Universidad Nacional de Río Negro
Int. Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2018

- **Unidad** 04 – El Big Bang
- **Clase** U04 C02
- **Fecha** 21 Nov 2018
- **Cont** Expansión (continuación)
- **Cátedra** Asorey
- **Web** https://asoreyh.github.io/unrn-ipac/
- **Youtube** https://goo.gl/UZJzLk

Contenidos: un viaje en el tiempo

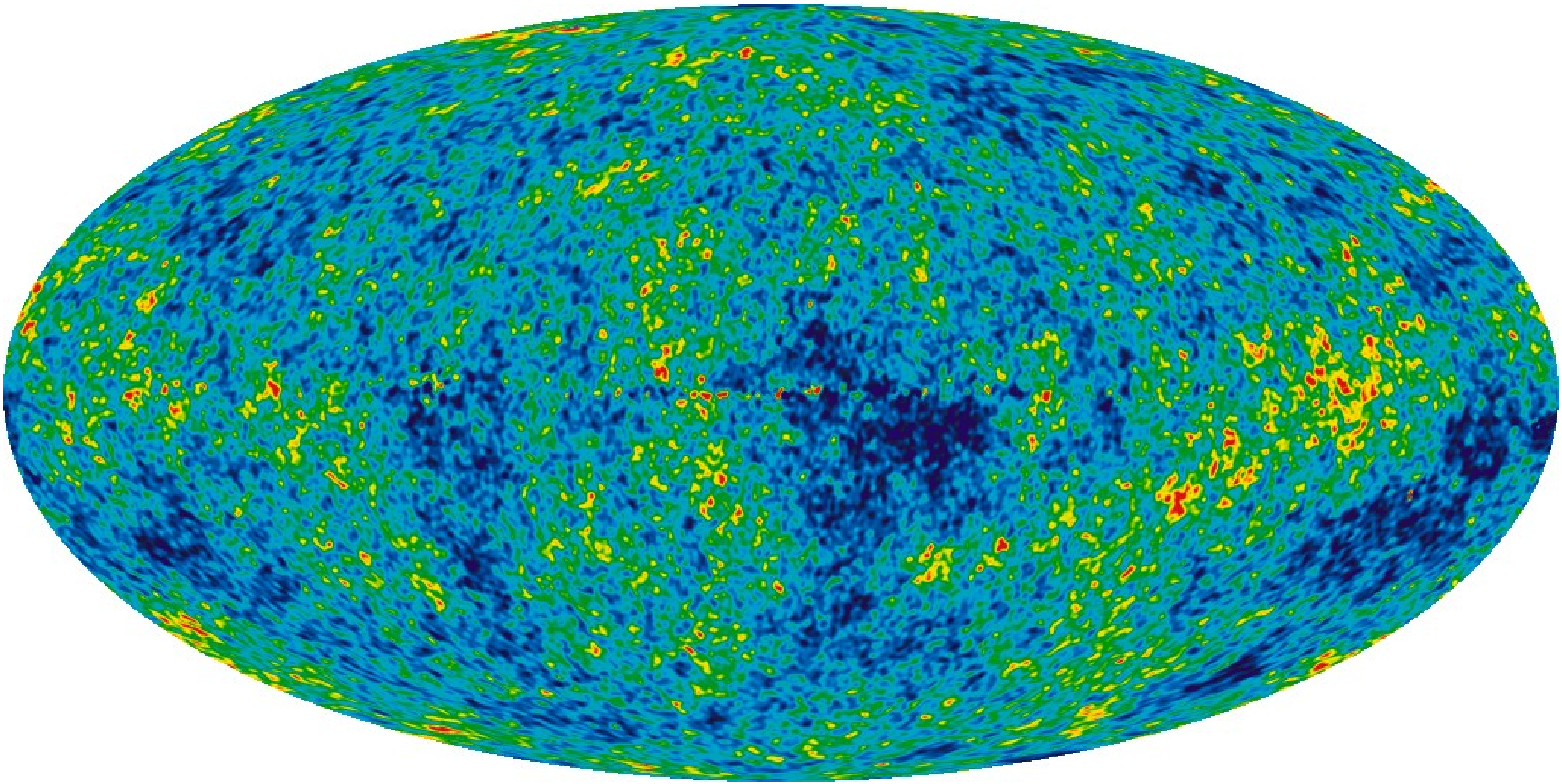
Unidad 4
El Big Bang
Allá lejos y hace tiempo

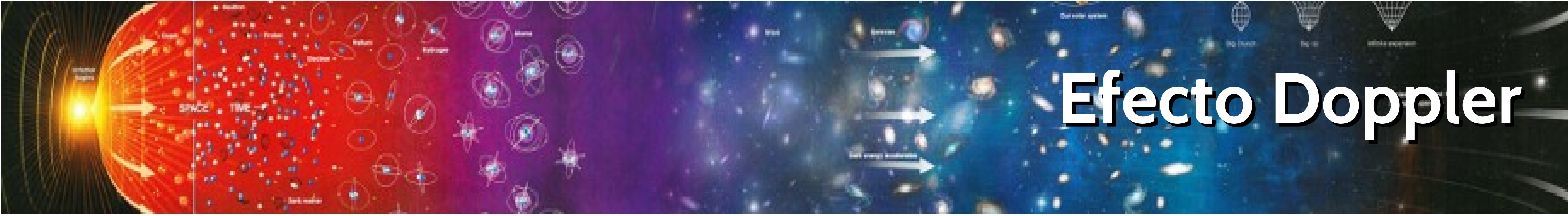
Unidad 3
Cosmología
No es lo que se ve
Sino lo que se palpa

Unidad 2
Astrofísica
Cálido y frío

Unidad 1
Partículas 1
todo es relativo

A las escalas más grandes...



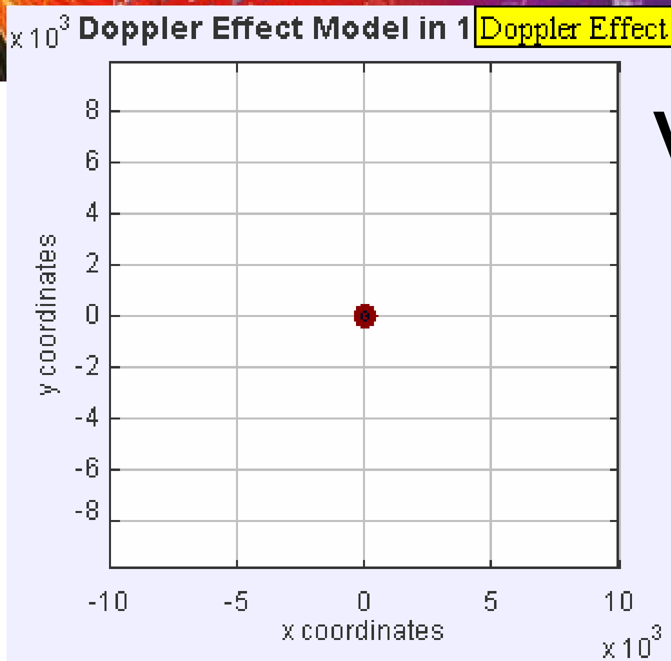


Efecto Doppler

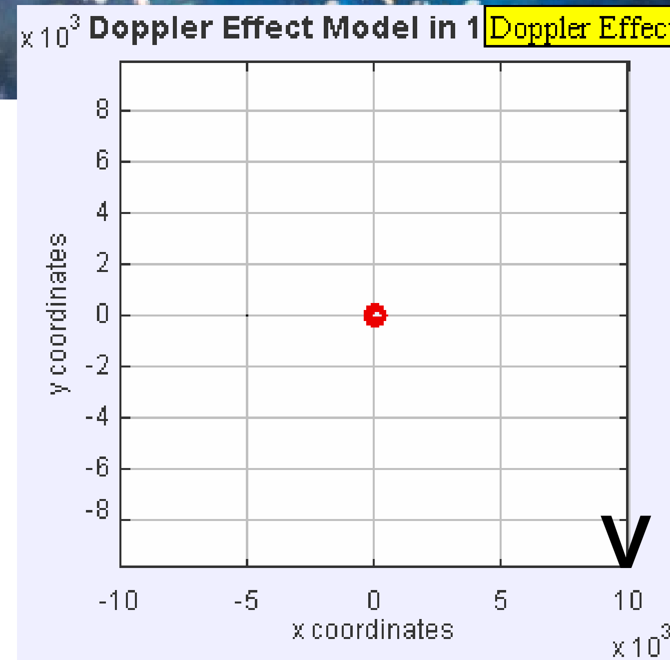
"Es el cambio aparente en la frecuencia de una onda causado por el movimiento relativo entre la fuente de la ondas y el observador"

Dr. Sheldon Cooper

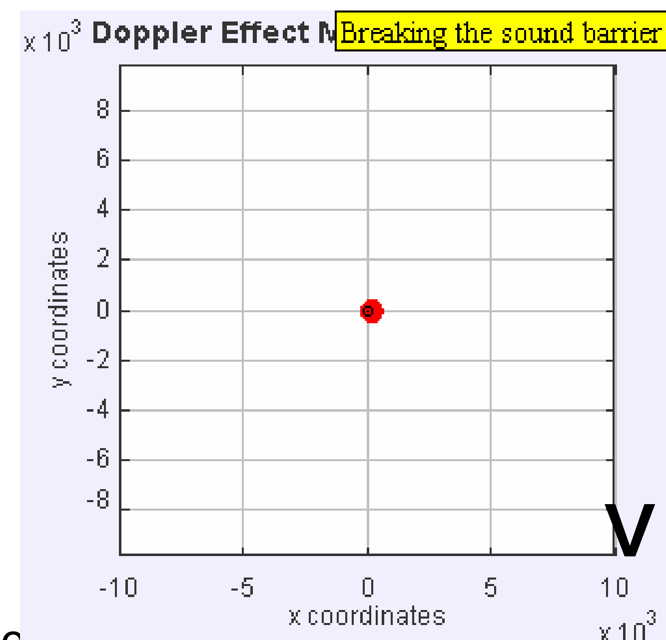
Efecto Doppler



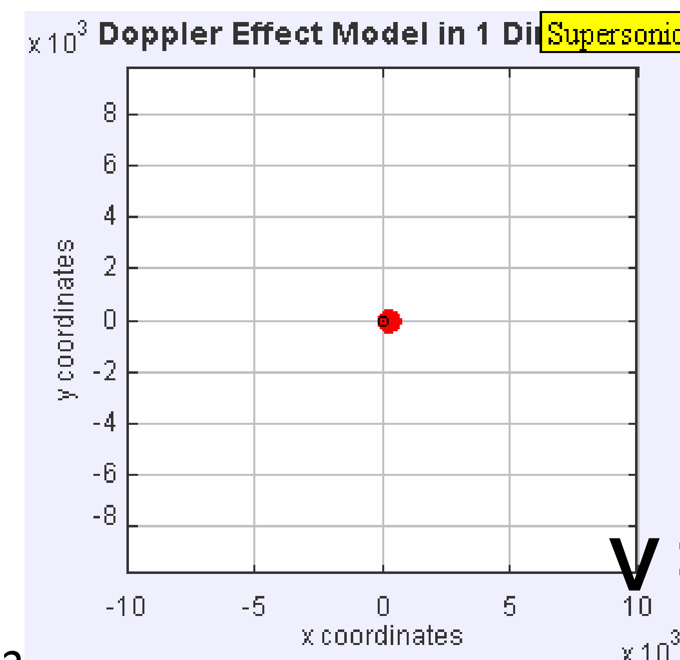
$v=0$



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

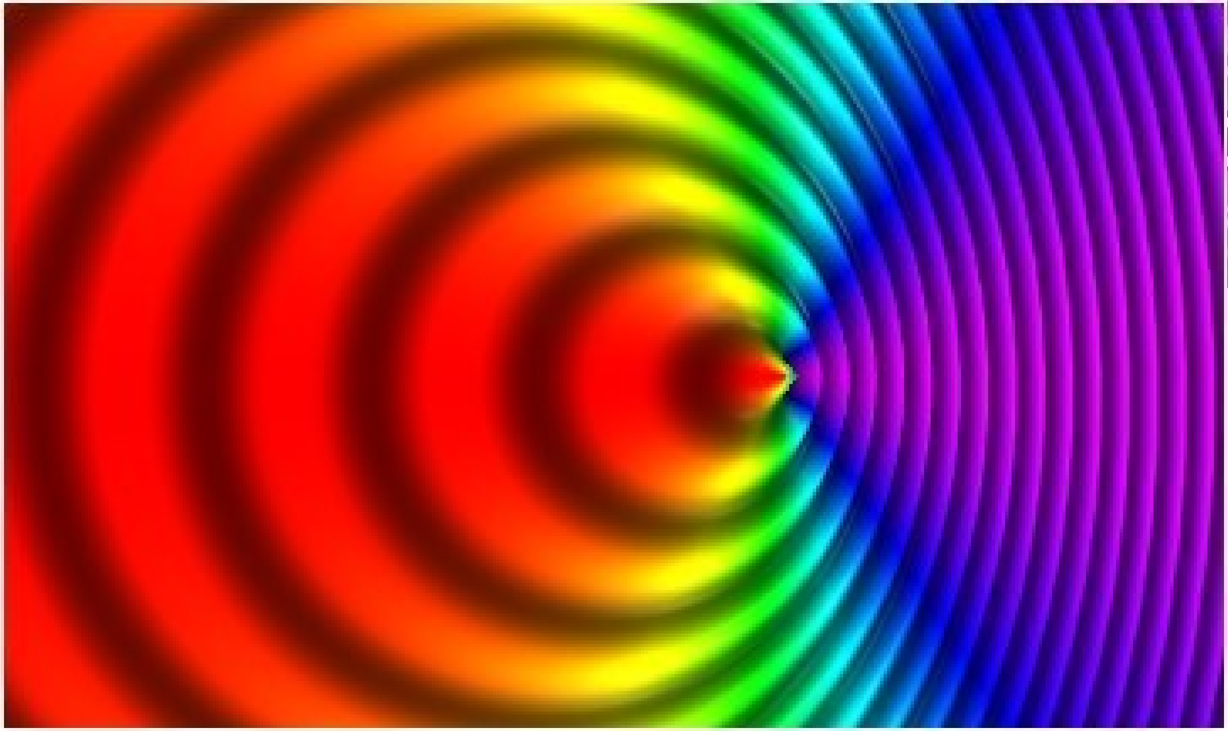


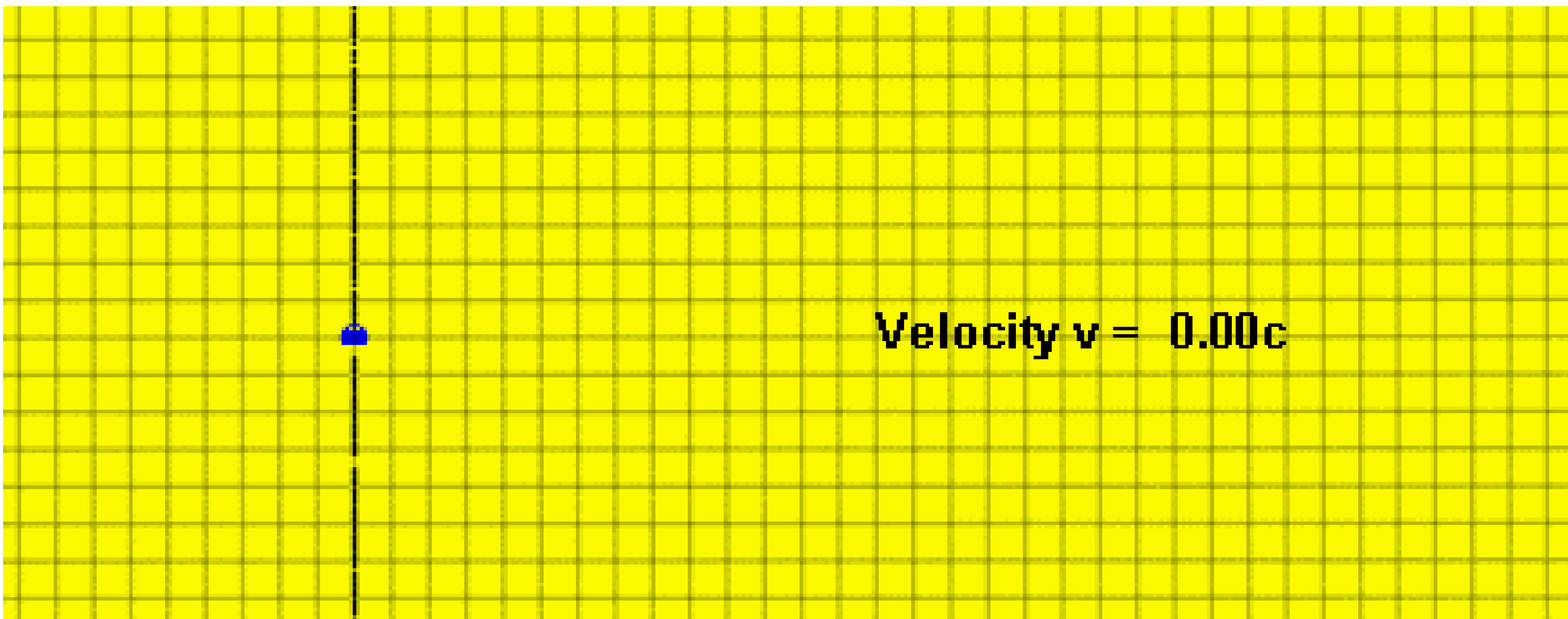
$v=1\,v_s$

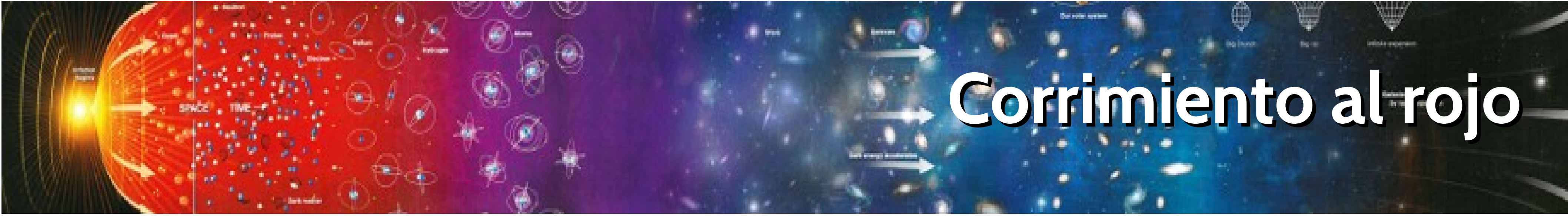


$v=1{,}4\,v_s$

to Doppler relativsta







Corrimiento al rojo

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

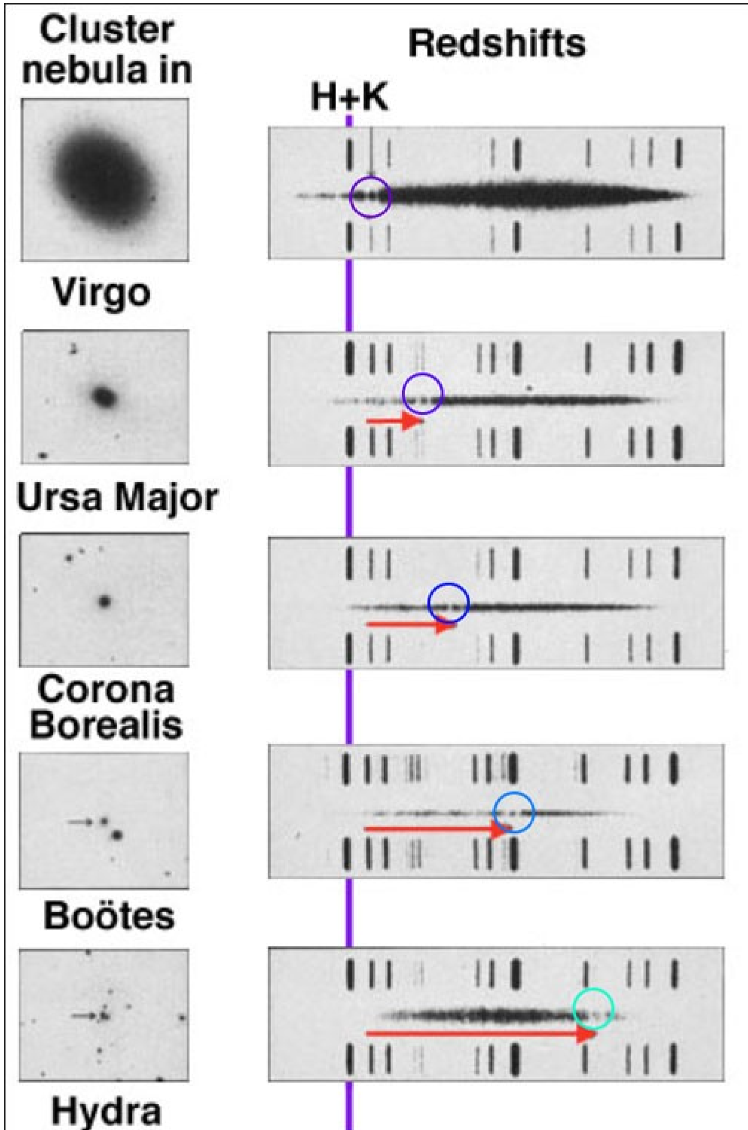
$$\frac{\lambda_o}{\lambda_e}=\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}>1\rightarrow \lambda_o>\lambda_e$$

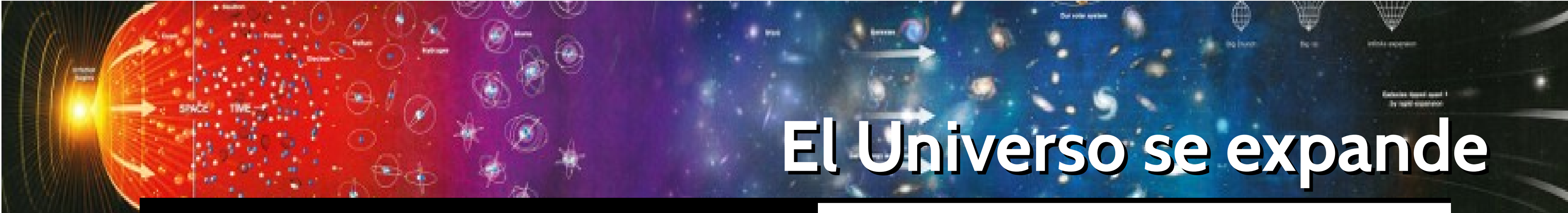
$$\text{Def. } z\equiv\frac{\lambda_o-\lambda_e}{\lambda_e}\Rightarrow 1+z=\frac{\lambda_o}{\lambda_e}=\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

z es el corrimiento al rojo.

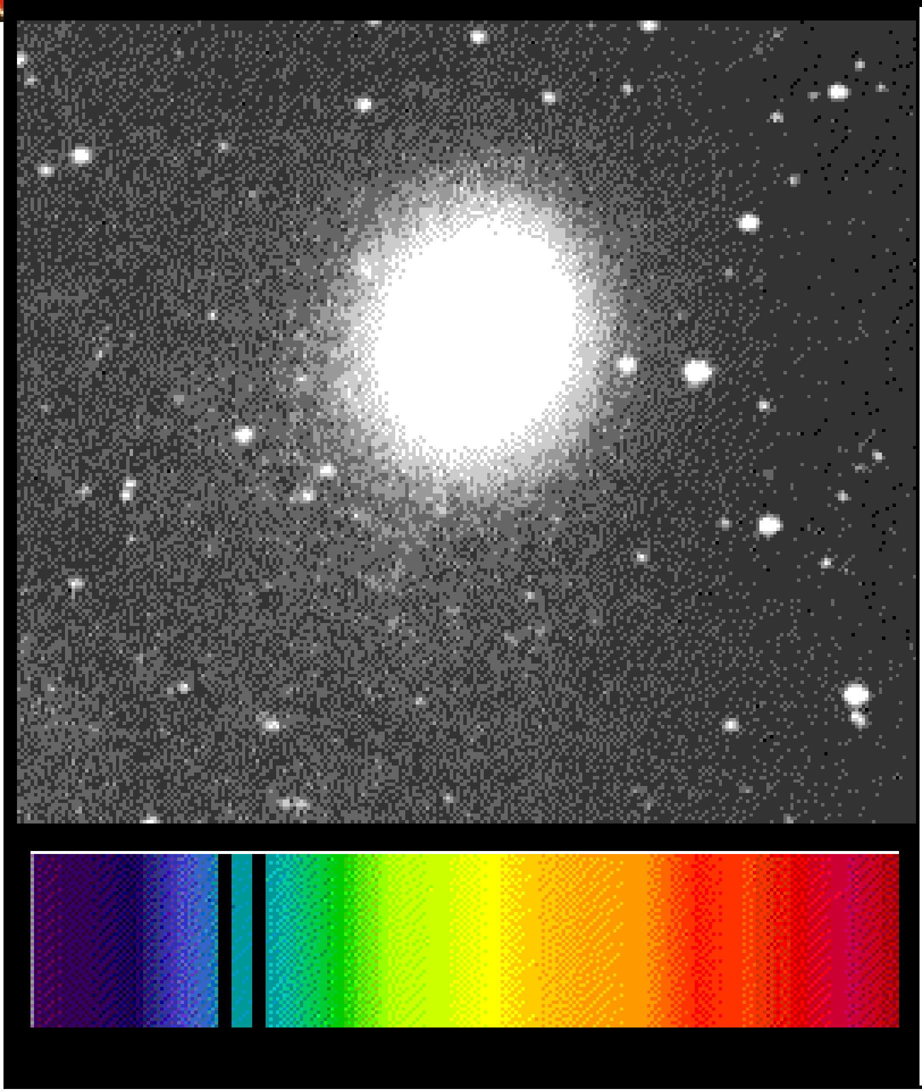
Se puede probar que si $v\ll c$

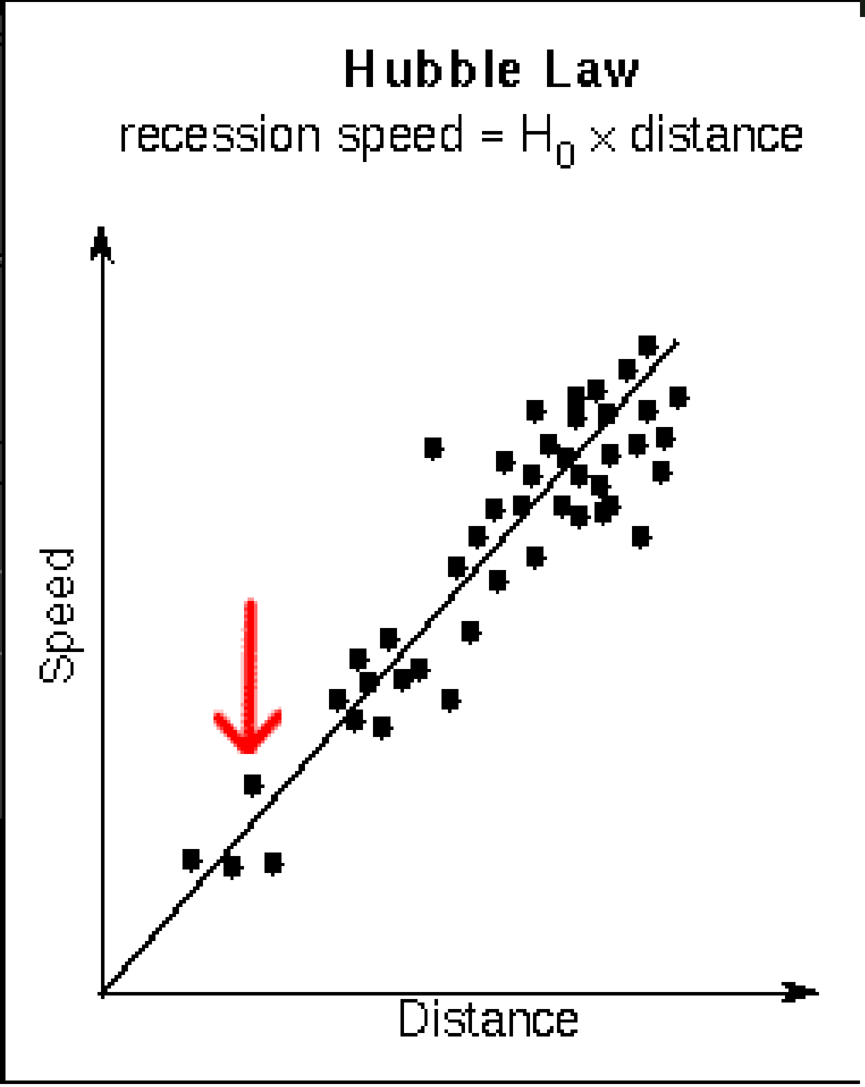
$$z\simeq\beta$$



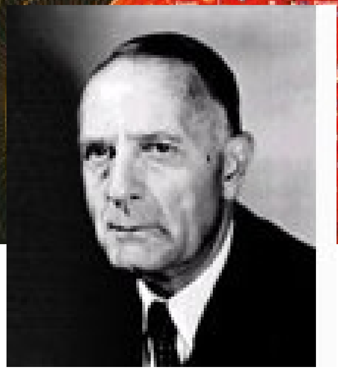


El Universo se expande



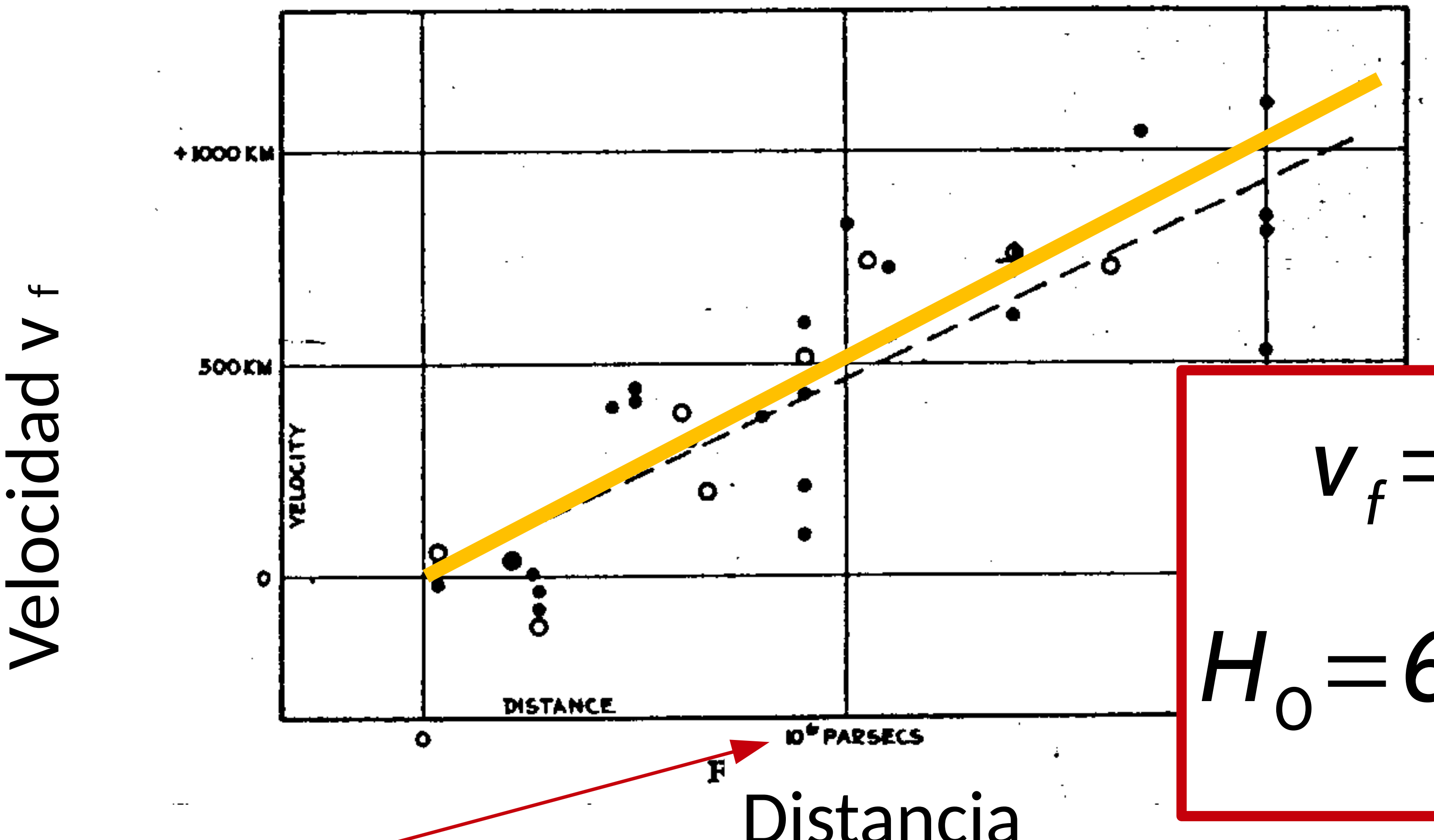


$$1+z=\frac{\lambda_o}{\lambda_e}=\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}; \qquad v=H_0 d; \qquad H_0=67\,\mathrm{km\,s^{-1}\,Mpc}$$



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



$$v_f = H_0 d$$

$$H_0 = 67 \frac{km}{s\,Mpc}$$

10^6 parsecs = 1 Mpc (megaparsec) = 3.085×10^{22} 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" 13.8×10^{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)

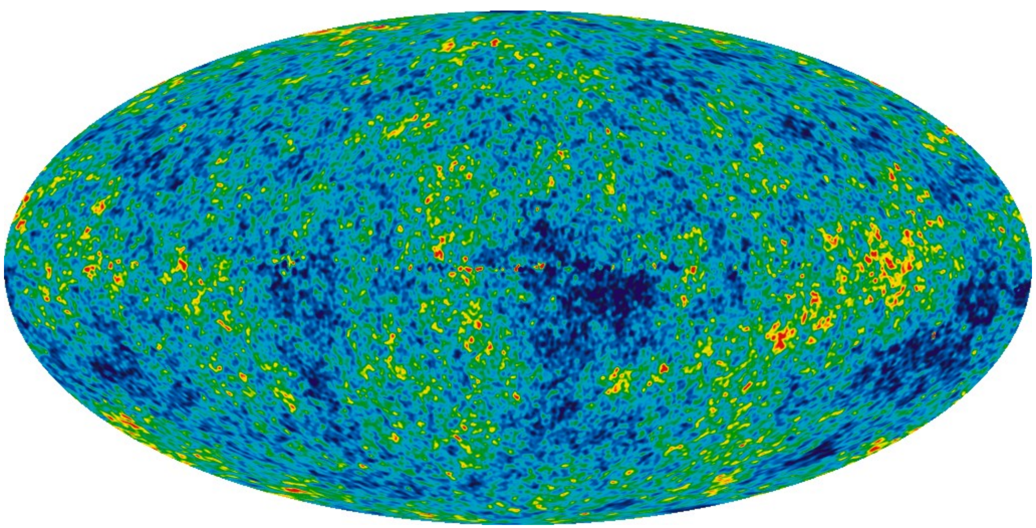
$$1\frac{M_\odot}{Mpc^3}$$

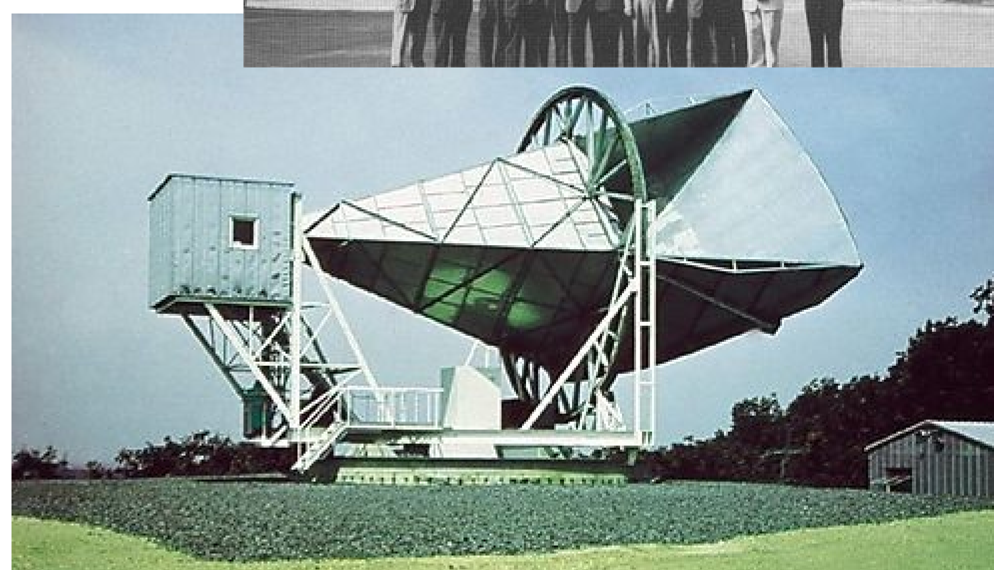
  - Universo homogeneo e isótropo

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

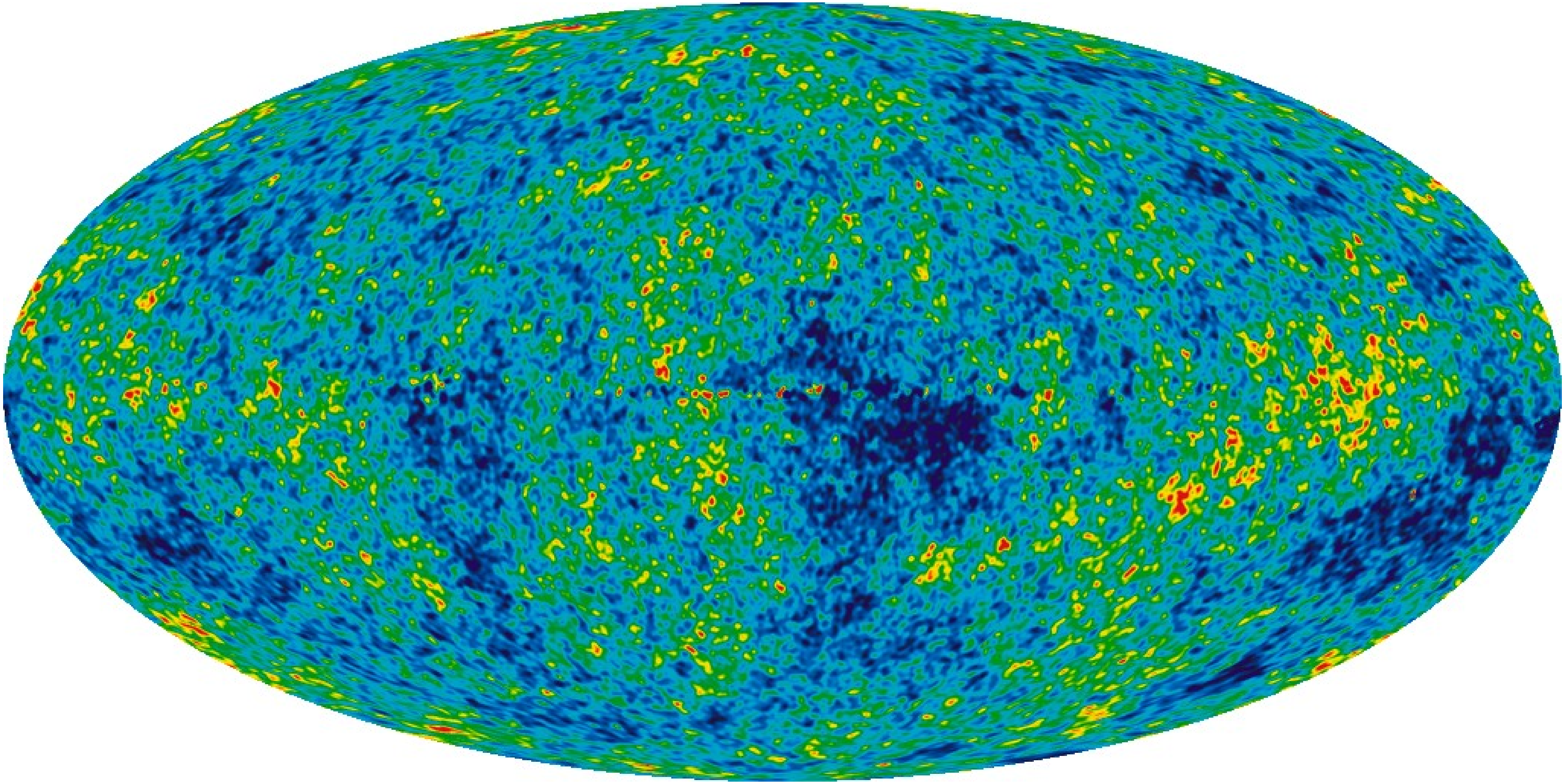
The Big Bang Theory

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

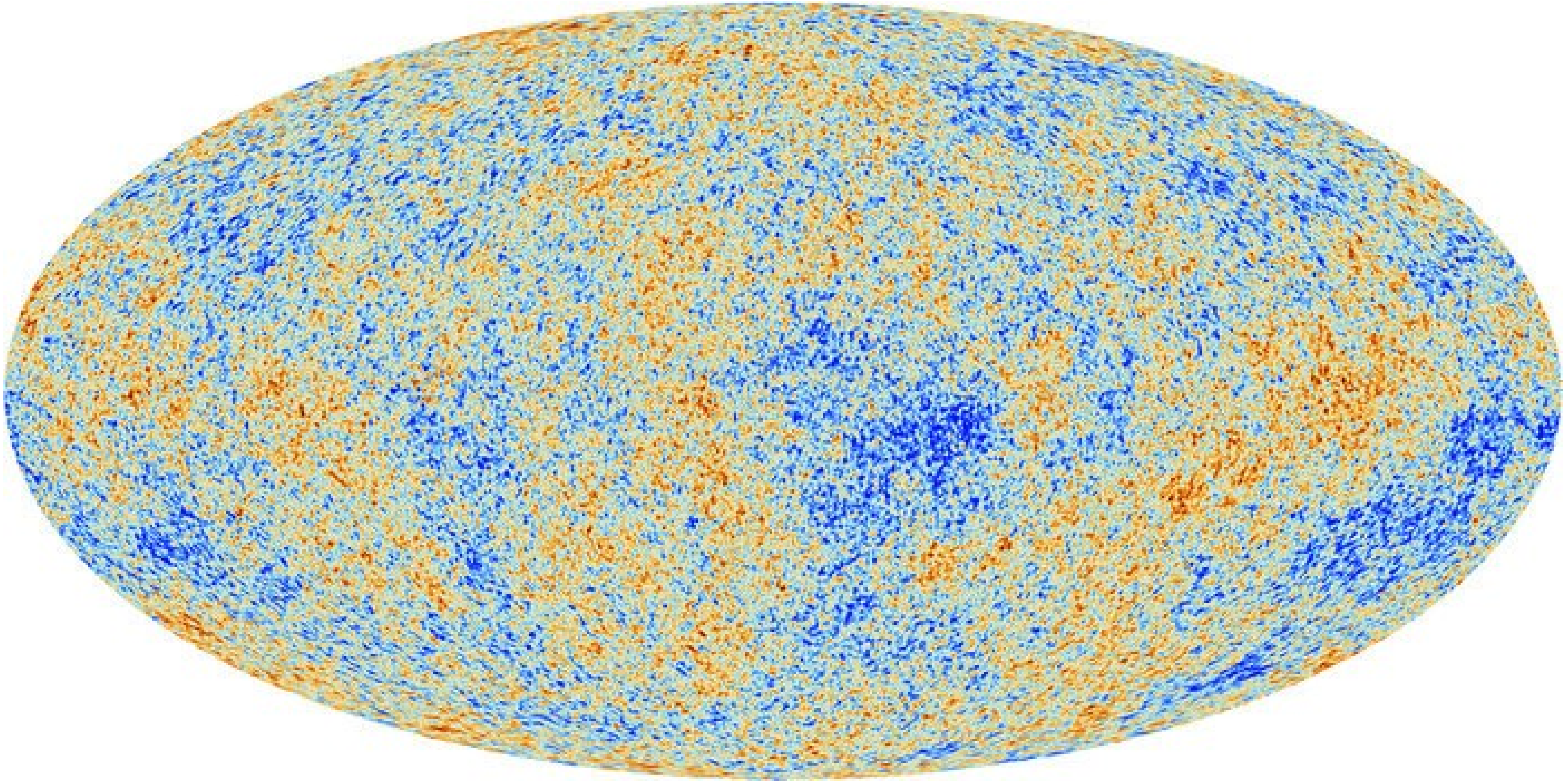




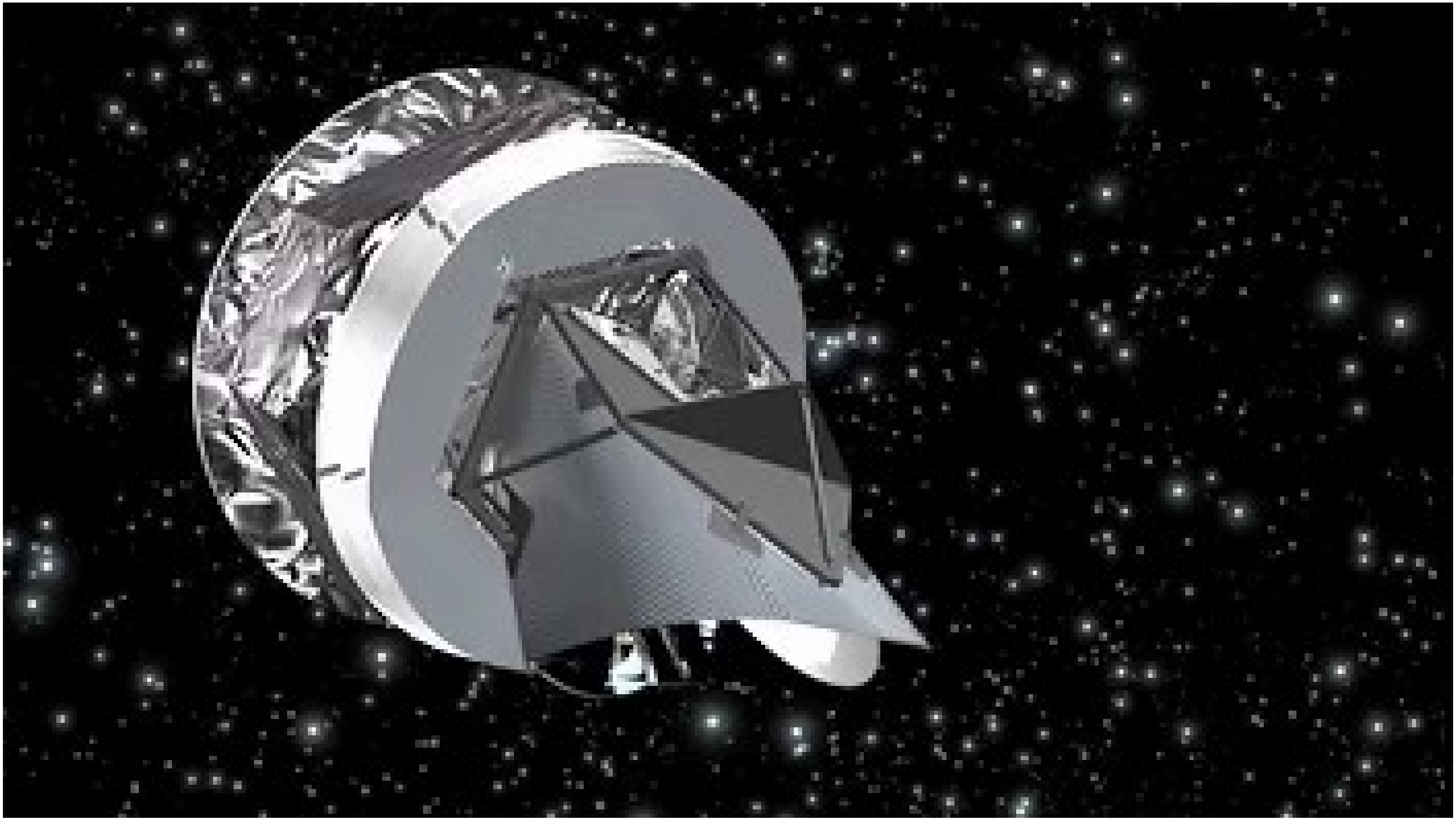
Radiación de fondo de microondas



Radiación de fondo de microondas



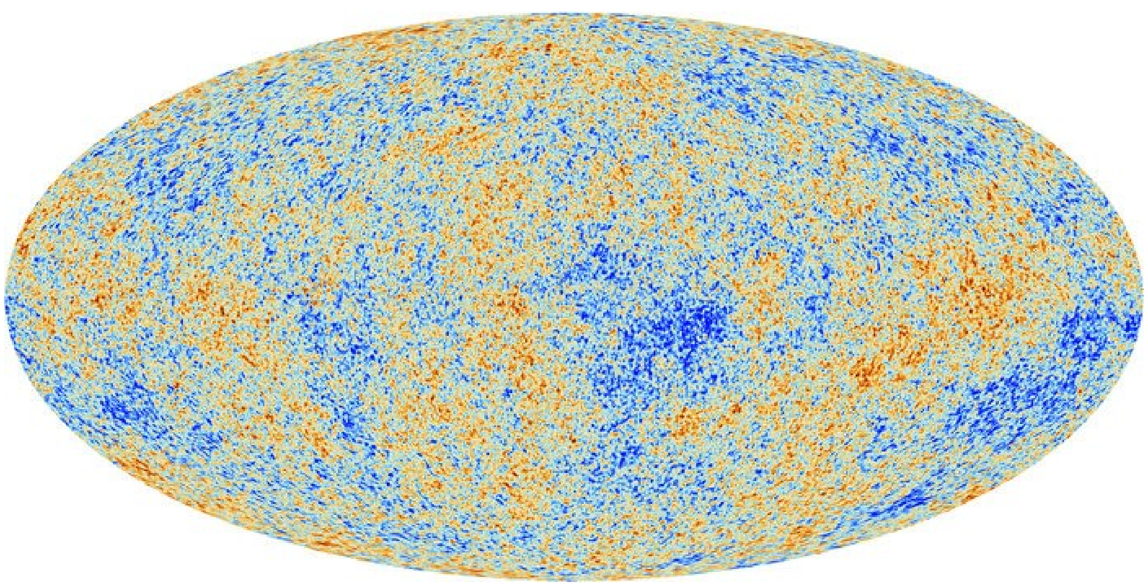
Asi se construye

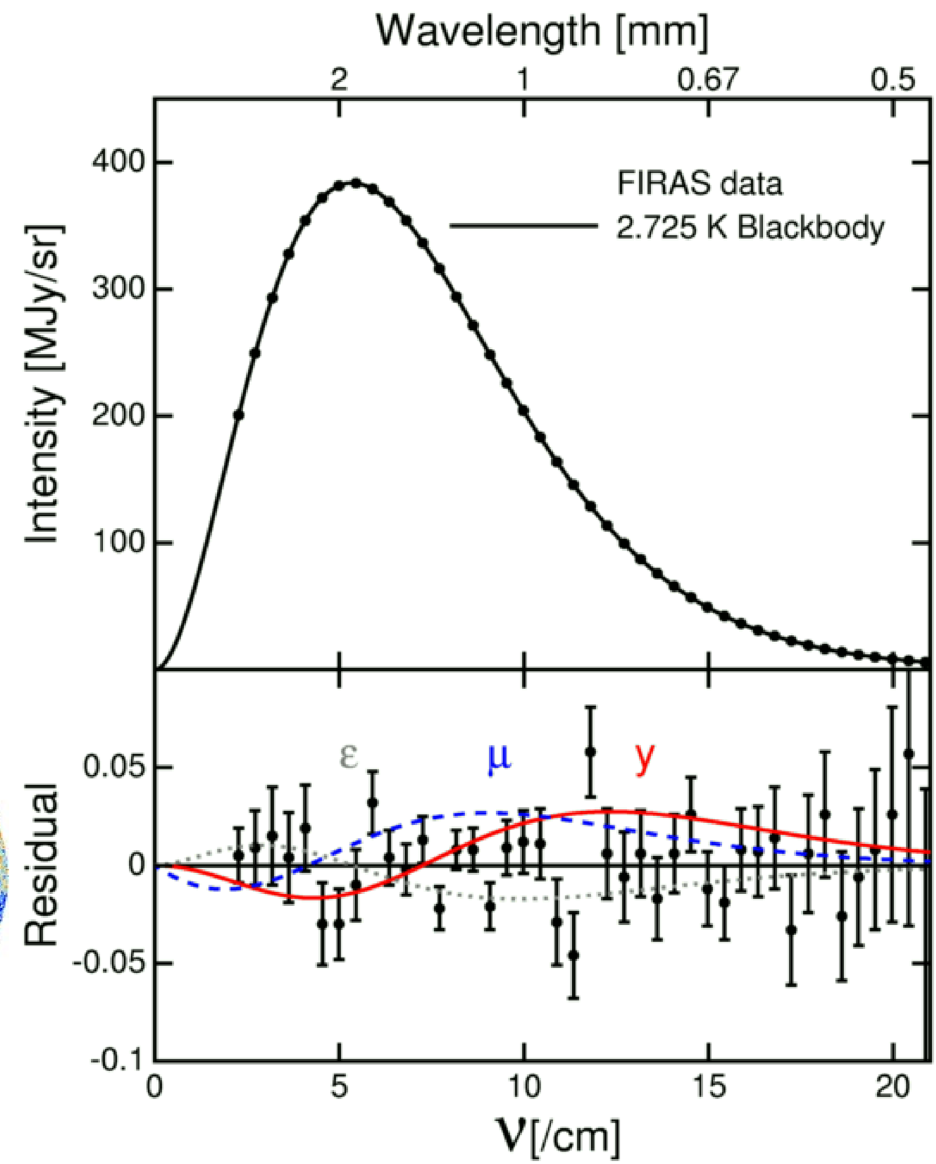


Radiación de fondo de microondas

- Radiación de cuerpo negro:

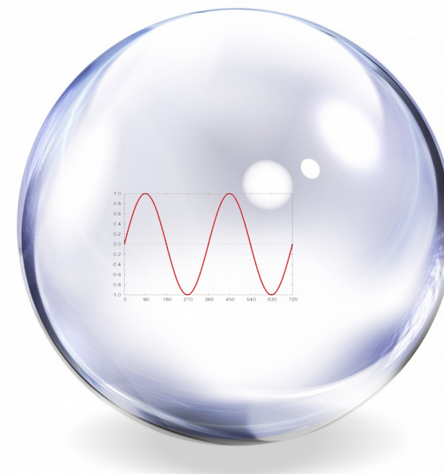
$$T = (2.726 \pm 0.0013)\,\mathrm{K}$$
$$n_\gamma = 430\ \text{fotones}/\mathrm{cm}^3$$
$$\langle E_\gamma / V \rangle = 0.25\,\mathrm{eV}/\mathrm{cm}^3$$



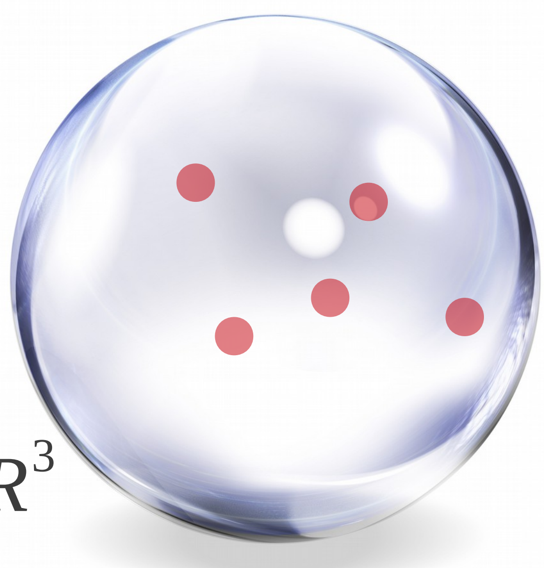


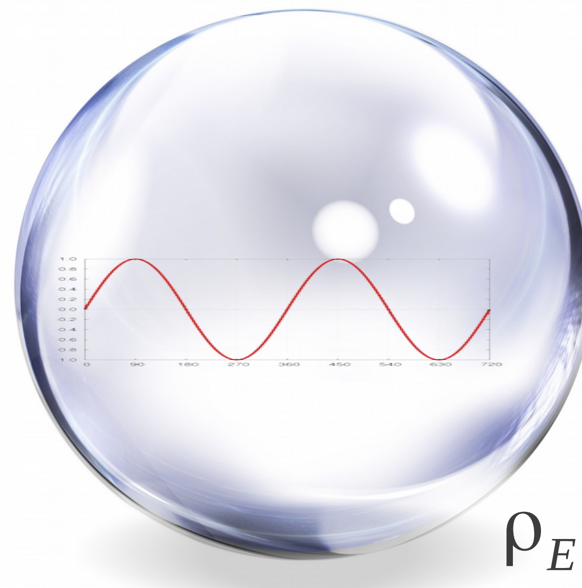
Materia y energía en la expansión

$$E = mc^2$$



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

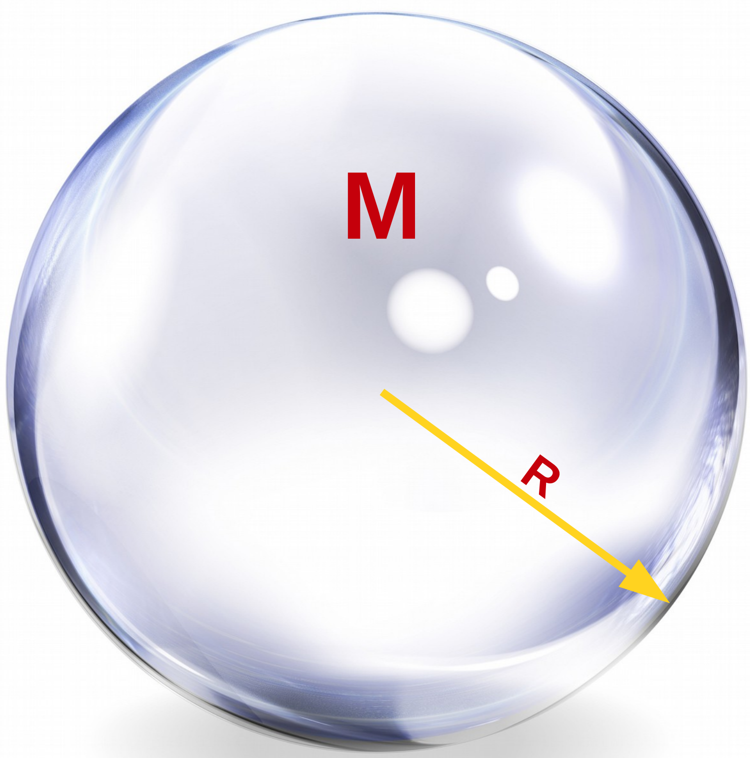




$$\rho_M \sim 1/R^3$$

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

¿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?

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

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

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?

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

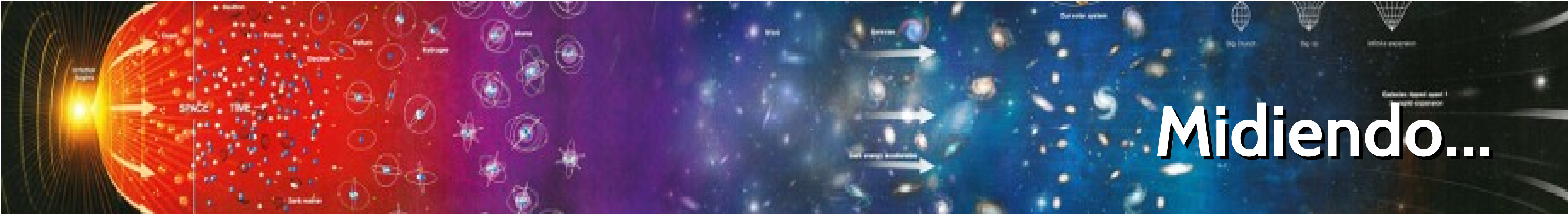
Si la esfera tiene densidad ρ y volumen $V \Rightarrow \rho = M/V \Rightarrow$

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

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: $\Omega = \rho \,/\, \rho_c$
- Ahora mido el contenido de materia del Universo, y obtengo:

$$\Omega = 1.00 \;\; +/- \; 0.01$$

¡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?

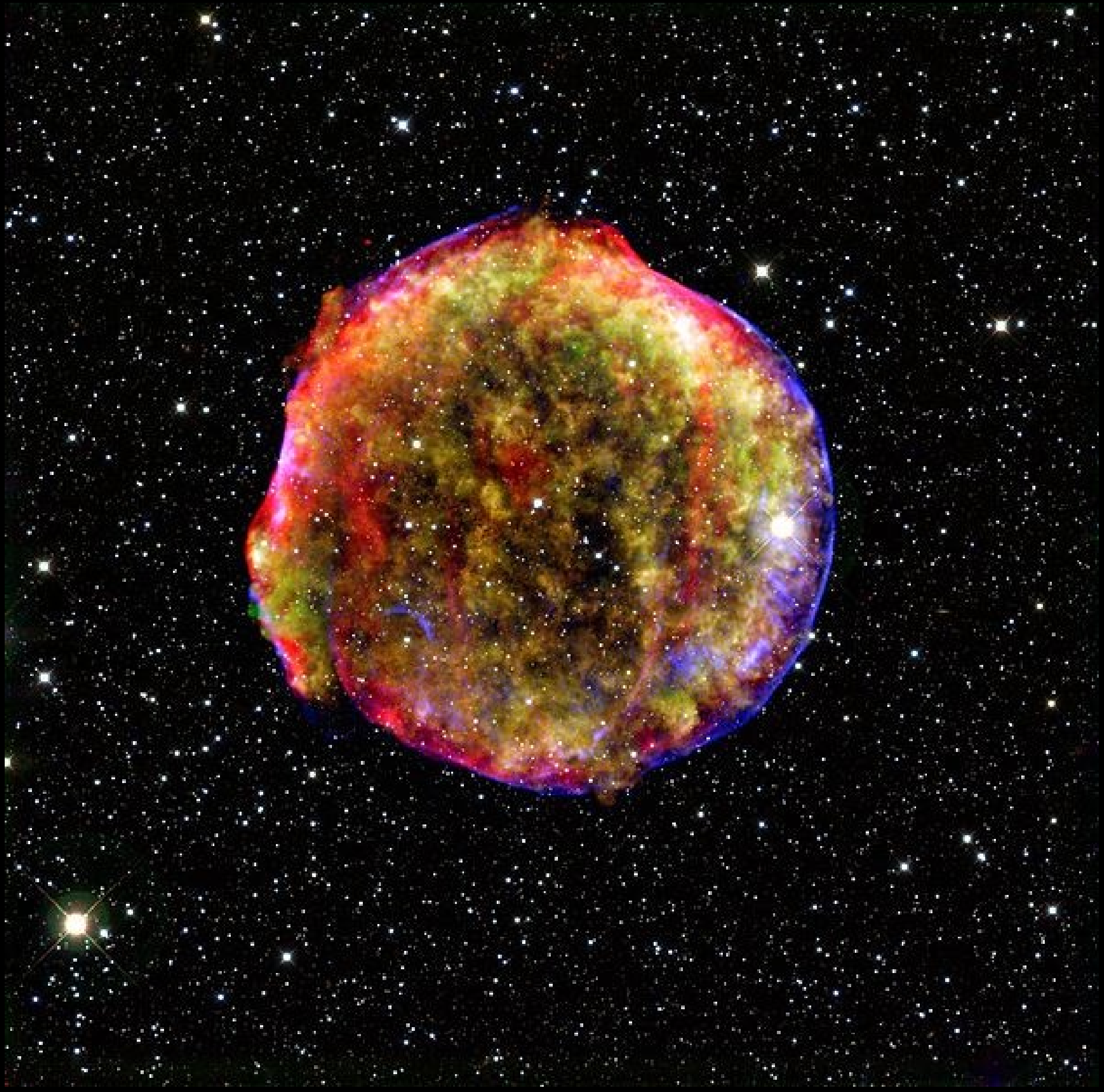
Contenido de materia energía del Universo

- Cómo se compone:
  - $\Omega k = 10^{-5}$
  - $\Omega \gamma = 0.002$
  - $\Omega m = 0.04$
- Total esperado: $\Omega = 0.0421$
- Total medido: $\Omega = 1 \rightarrow$ problemas

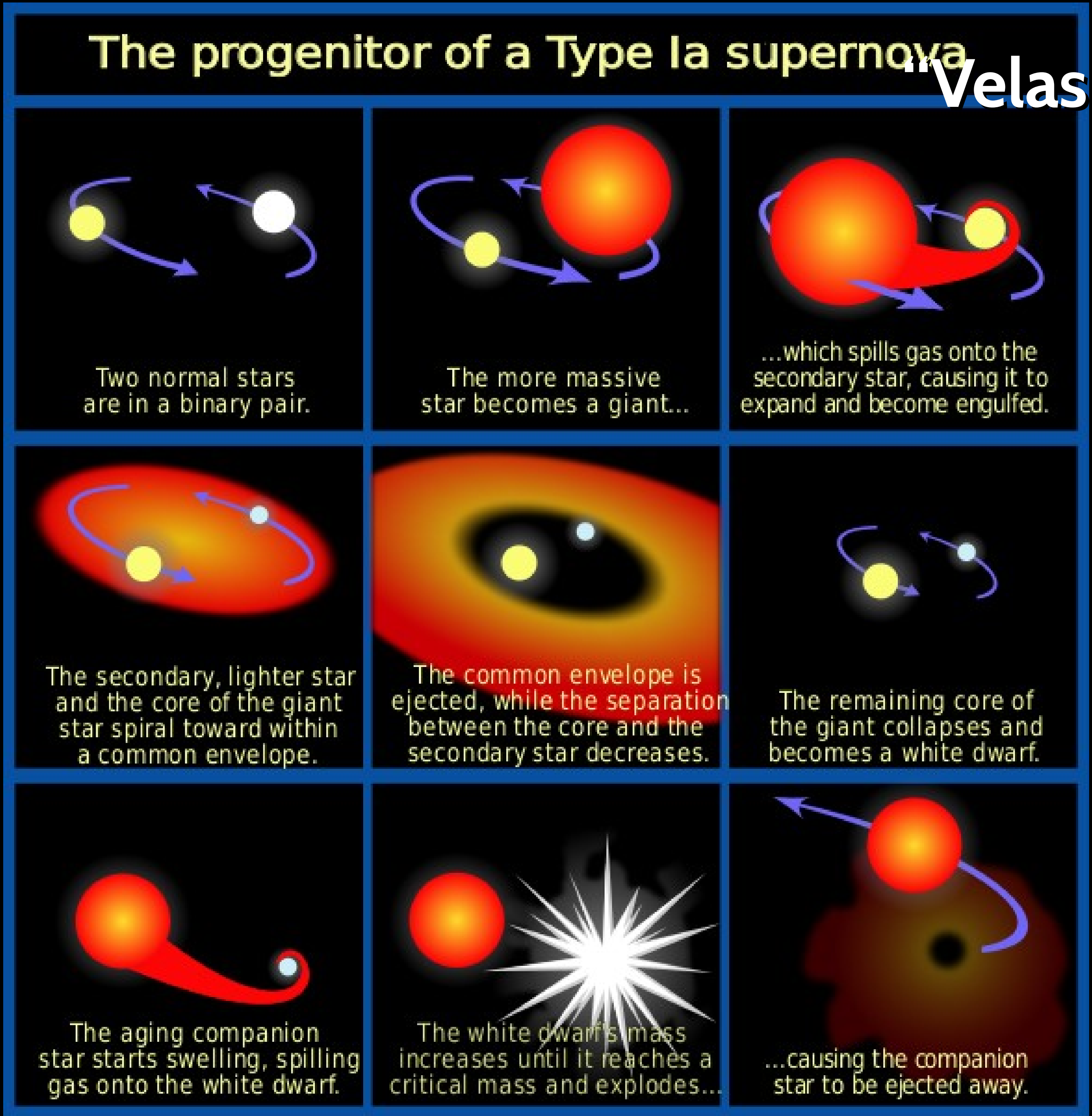
Contenido de materia energía del Universo

- Cómo se compone:
  - $\Omega k = 0.001\%$
  - $\Omega \gamma = 0.2\%$
  - $\Omega m = 4\%$
  - $\Omega M = 23\%$
  - $\Omega E = 73\%$

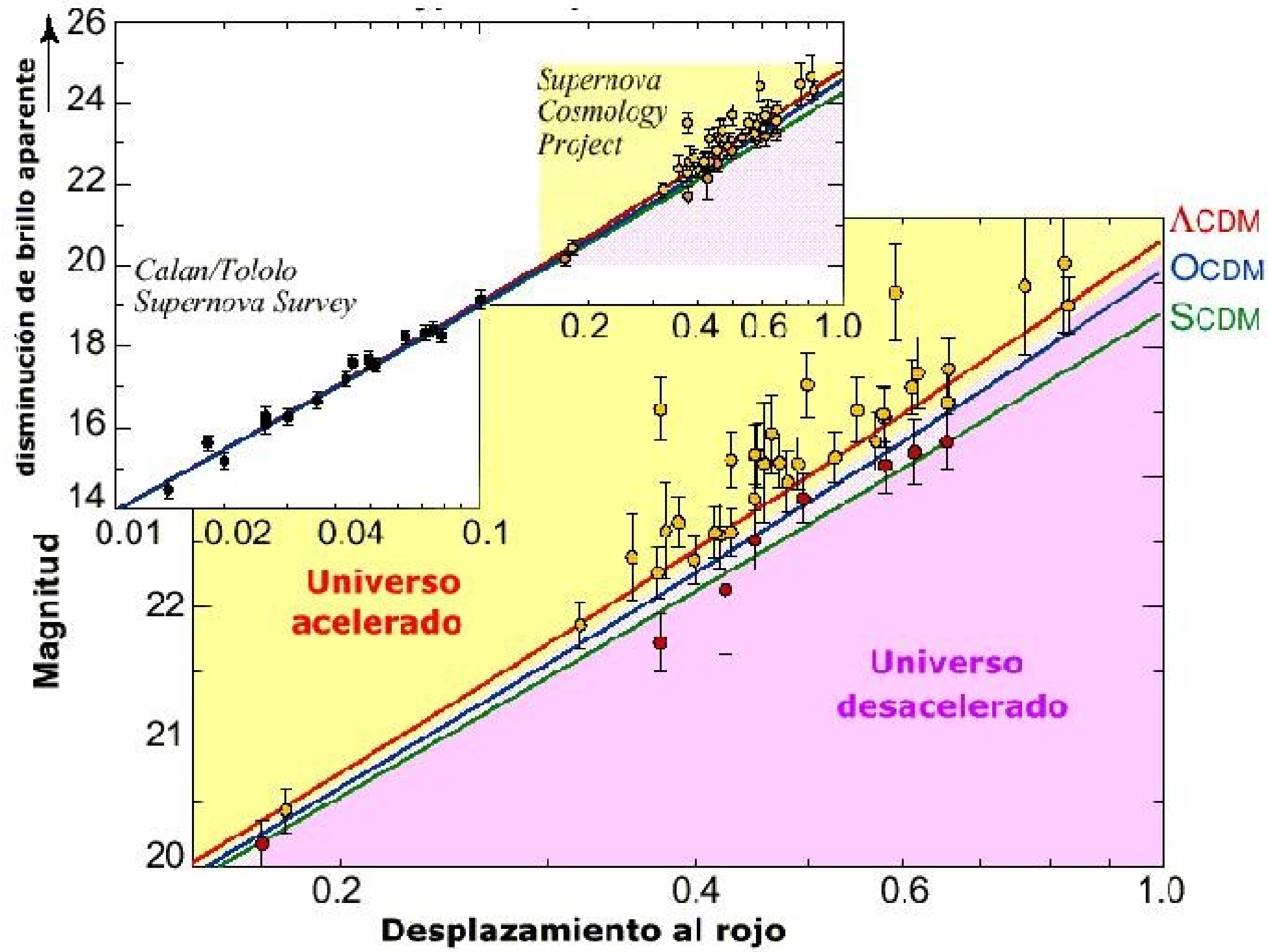
Supernovas Ia



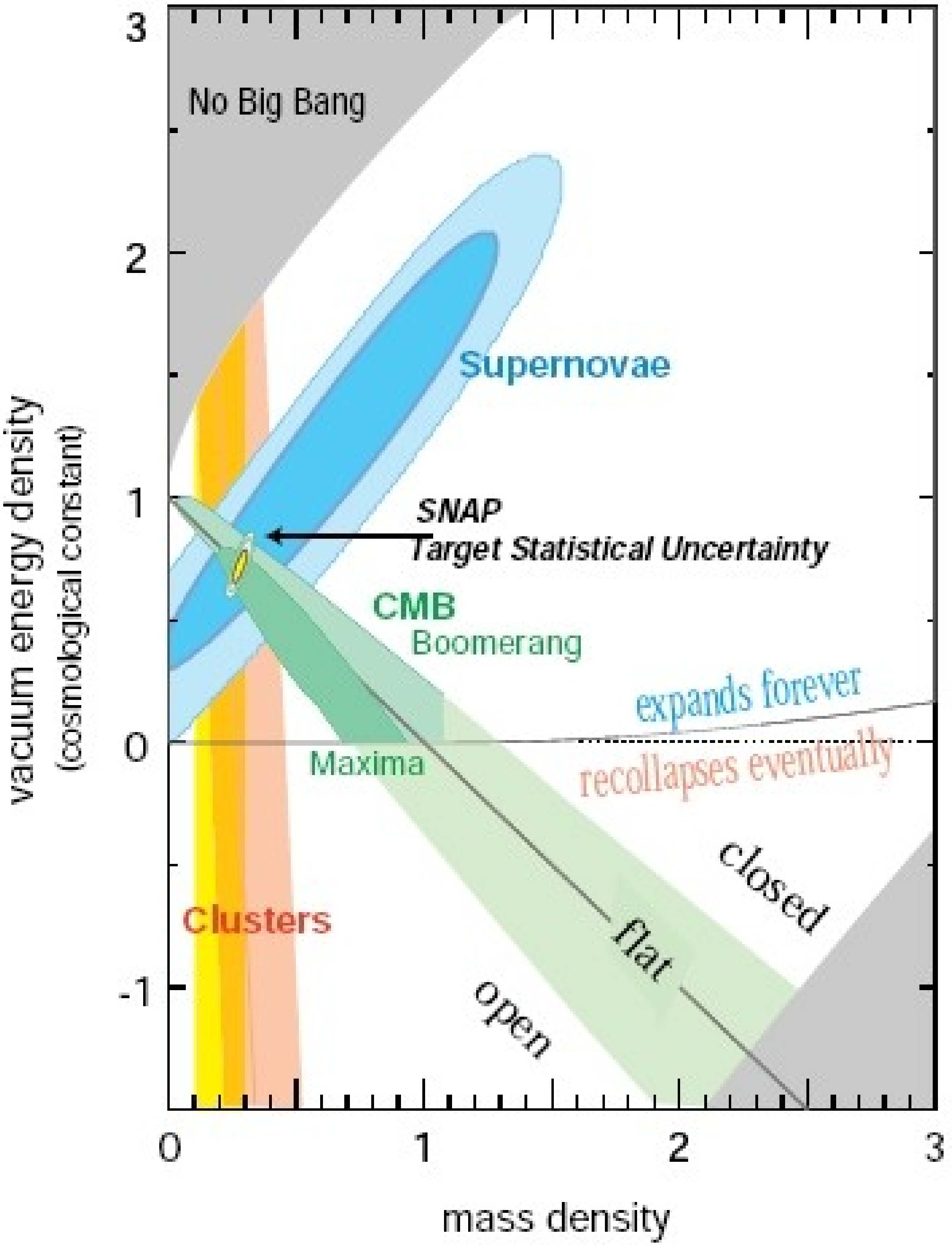
“Velas estándares”



Expansión acelerada



elo cosmológico



El nuevo diagrama de Hubble