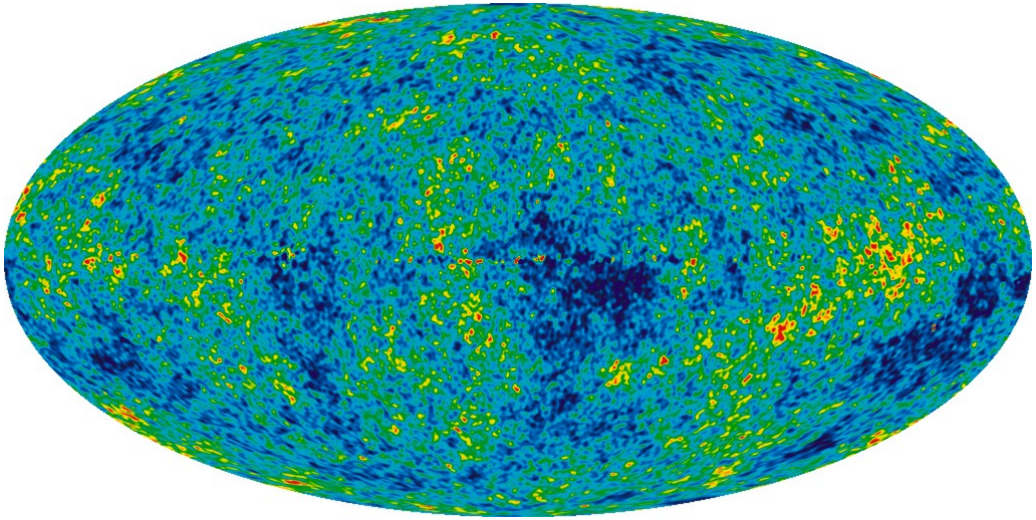
  - Universo homogeneo e isótropo

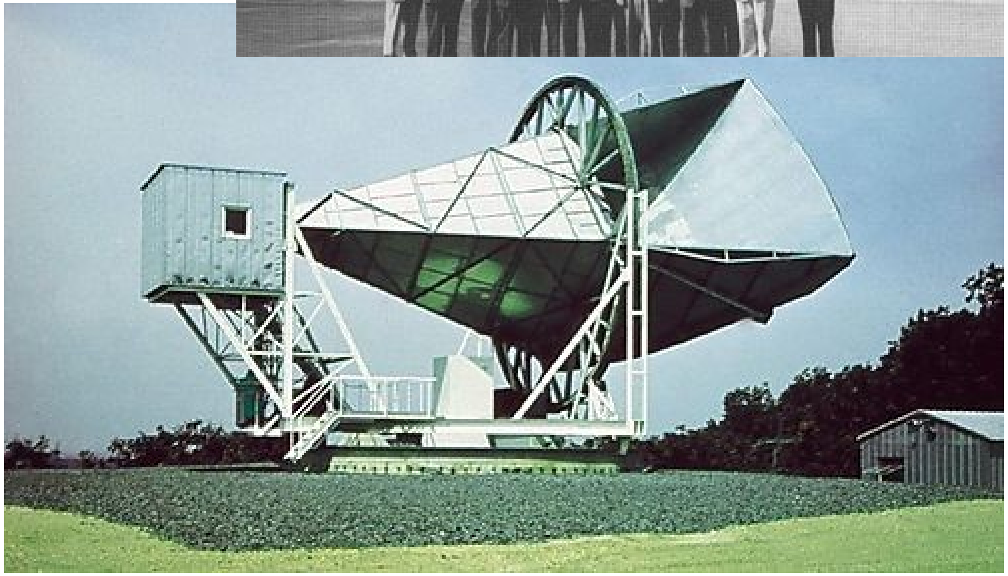
- generación inicial
  - Principio cosmológico: las propiedades del Universo son las mismas para todos los observadores
  - Altas temperaturas y densidades
  - Expansión y enfriamiento

The Big Bang Theory

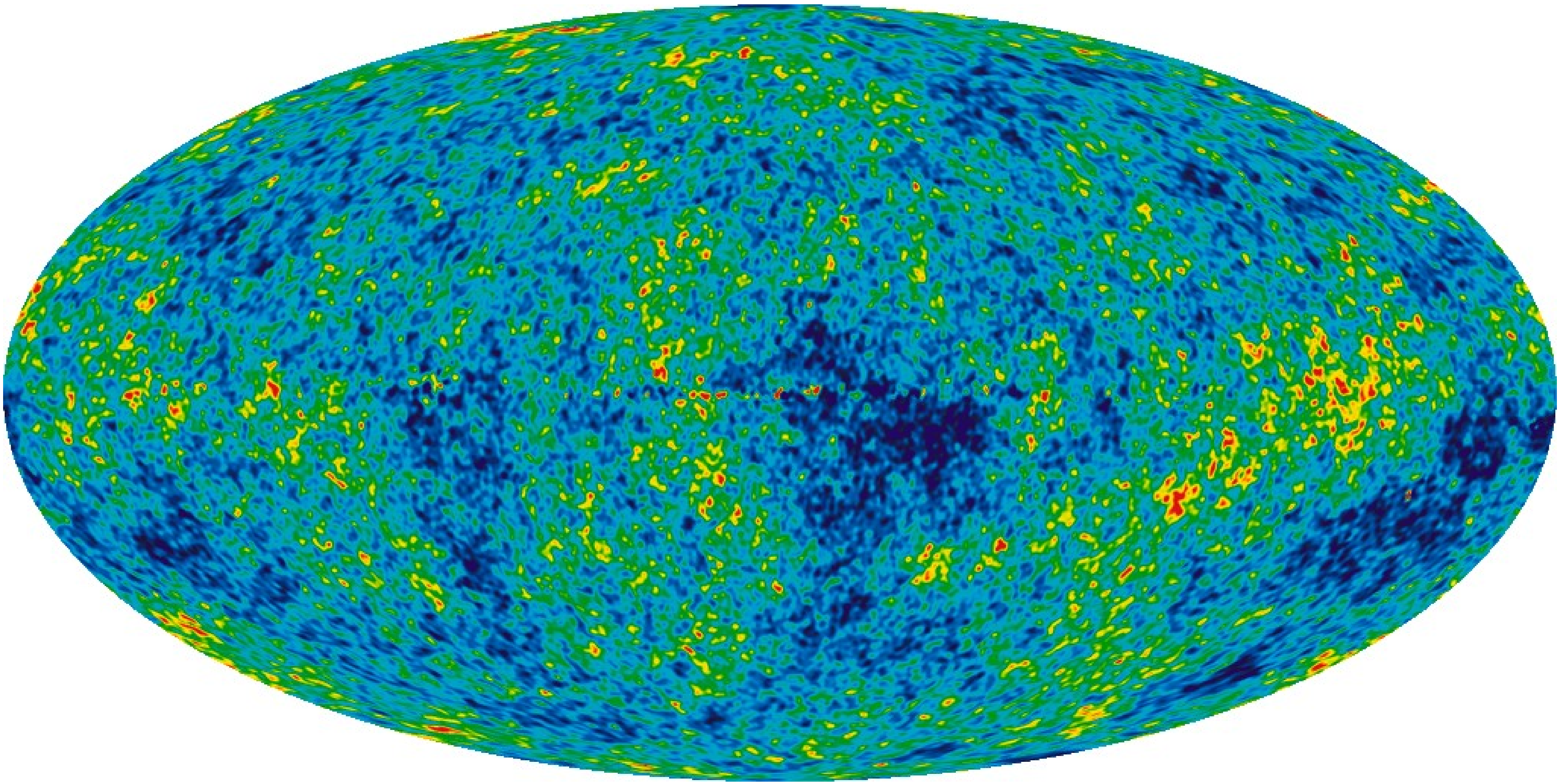
- Alpher & (Bethe) & Gamow → Paper alfabético
- Penzias & Wilson (1965)
- λ=7.35 cm
- ¿Energía? ¿Temperatura?



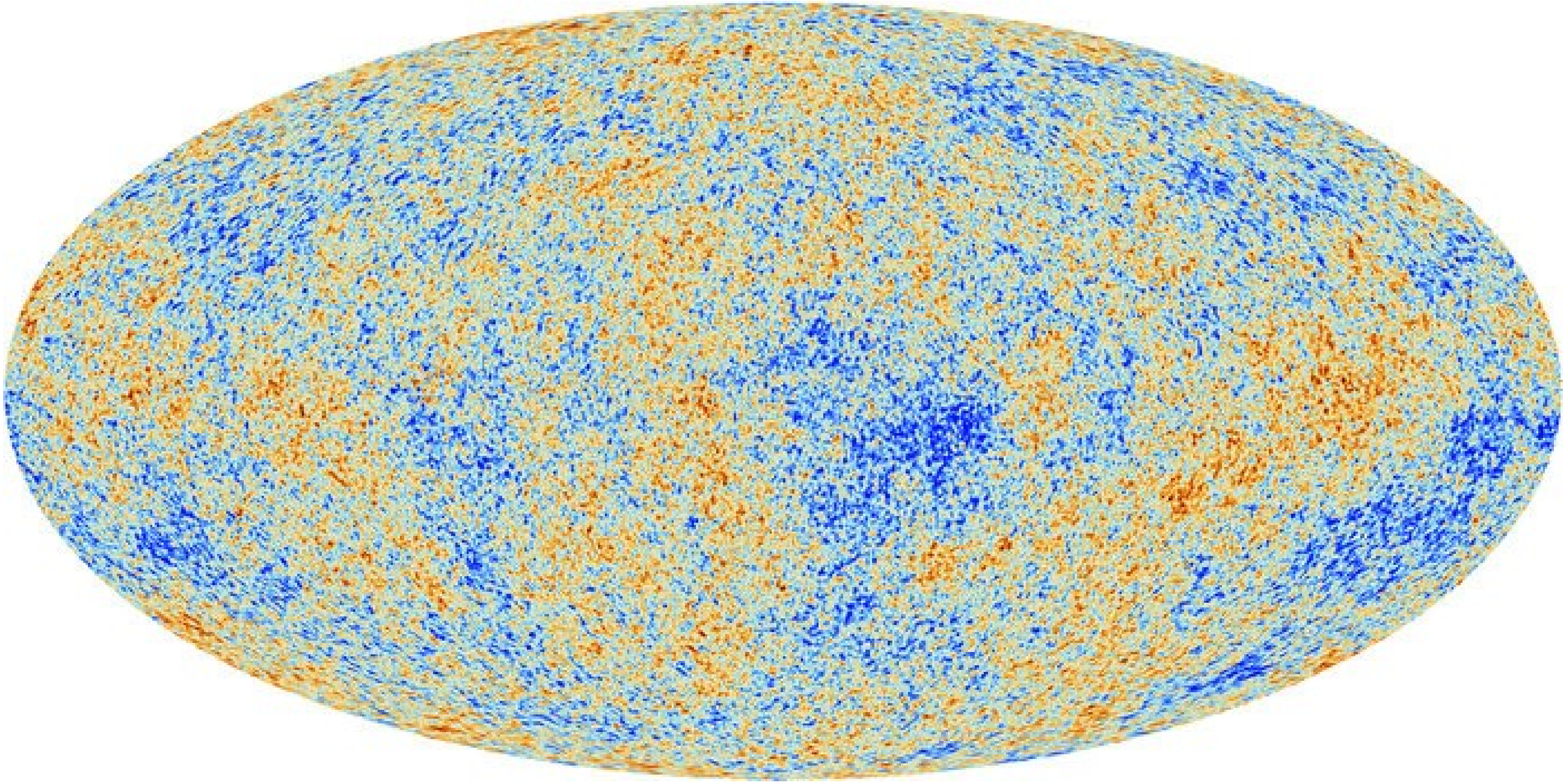




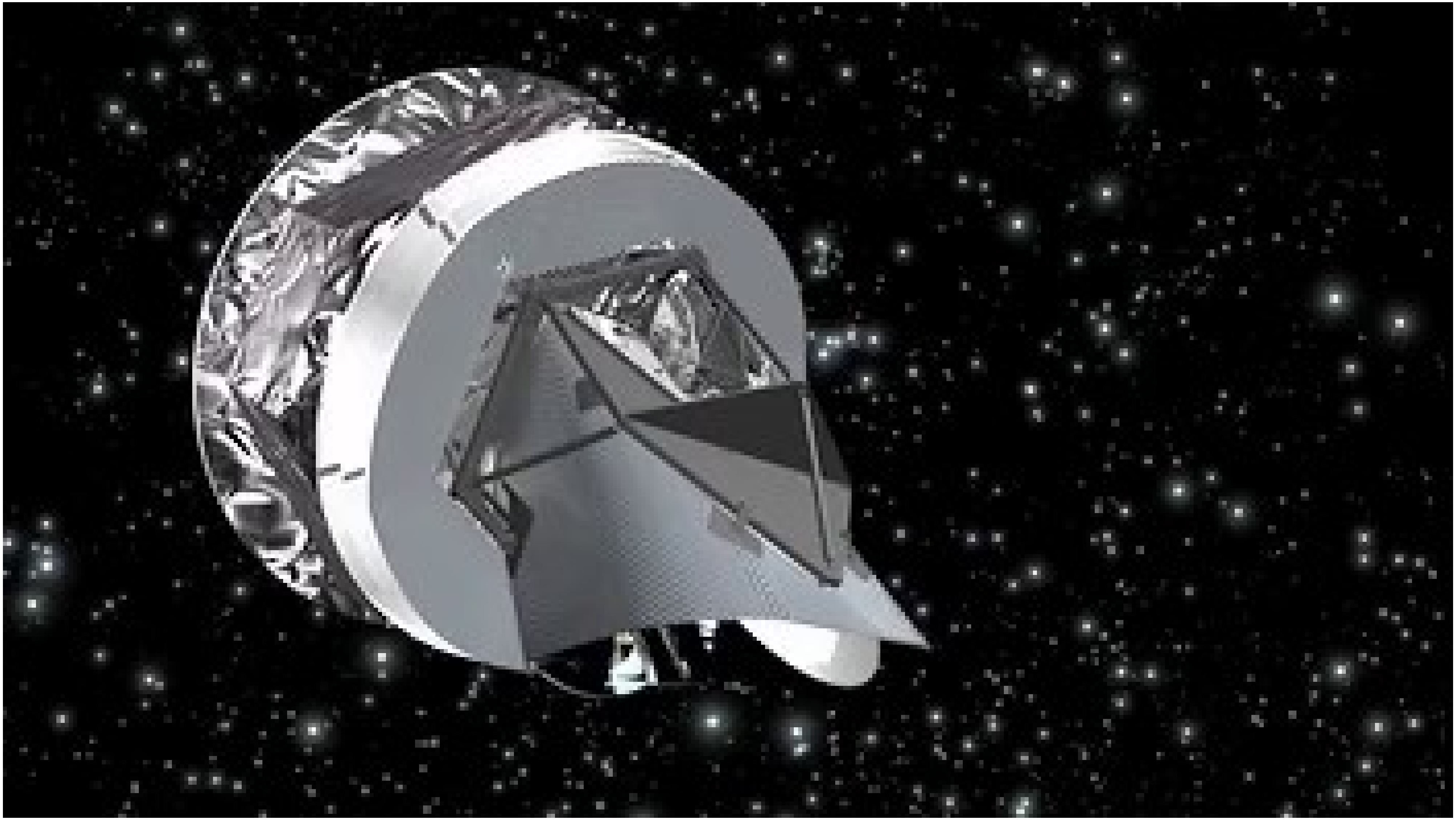
Radiación de fondo de microondas



Radiación de fondo de microondas



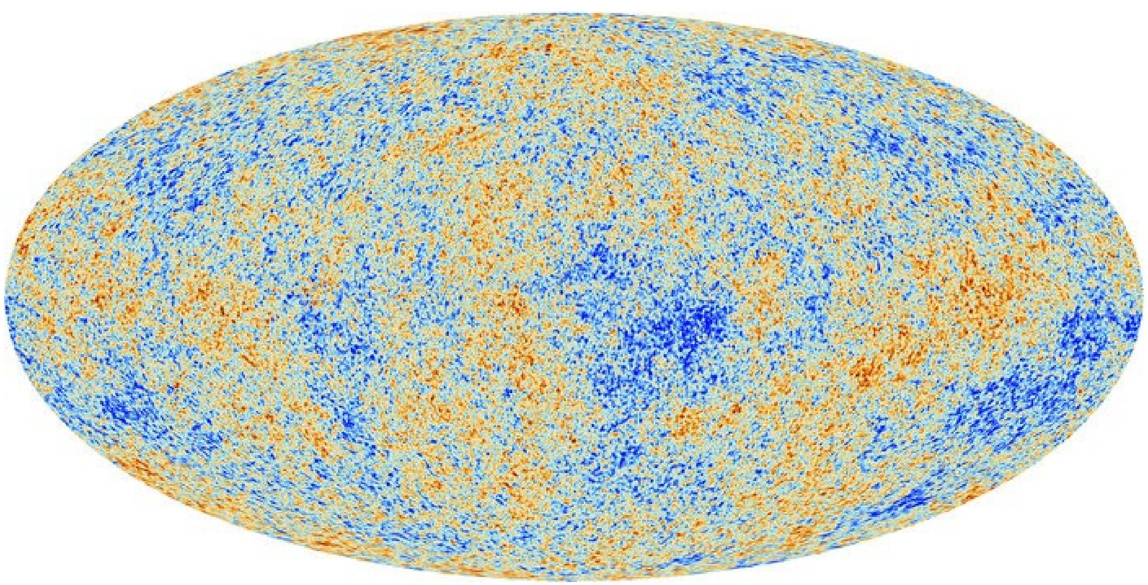
Asi se construye

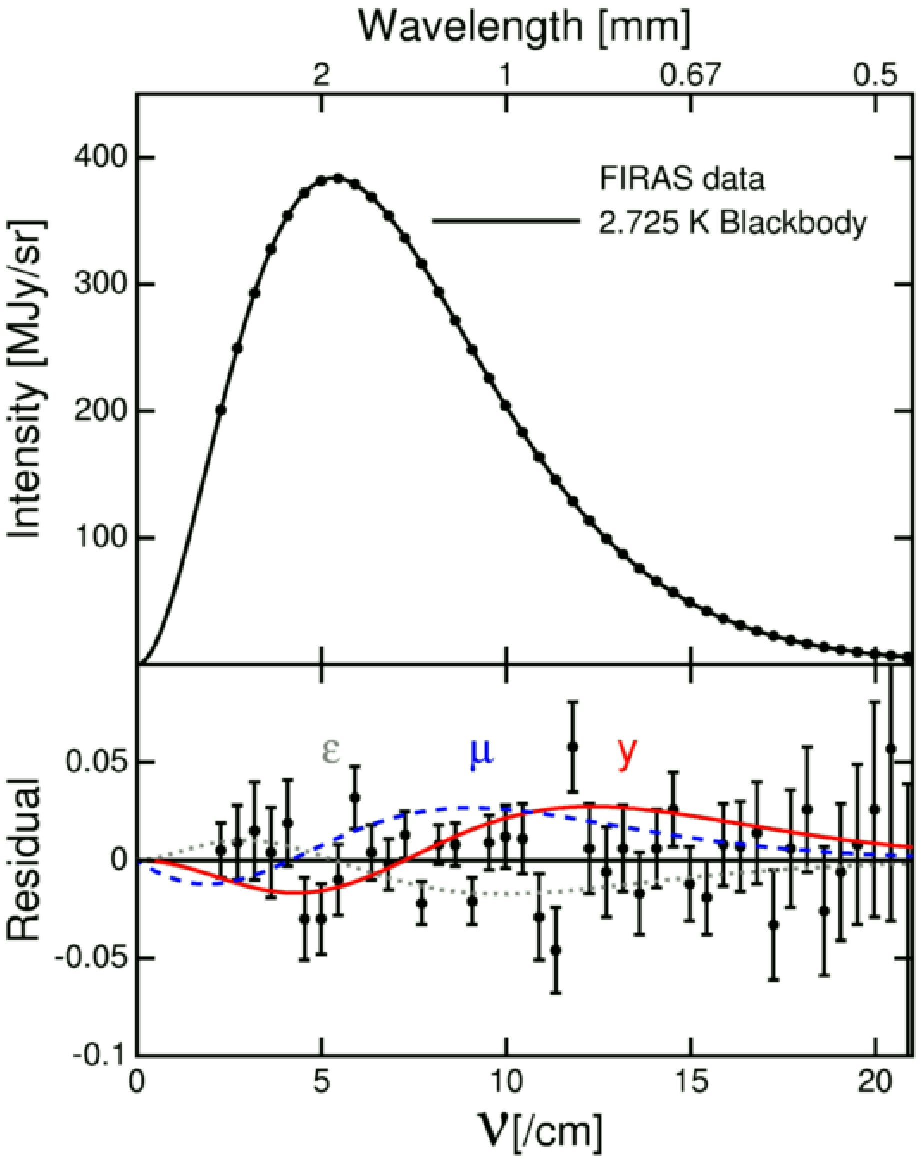


Radiación de fondo de microondas

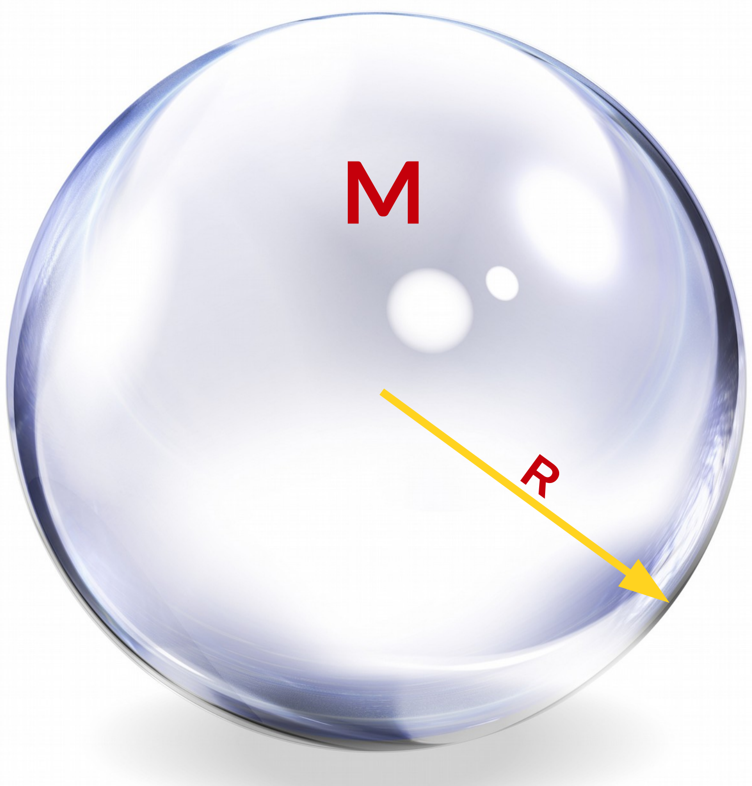
- Radiación de cuerpo negro:

$$T = (2.726 \pm 0.0013)\,K$$
$$n_\gamma = 430\ \text{fotones}/cm^3$$
$$\langle E_\gamma / V \rangle = 0.25\,eV/cm^3$$





¿La gravedad podrá compensar la expansión?



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

- Densidad crítica:

  Densidad para la cual la gravedad detendrá la expansión del Universo

- ¿Cómo podemos calcularla?

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

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

La velocidad de expansión para un objeto en d es

$$v = H_0 d$$

Sea una esfera de radio R. Luego la superficie se aleja del centro con velocidad $v = H_0 R$

¿Podrá escaparse de la atracción de la materia del interior?

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

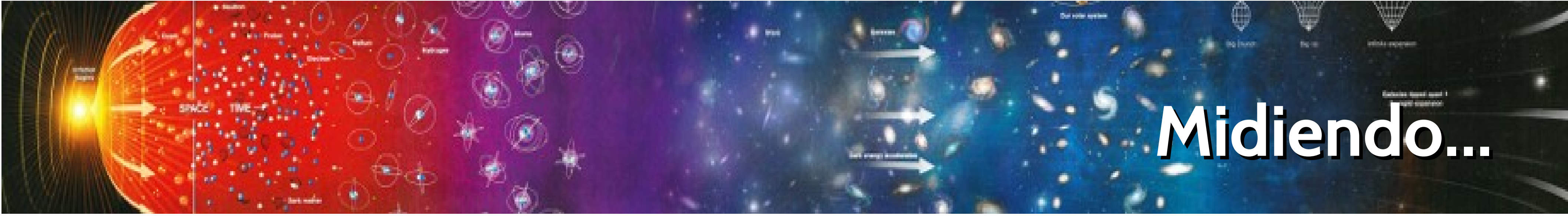
Si la esfera tiene densidad ρ y volumen $V \Rightarrow \rho = M/V \Rightarrow$

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

reemplazando $v_E^2 = H_0^2 R^2 \Rightarrow$

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

Densidad crítica



Midiendo...

- Defino: $\Omega = \rho / \rho_c$

$$\boxed{\begin{aligned}\Omega_i &\equiv \frac{\rho_i}{\rho_c} \\ \Omega_{\text{tot}} &= \sum_i \Omega_i\end{aligned}}$$

- Ahora mido el contenido de materia del Universo, y obtengo:

$\Omega = 1.00 \pm 0.01$

https://arxiv.org/pdf/1807.06209.pdf

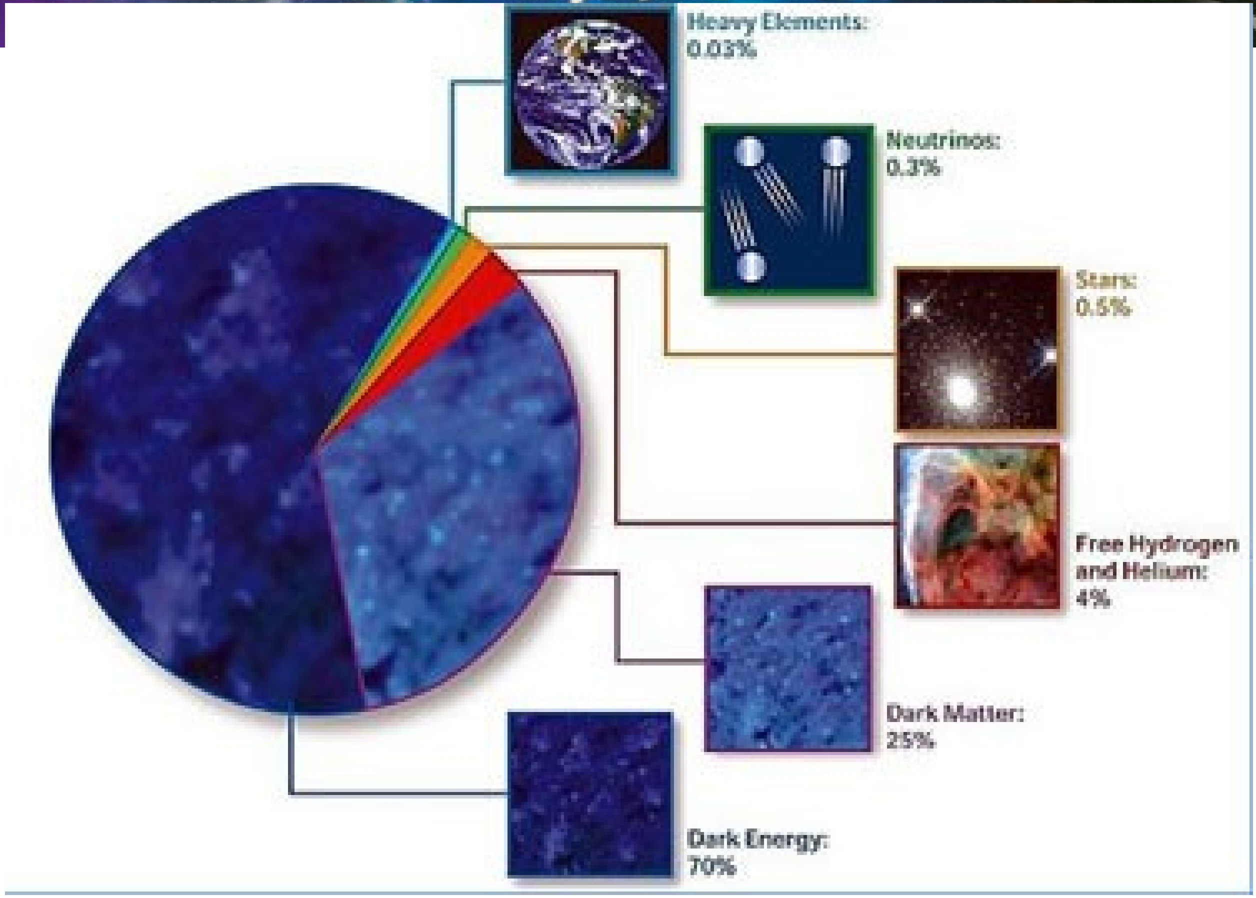
¡Entendimos el Universo!

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?

Contenido de materia energía del Universo

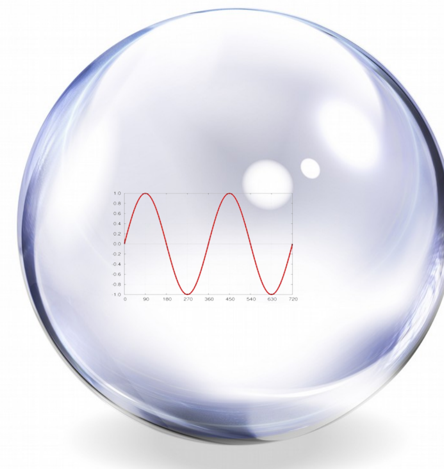
- Cómo se compone:
  - $\Omega k = 10^{-5}$
  - $\Omega\gamma = 0.002$
  - $\Omega m = 0.0486 +- 0.001$



- Total esperado: $\Omega = 0.0488$
- Total medido: $\Omega = 1 \rightarrow$ problemas

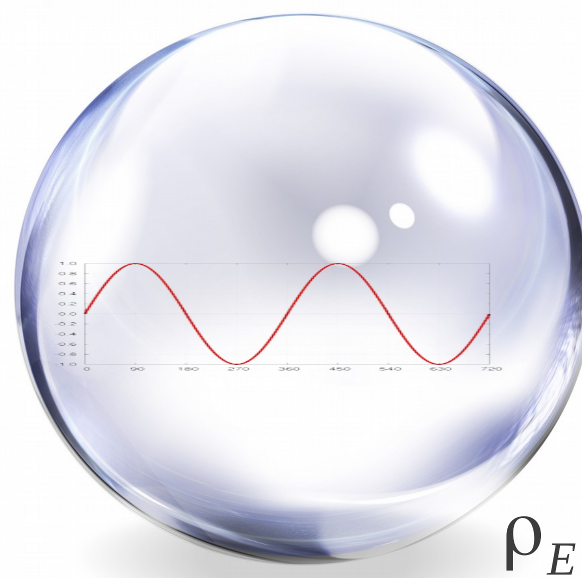
Materia y energía en la expansión

$$E = mc^2$$



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

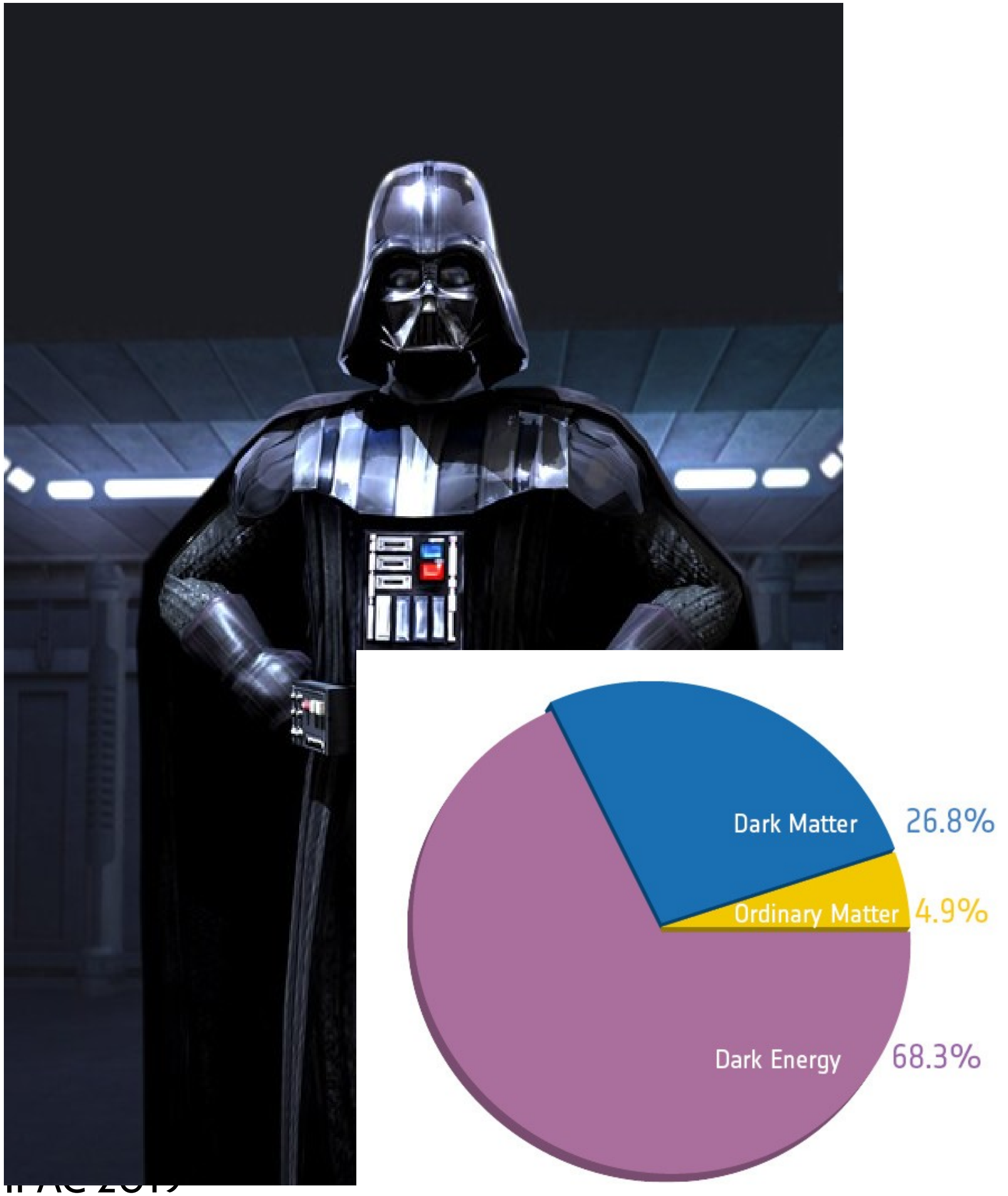
$$\rho_M \sim 1/R^3$$



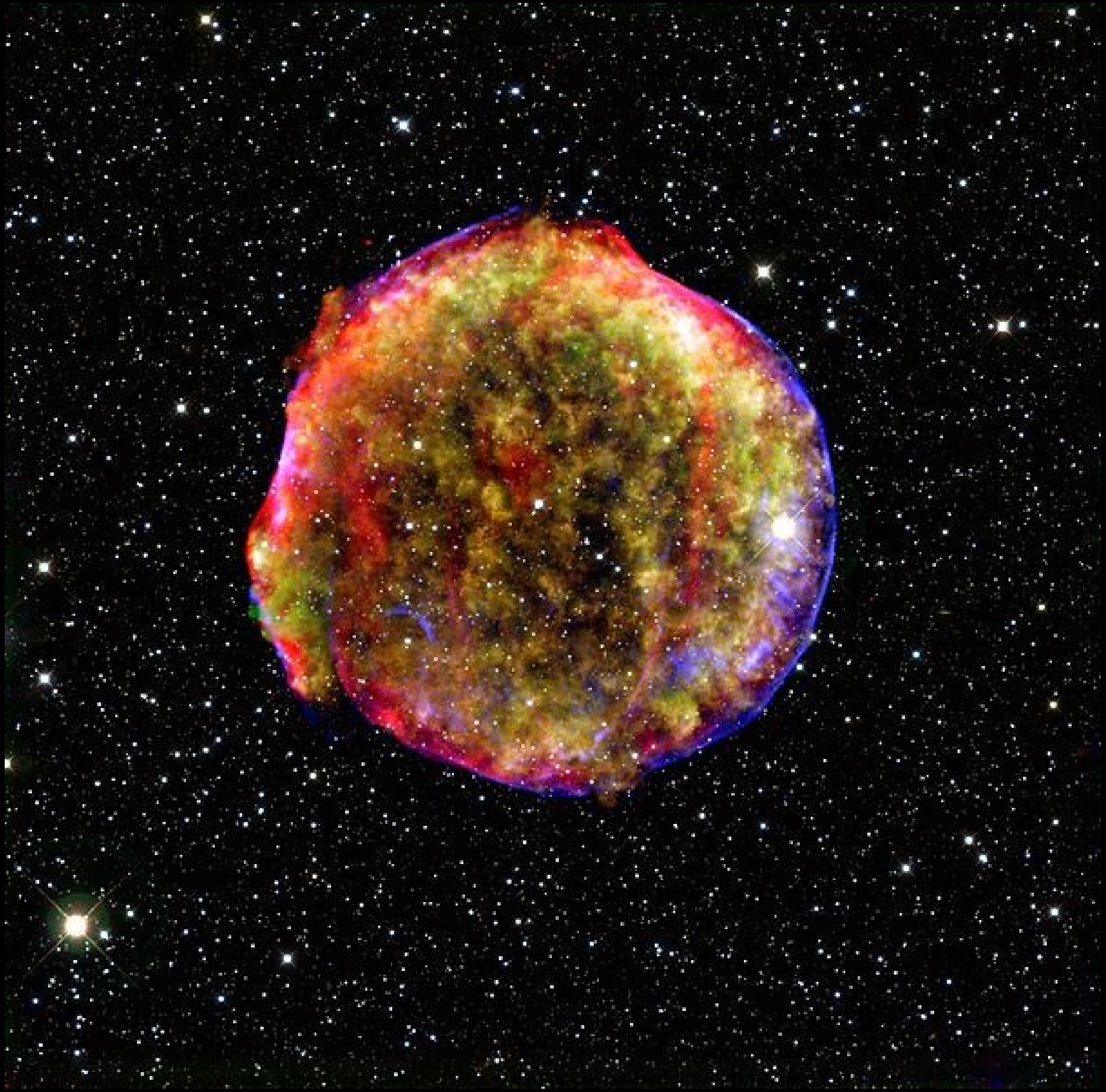
$$\rho_E \sim (1/R^4)$$

Contenido de materia energía del Universo

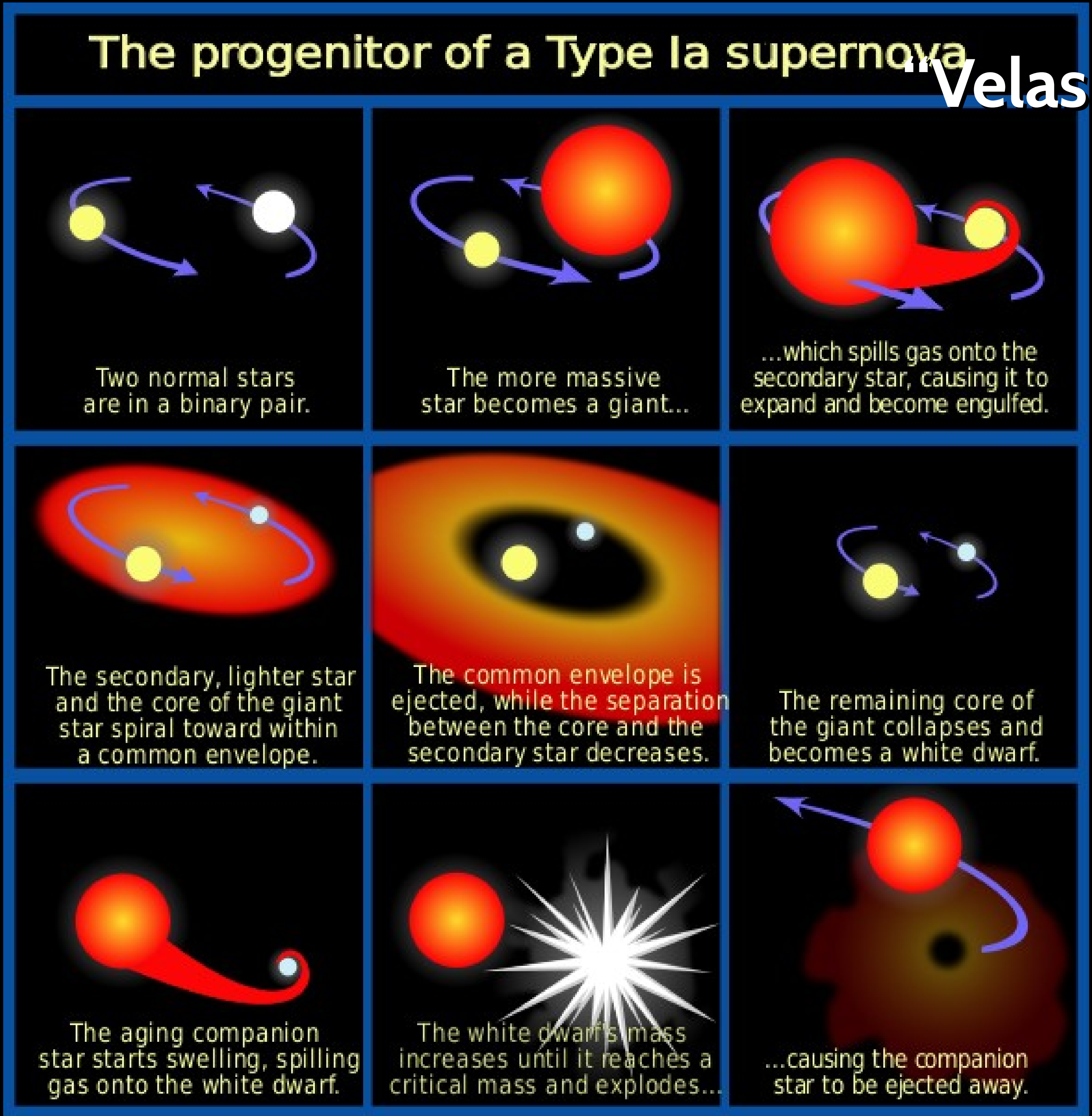
- Cómo se compone:
  - $\Omega k = 0.001\%$
  - $\Omega\gamma = 0.2\%$
  - $\Omega m = (4.86+-0.001)\%$
  - $\Omega M = (25.89+-0.0057)\%$
  - $\Omega mat=\Omega m+\Omega M= 30.89\%$
  - $\Omega_\Lambda=(68.3+-0.0062)\%$



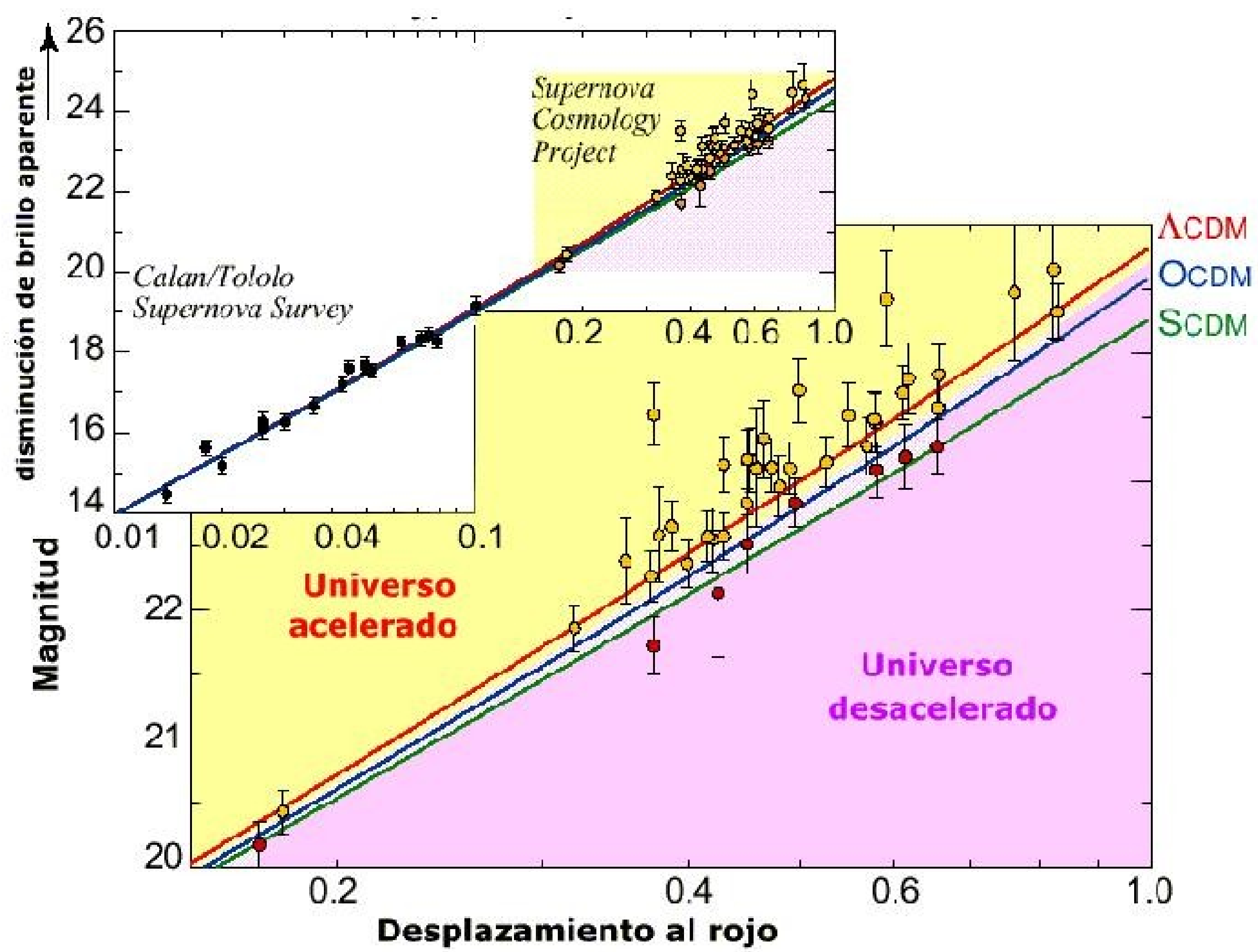
Supernovas Ia



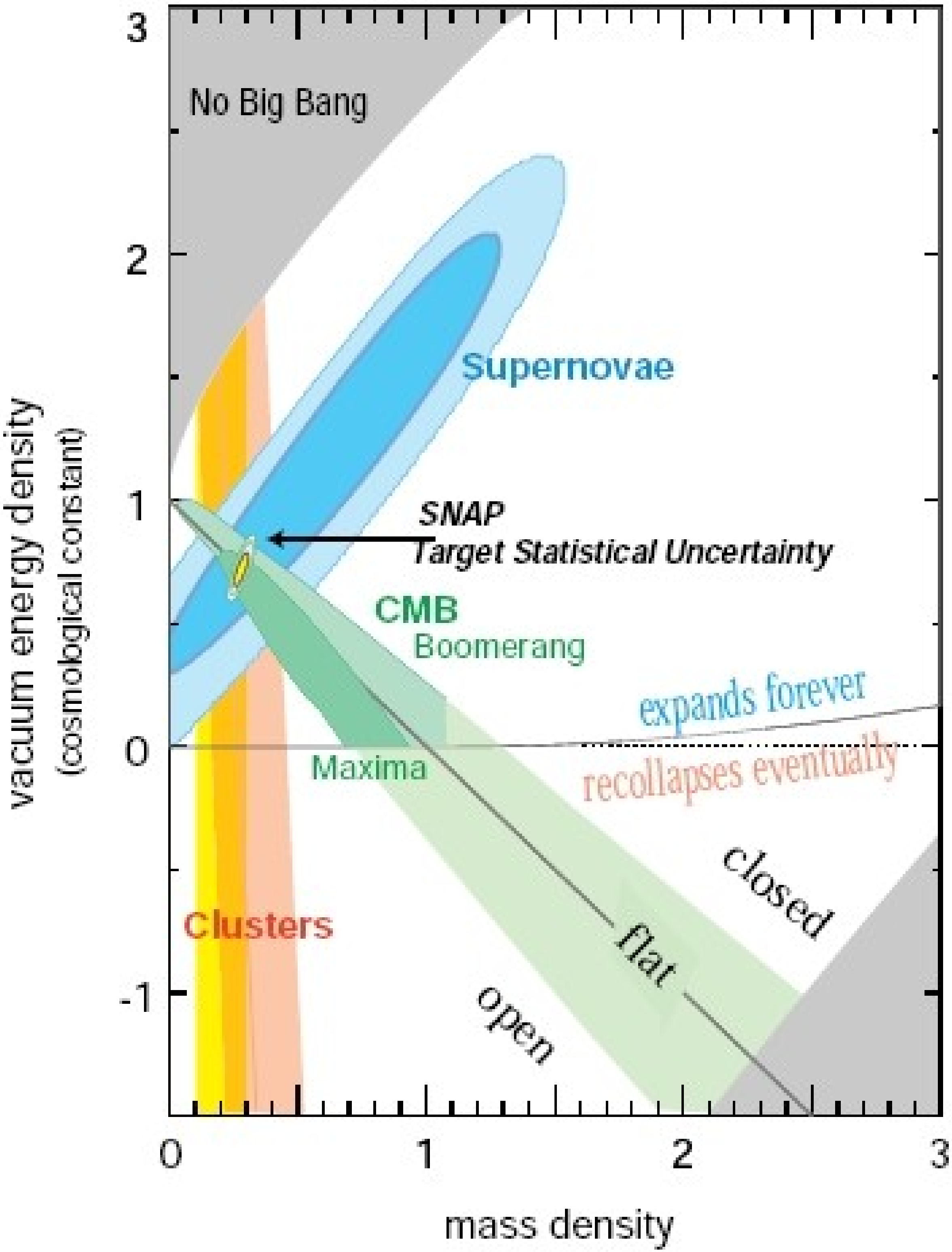
"Velas estándares"



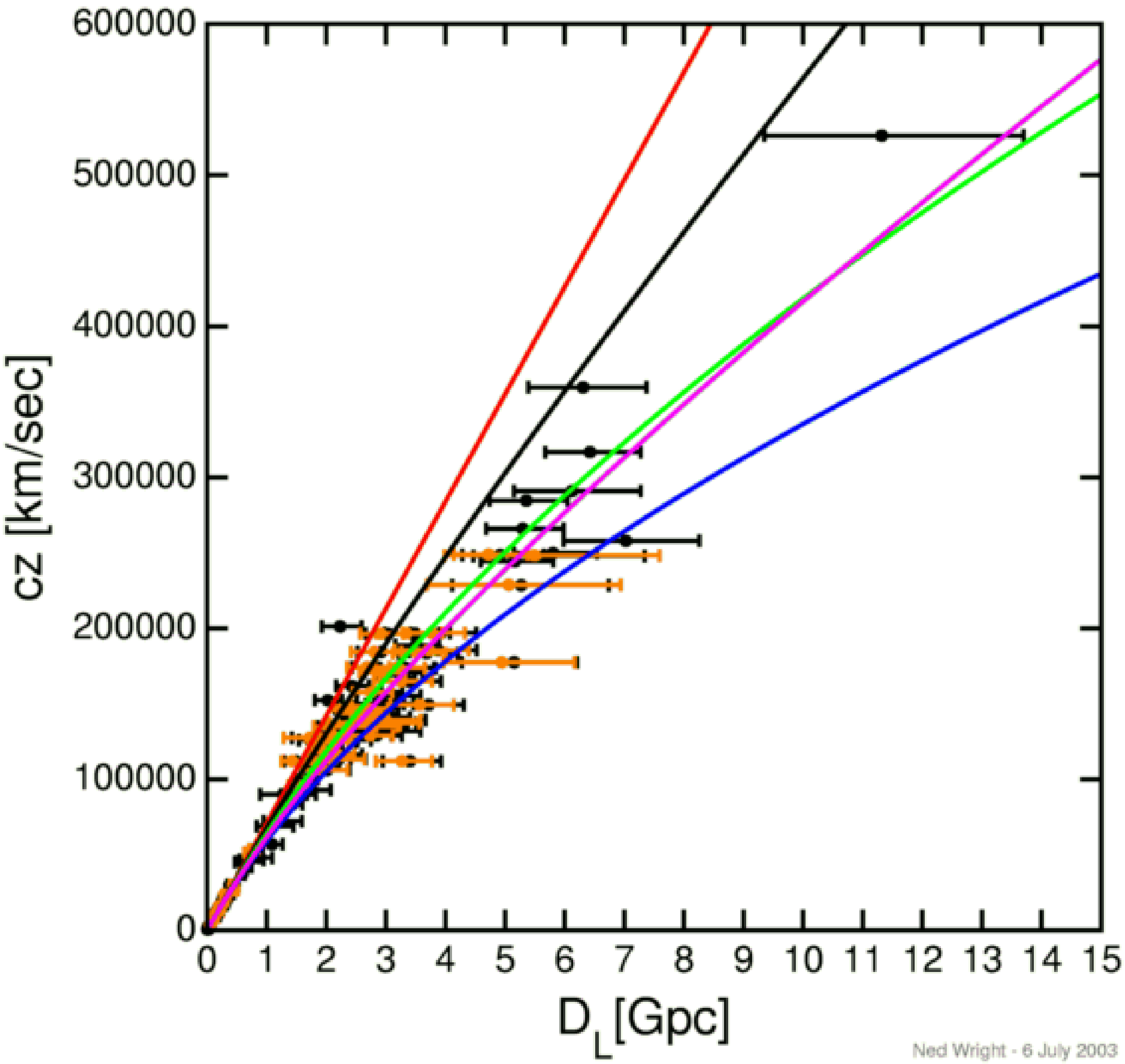
Expansión acelerada



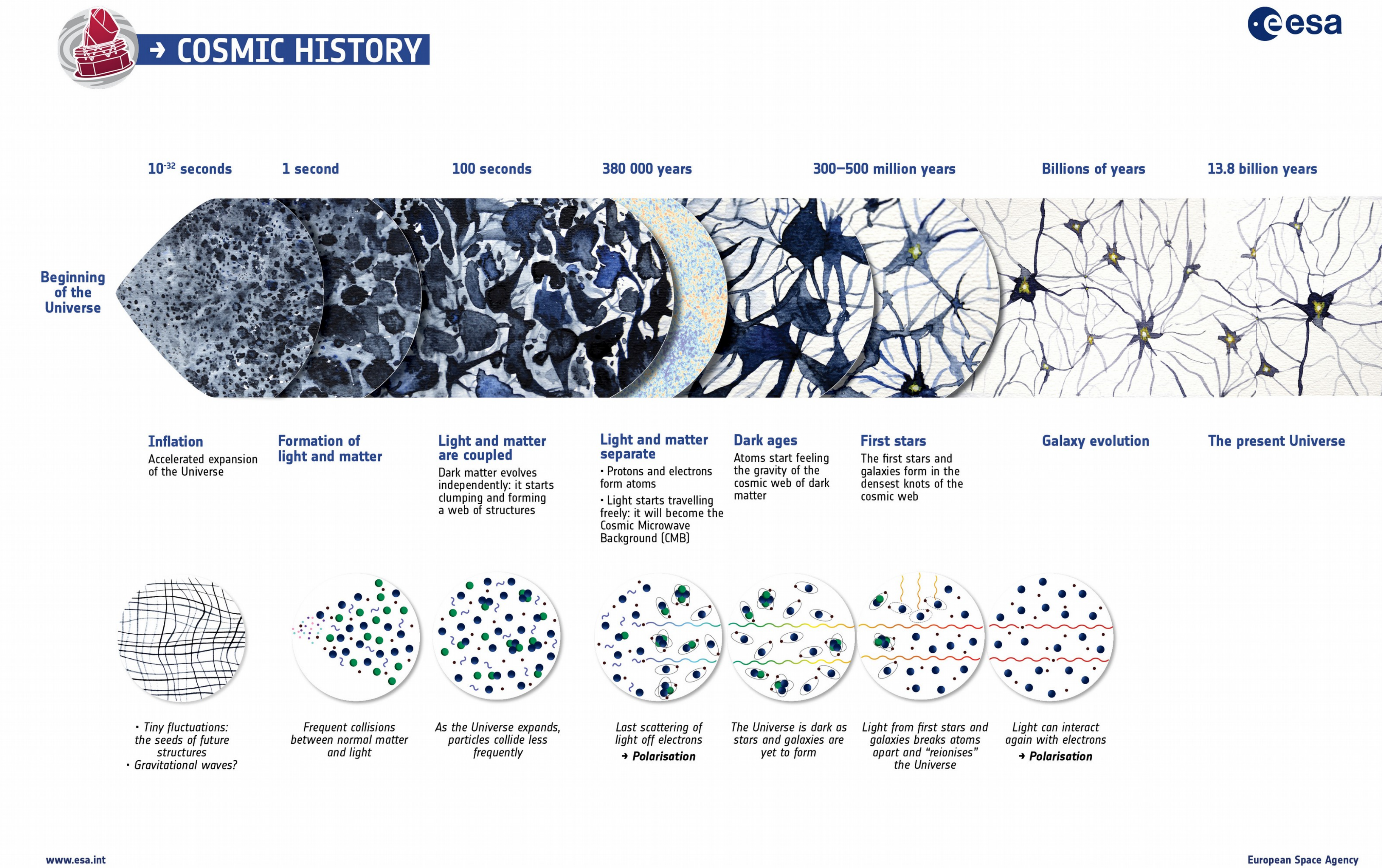
elo cosmológico



El nuevo diagrama de Hubble



Lo que viene...



→ COSMIC HISTORY
esa
Beginning of the Universe
10^{-32} seconds
1 second
100 seconds
380 000 years
300–500 million years
Billions of years
13.8 billion years
Inflation
Accelerated expansion of the Universe
Formation of light and matter
Light and matter are coupled
Dark matter evolves independently: it starts clumping and forming a web of structures
Light and matter separate
• Protons and electrons form atoms
• Light starts travelling freely: it will become the Cosmic Microwave Background (CMB)
Dark ages
Atoms start feeling the gravity of the cosmic web of dark matter
First stars
The first stars and galaxies form in the densest knots of the cosmic web
Galaxy evolution
The present Universe
• Tiny fluctuations: the seeds of future structures
• Gravitational waves?
Frequent collisions between normal matter and light
As the Universe expands, particles collide less frequently
Last scattering of light off electrons
→ Polarisation
The Universe is dark as stars and galaxies are yet to form
Light from first stars and galaxies breaks atoms apart and "reionises" the Universe
Light can interact again with electrons
→ Polarisation
www.esa.int
European Space Agency