



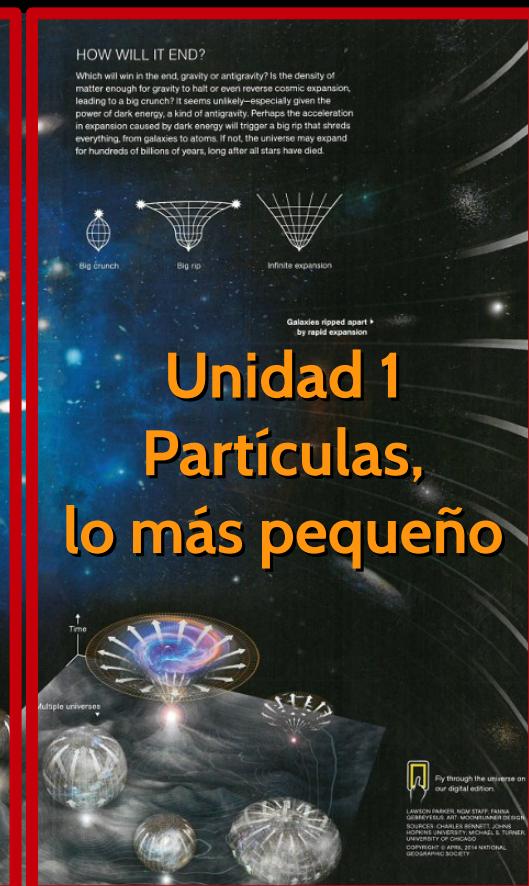
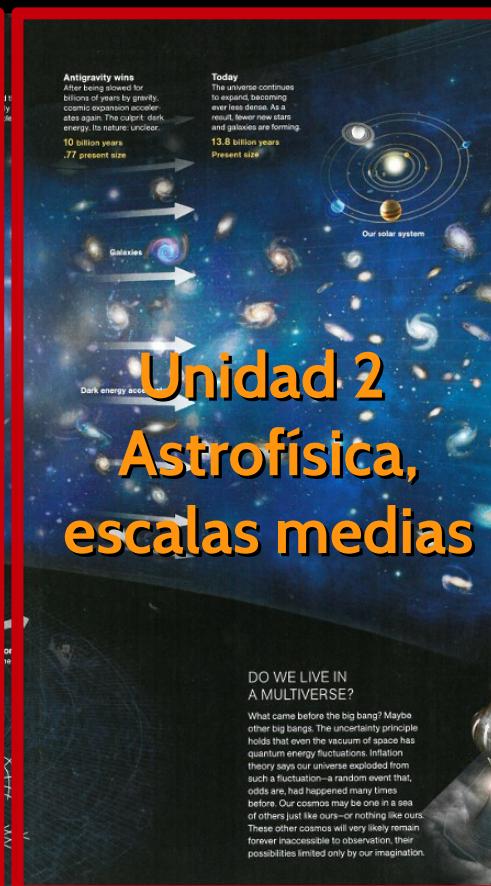
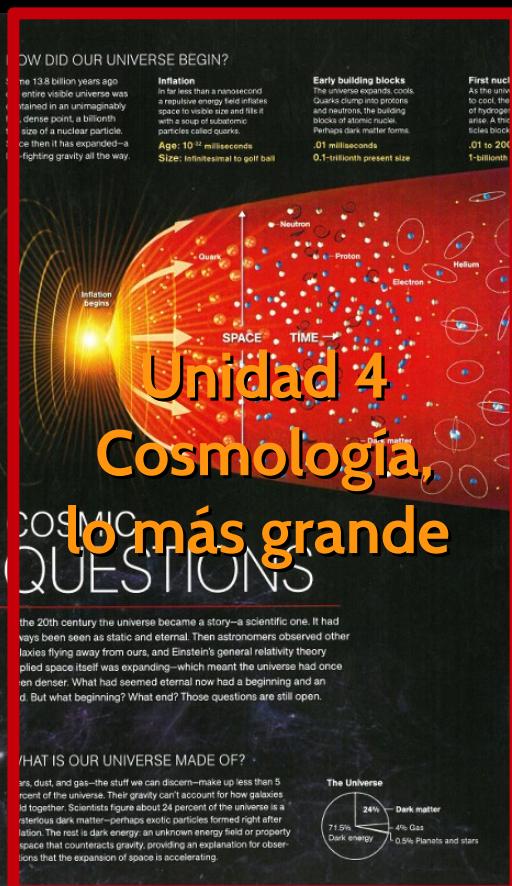
Universidad Nacional de Río Negro

Int Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2021

- **Unidad** 04-Cosmología
- **Clase** UO4 C02 - 15/16
- **Fecha** 10 Nov 2021
- **Cont** El Big Bang
- **Cátedra** Asorey



Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio





U4: Cosmología, las escalas más grandes

3 encuentros, del 03/Nov al 17/Nov

- **Modelo cosmológico estándar**
 - El fondo de microondas.
 - Modelo de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker.
 - El Big Bang. Modelo de Alpher, Bethe & Gamow.
 - Modelo LCDM.
- **Historia térmica del universo.**
 - Épocas térmicas
 - Primeros segundos del universo
 - Evolución futura del universo.
 - ¿El fin...?
- **Trabajo unidad → Charla tema a elección 17/Nov**

Principio de Equivalencia

- Principio de equivalencia de Einstein:

$$m_g = m_i$$

Un sistema en presencia de un campo gravitatorio es indistinguible de un sistema de referencia no inercial acelerado

- Principio de equivalencia fuerte

$$m_g \equiv m_i$$

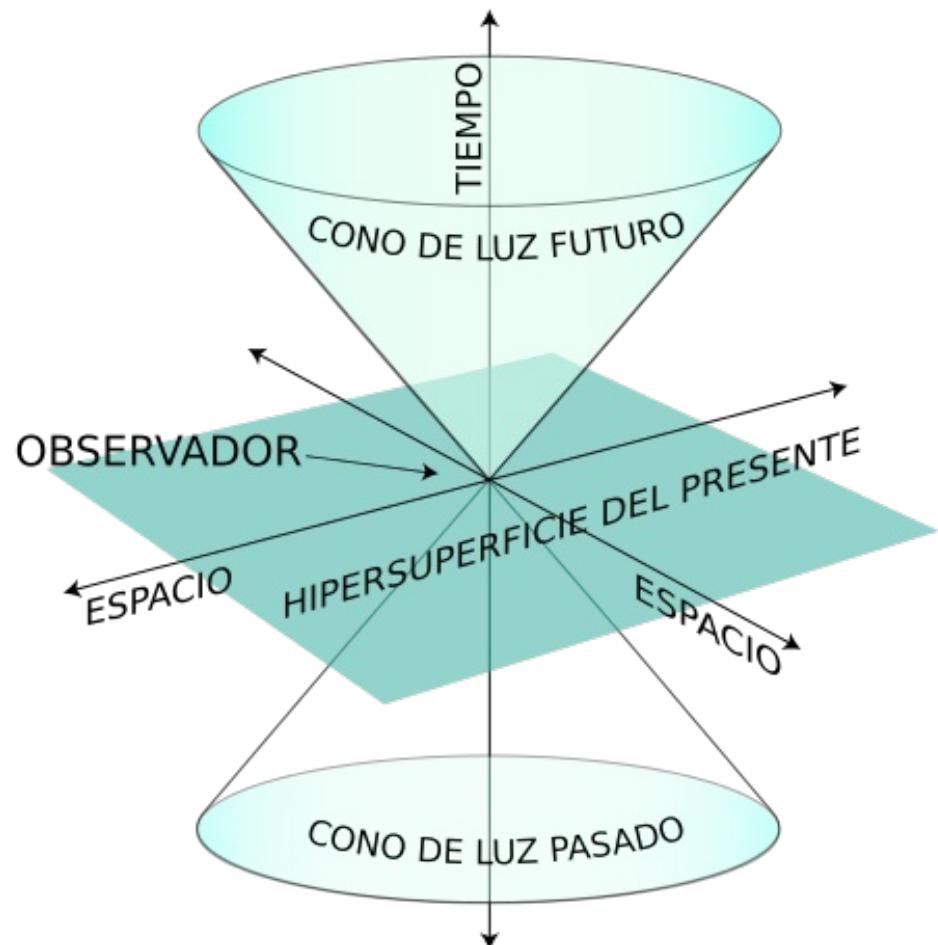
No hay ningún experimento que permita distinguir ambos

- Principio de equivalencia débil

$$m_g \simeq m_i$$

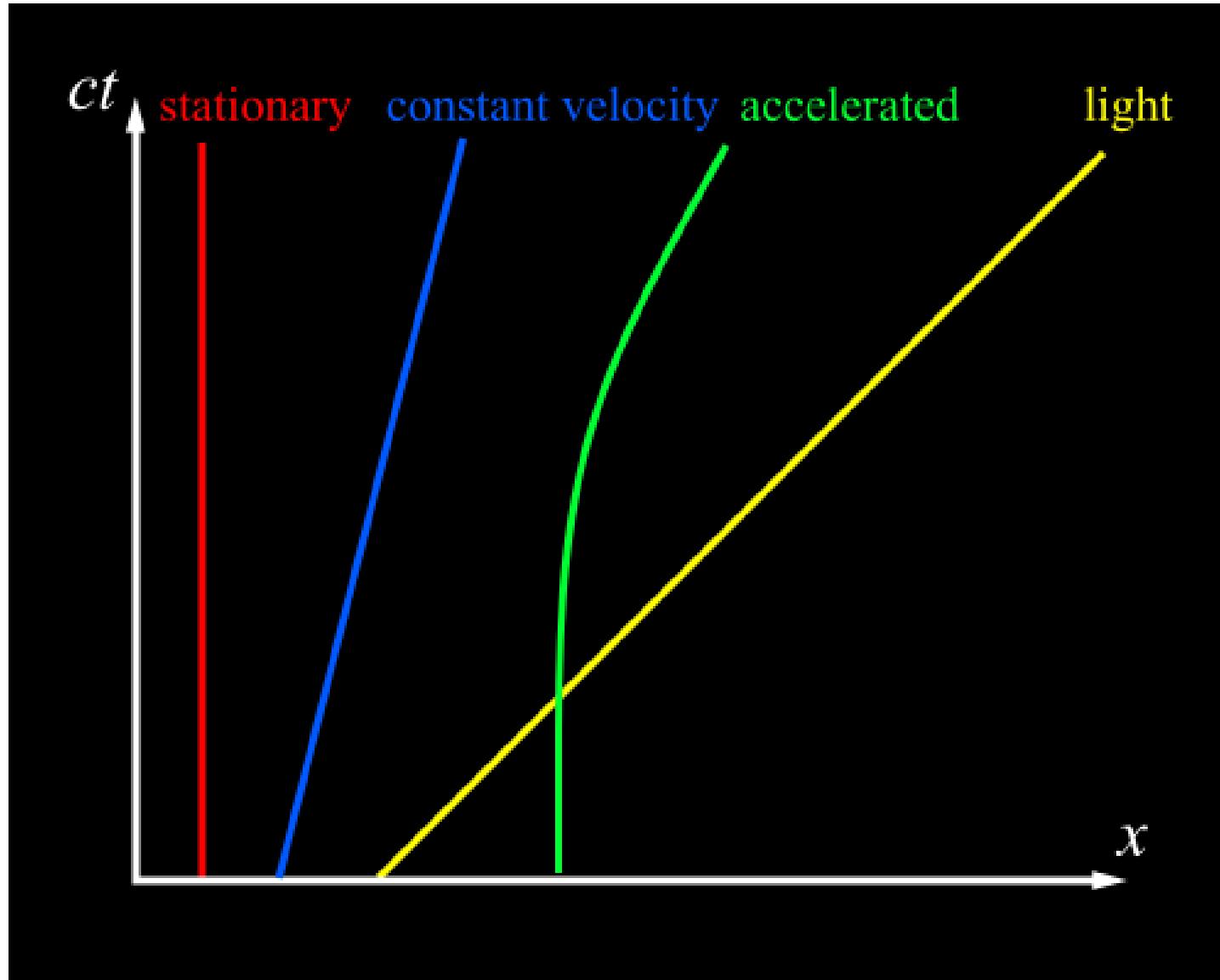
La masa inercial y la masa gravitatoria son las indistinguibles

Conos de luz

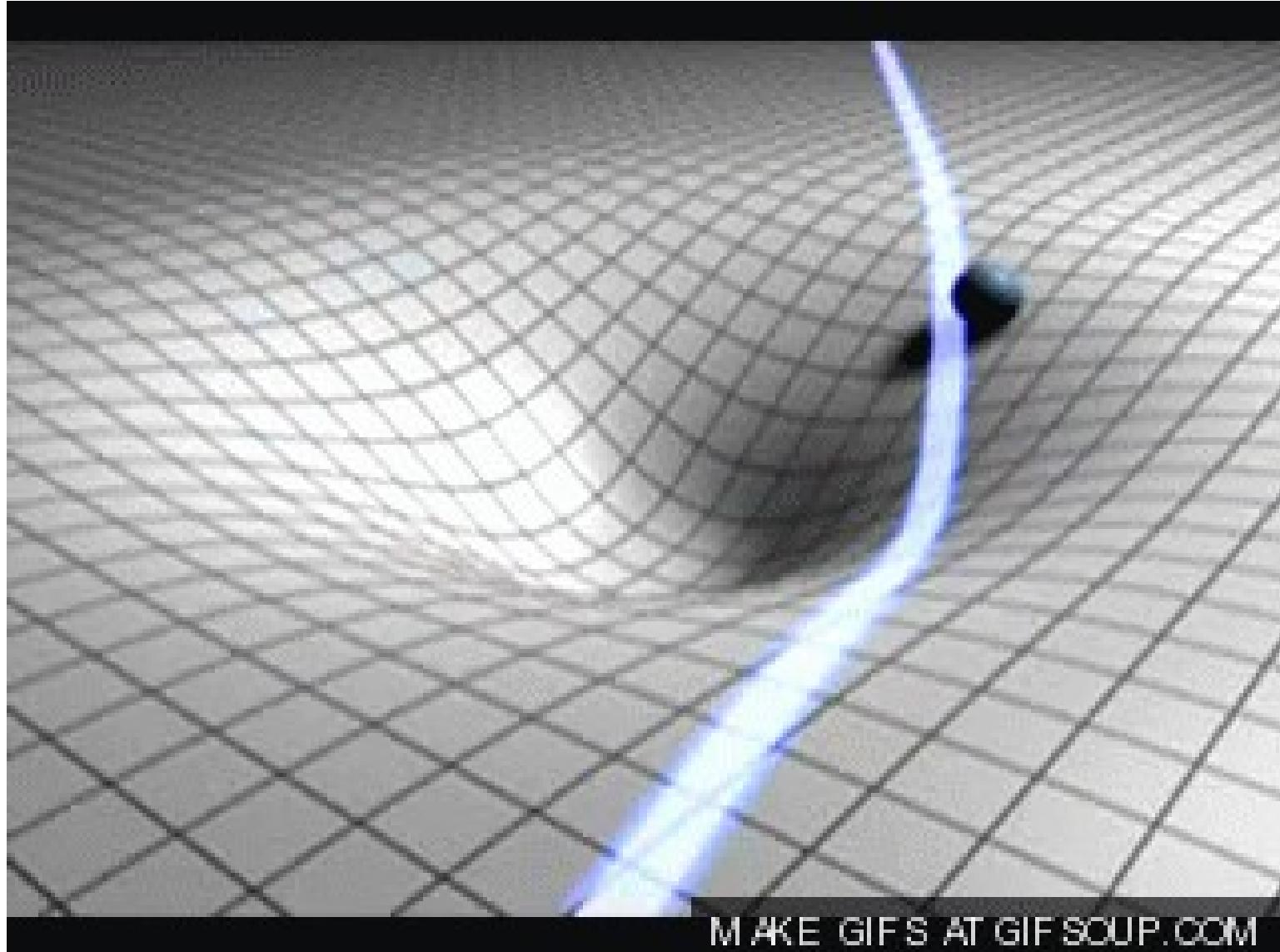


- La velocidad de la luz (maximal) define una hipersuperficie maximal para todos los objetos del Universo
- Nada puede estar fuera de los conos de luz

Distintas líneas de mundo

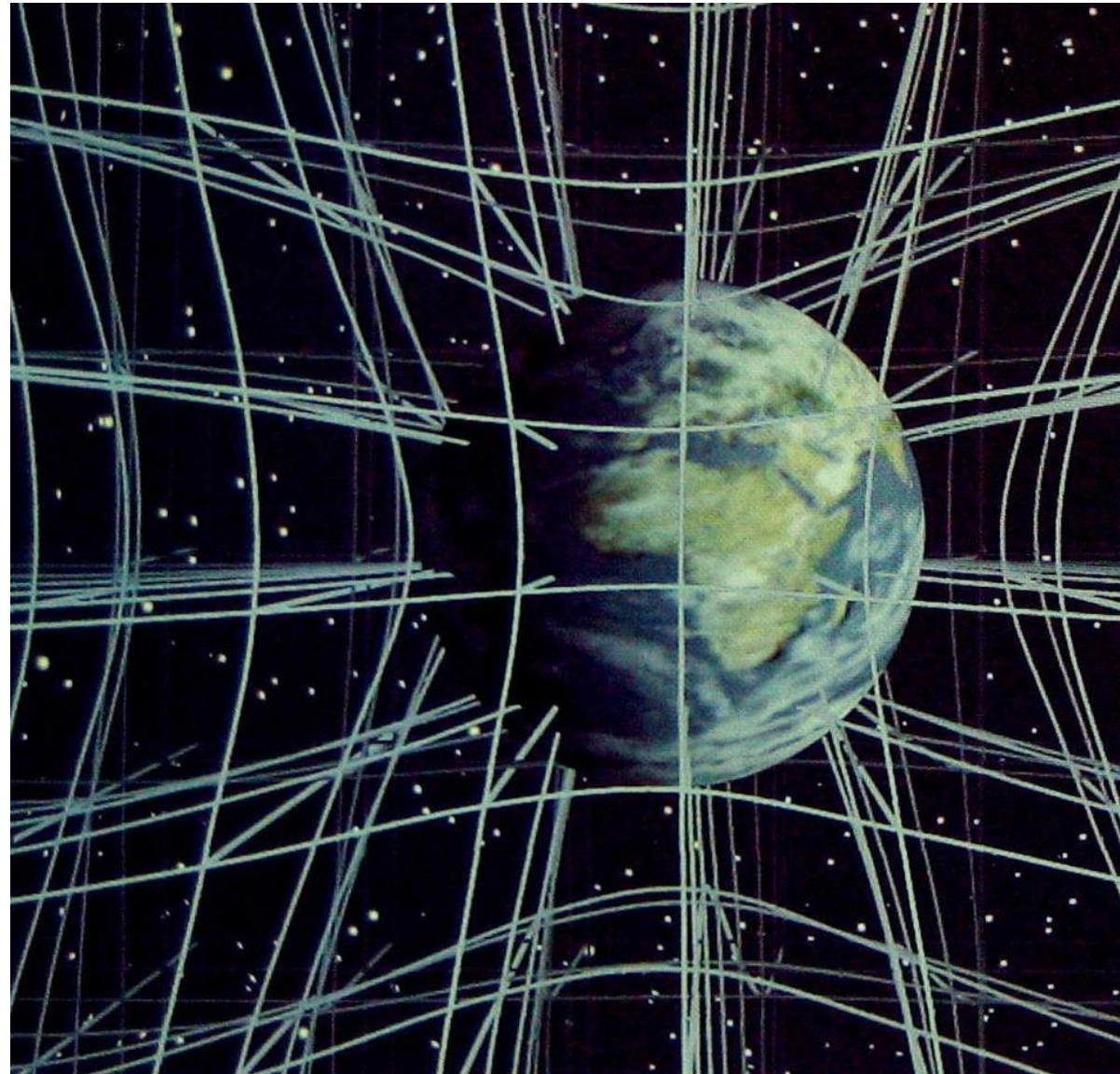


Línea de mundo → Geodésica

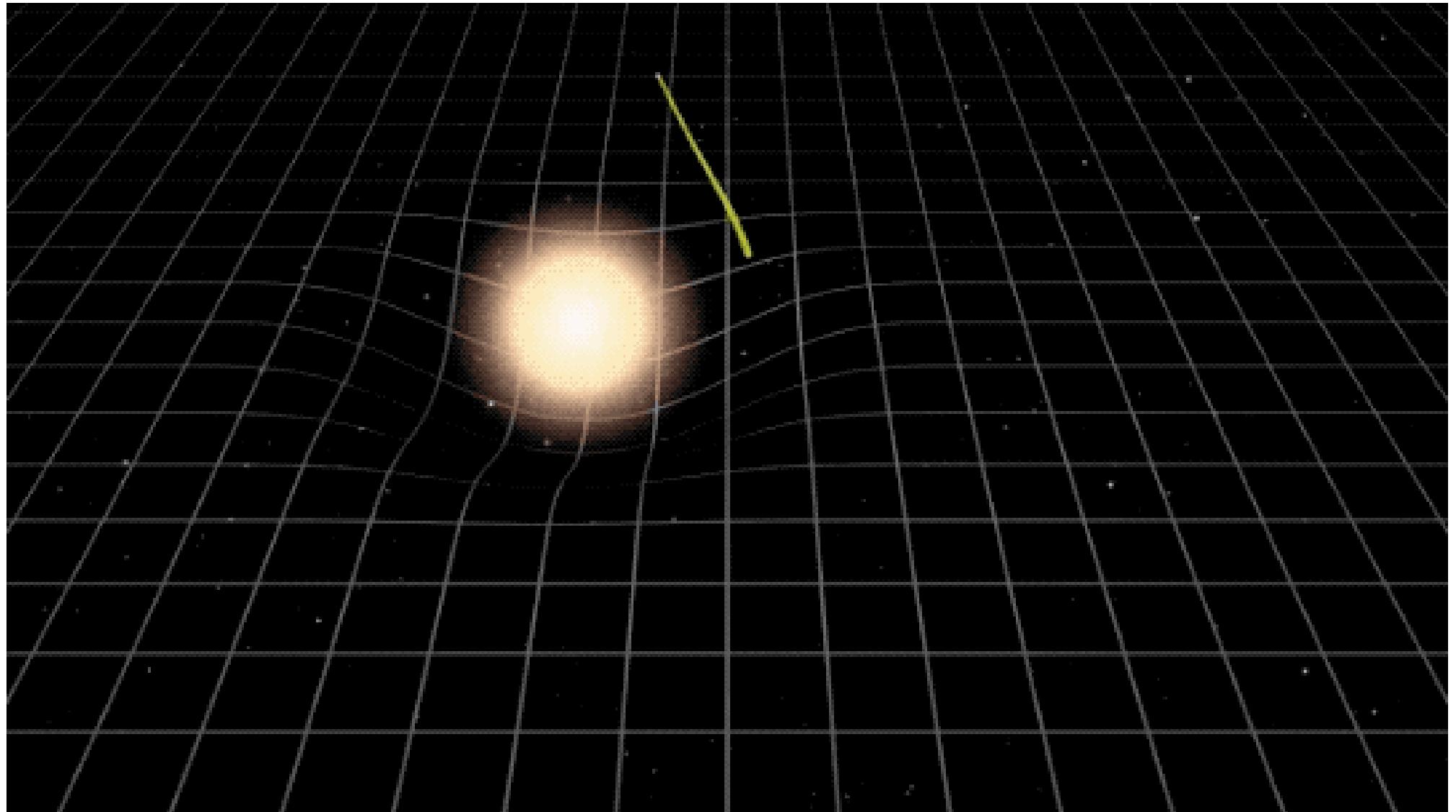


MAKE GIFS AT GIFSOUP.COM

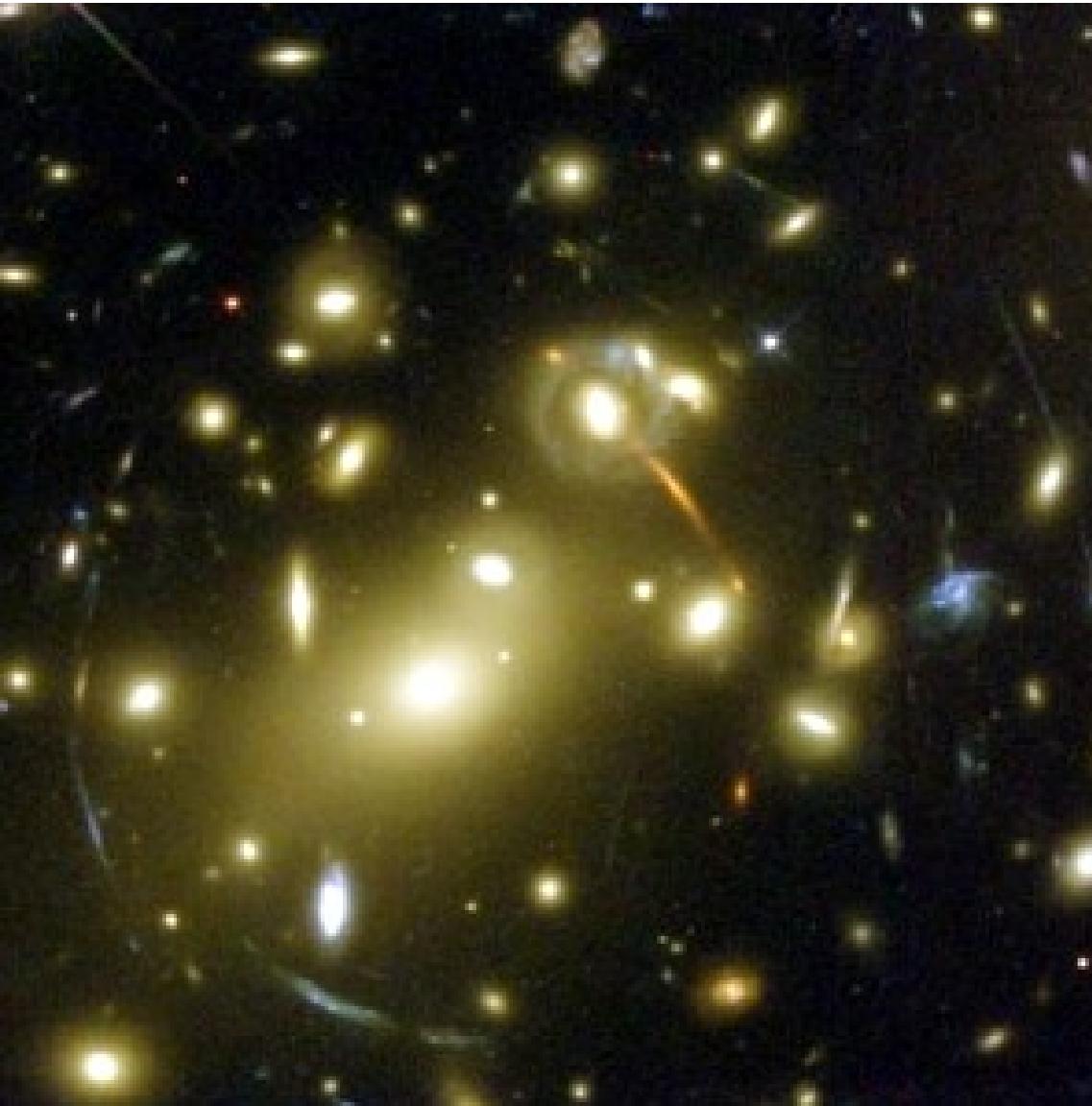
Espacio tiempo curvo por un objeto masivo

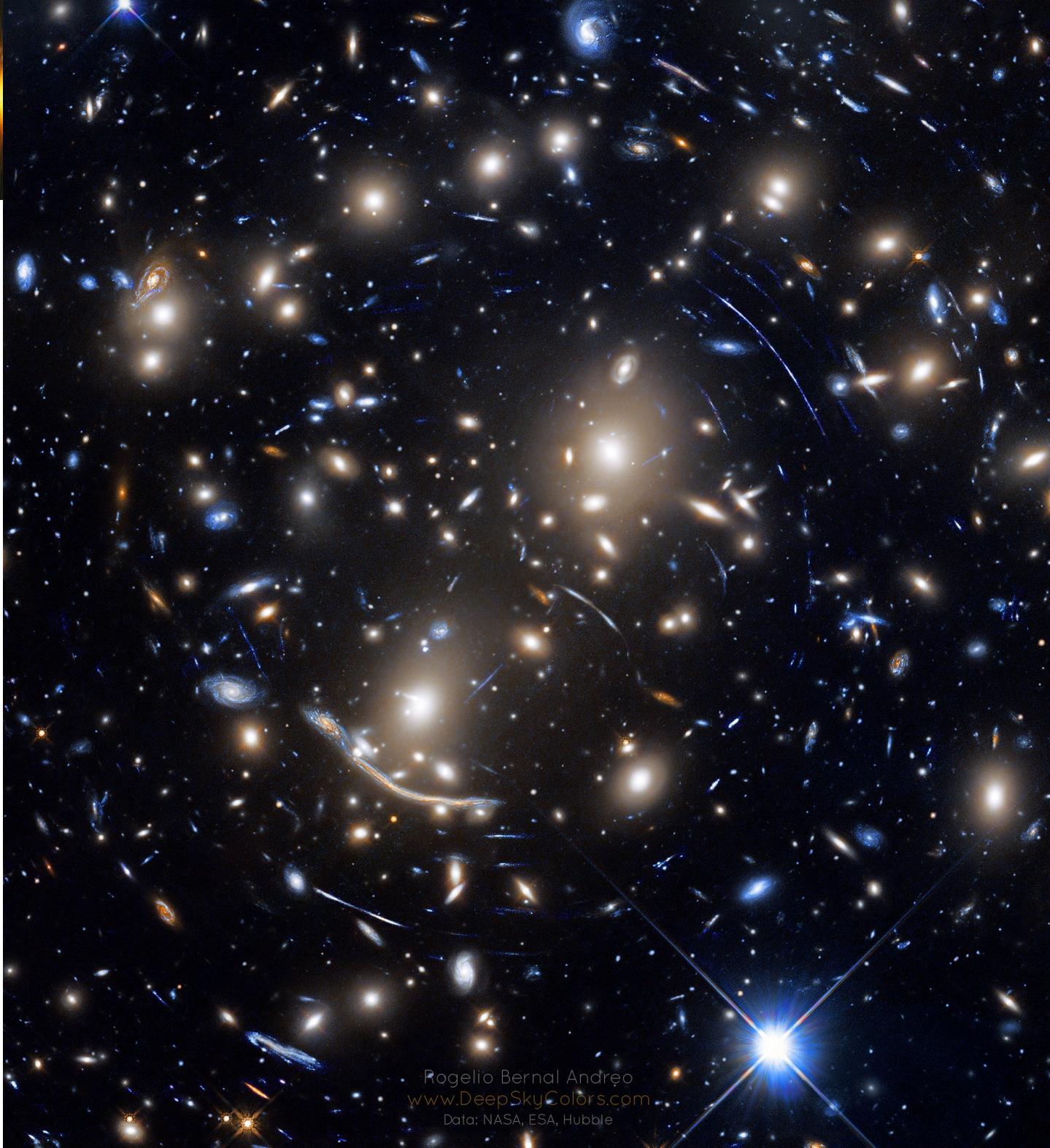


Movimiento de la luz y lentes gravitacionales



Sistema Abel 2218





Abel370

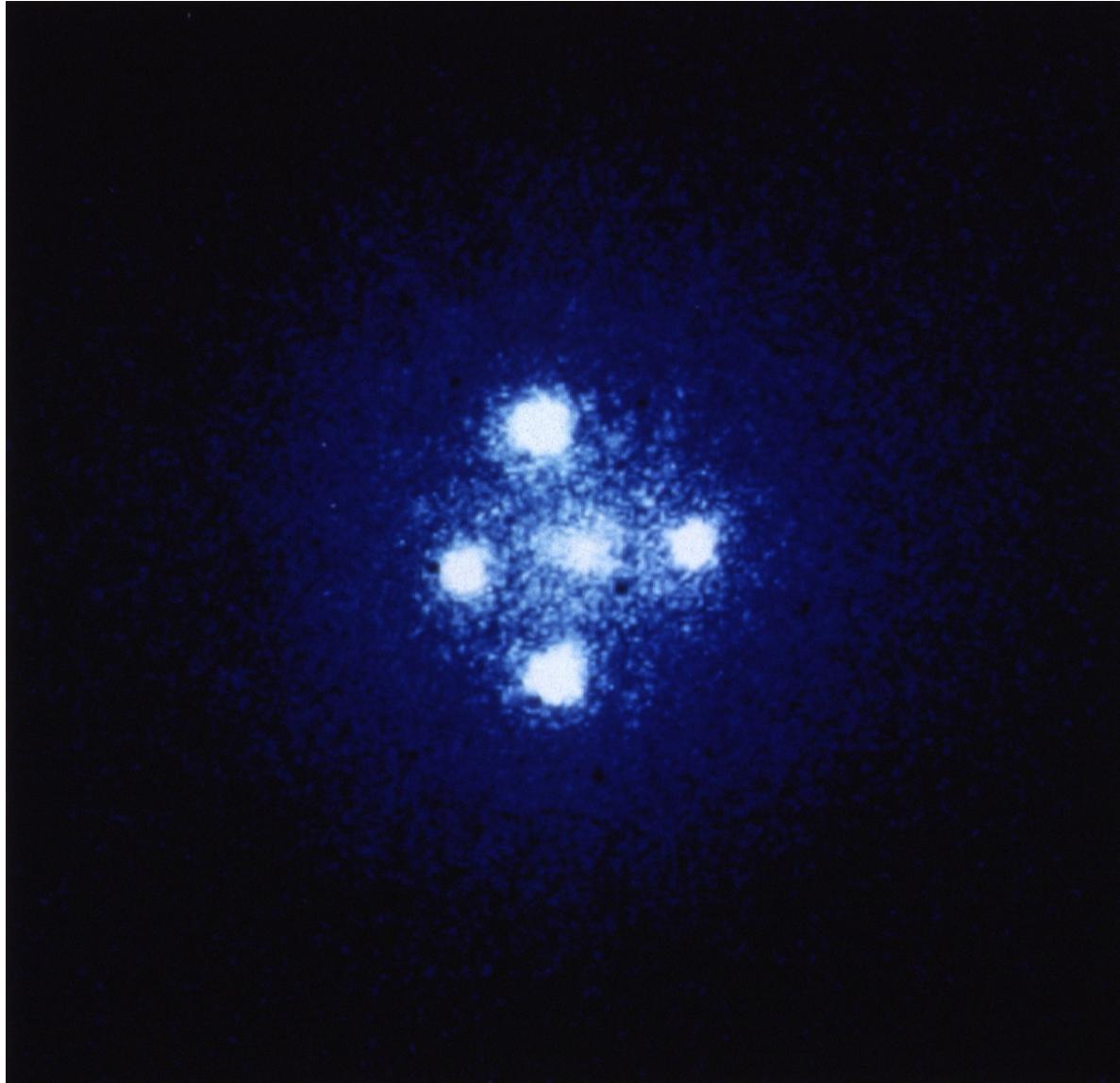
Rogelio Bernal Andreo
www.DeepSkyColors.com
Data: NASA, ESA, Hubble



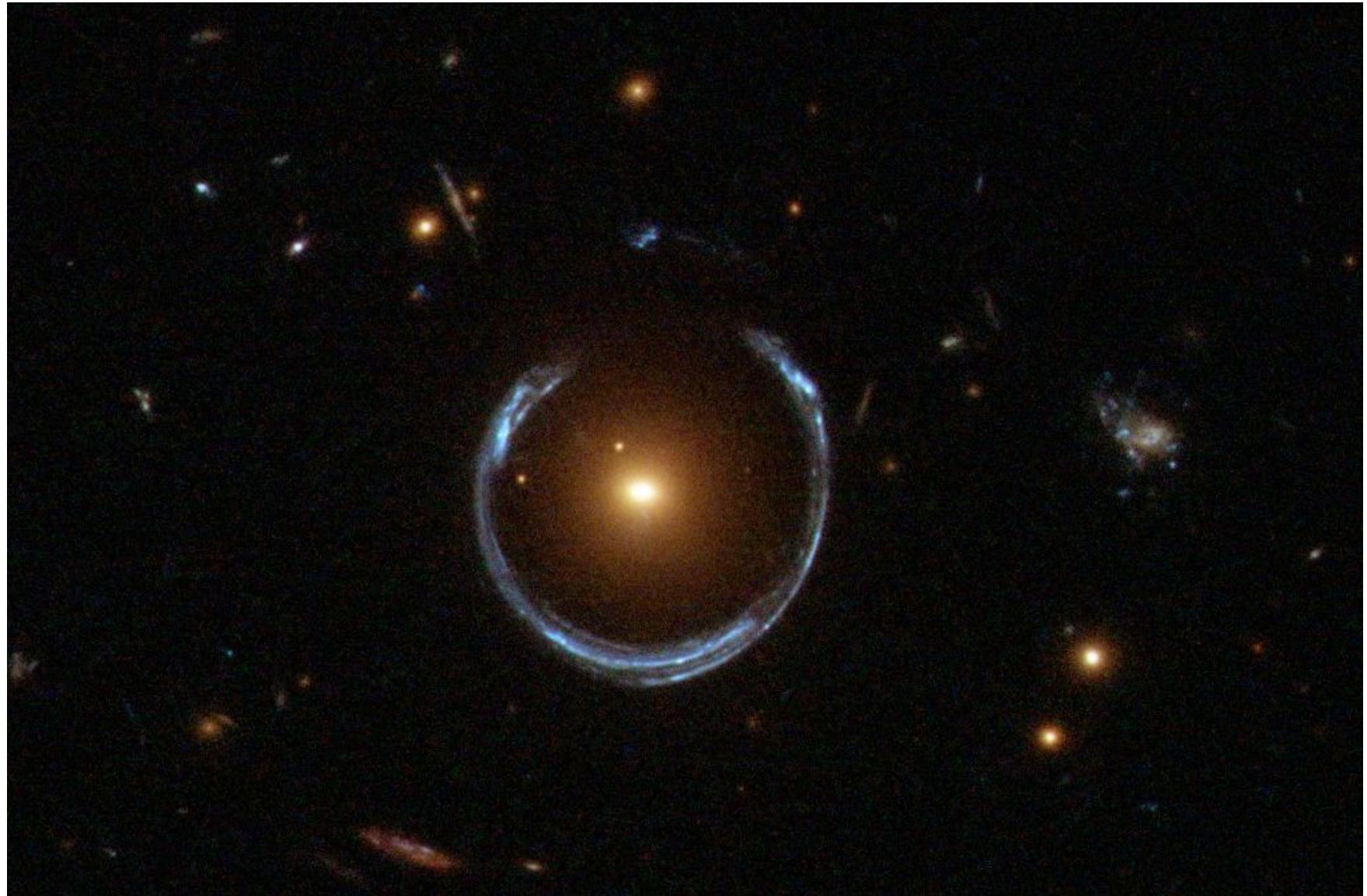
Crucos de Einstein



Cruz de Einstein



Anillo de Einstein



Corrimiento al rojo

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

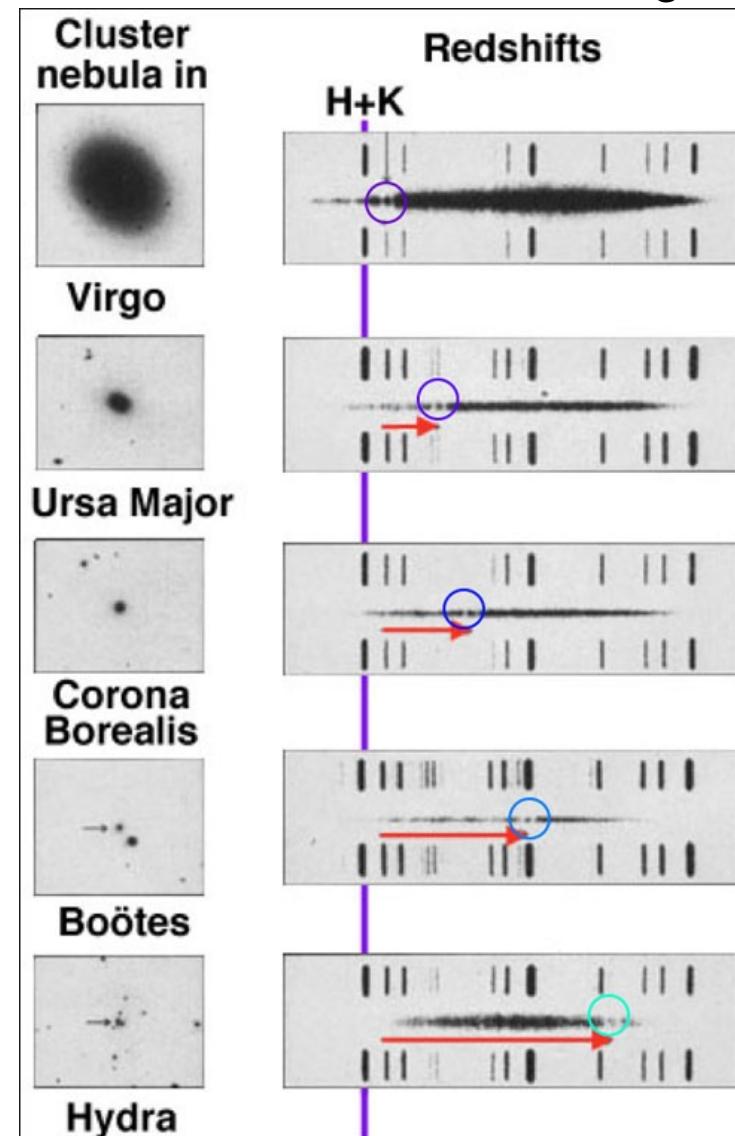
$$\frac{\lambda_o}{\lambda_e} = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} > 1 \rightarrow \lambda_o > \lambda_e$$

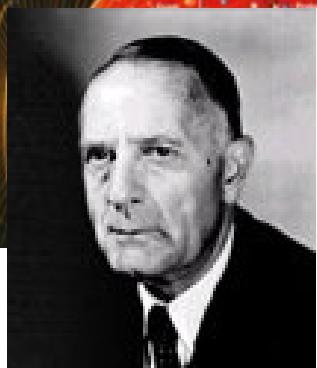
$$\text{Def. } z \equiv \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} \Rightarrow 1+z = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

z es el corrimiento al rojo.

Se puede probar que si $v \ll c$

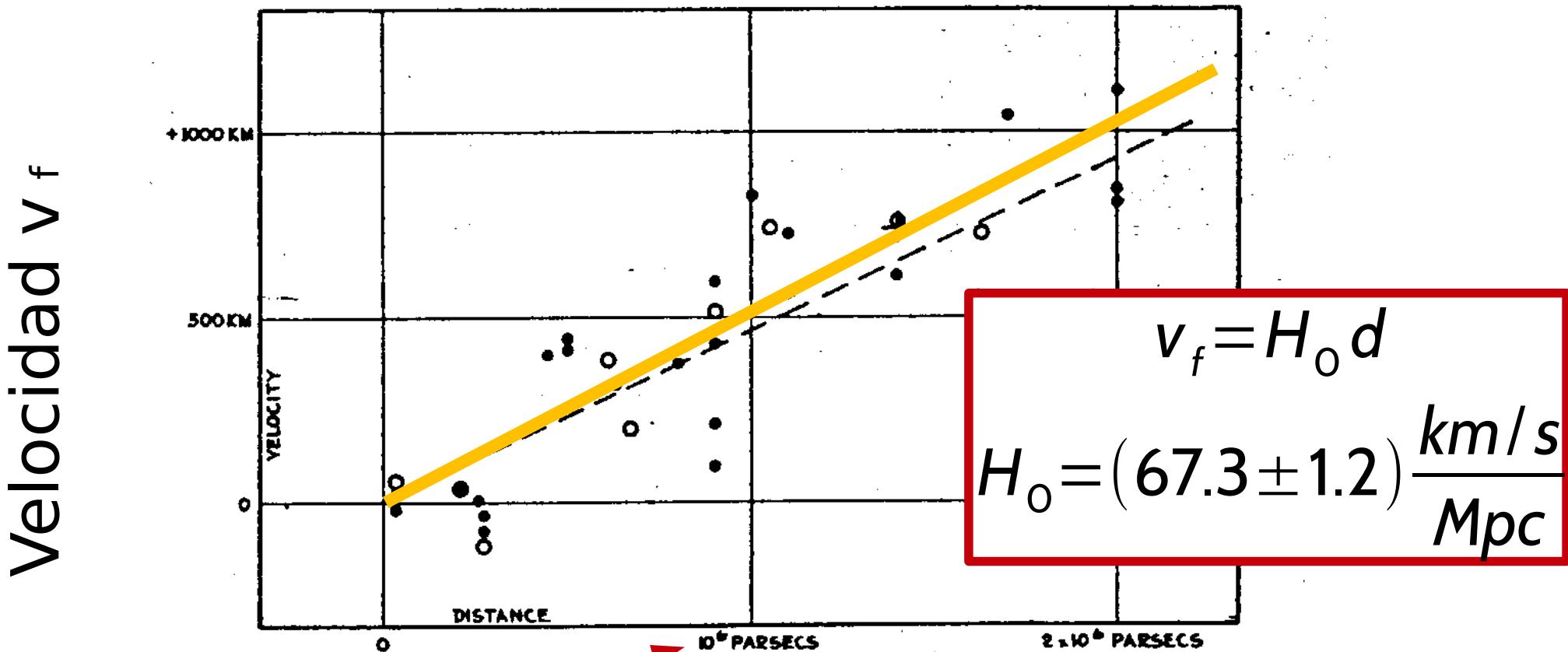
$$z \approx \beta$$





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



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



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



El principio cosmológico

- El principio cosmológico:

En escalas suficientemente grandes (cientos de Mpc), el Universo es homogéneo (es igual en todos lados) e isotropo (es igual en todas direcciones).

- La Tierra no ocupa un lugar preferencial en el Universo.
- Implica la Ley de Hubble
- Es comparable o implica la falsedad del **principio antrópico**



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





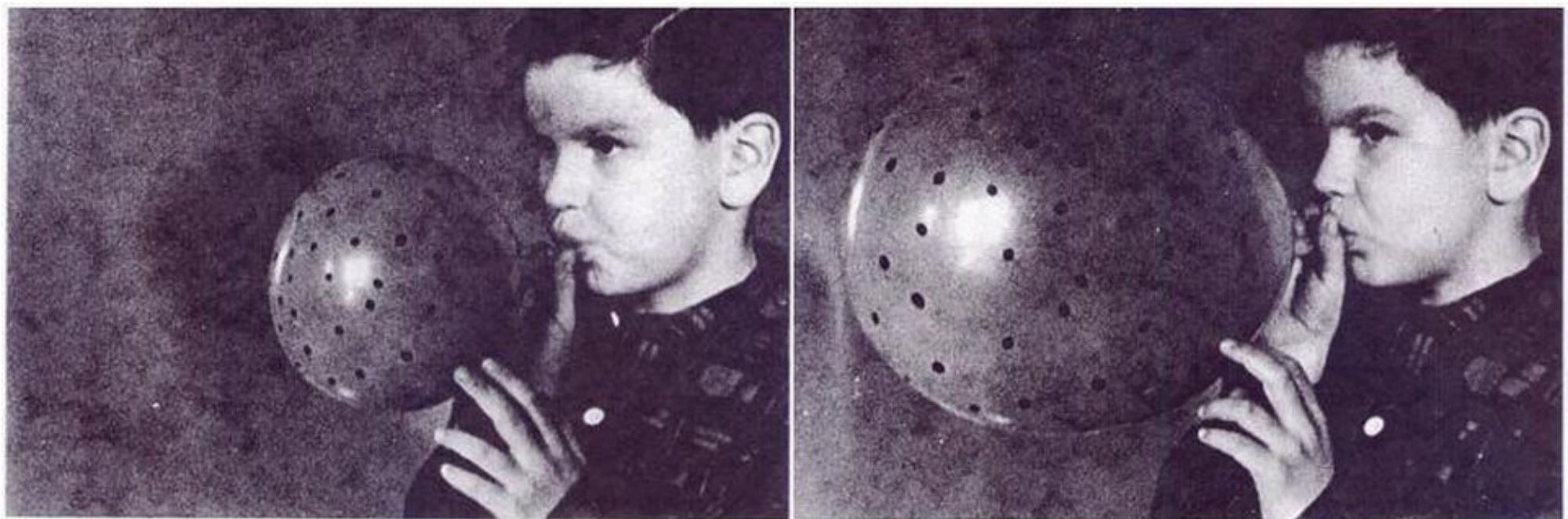
NO ES UNA EXPLOSIÓN



ES UNA EXPANSIÓN



El experimento del globo





El Universo en Expansión

- El universo tiene un inicio,
 - Hace 13.78 Gy
 - A una distancia de ~15Gpc
- Empezo con un volumen ~ 0 , $T \rightarrow \text{infinito}$
- Pasó por una fase inicial de crecimiento exponencial
- Luego continuó con una fase de crecimiento constante
- Hace unos 6Gy la expansión se empezó a acelerar

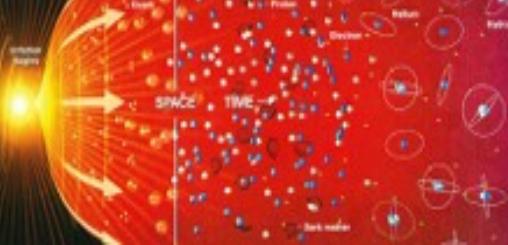


Solución de FRWL (Friedman – Robertson – Walker – Lemaître)

- Es una solución exacta de la ecuación de Einstein
- Describe un Universo isótropo y homogéneo (principio cosmológico)
- Predice la existencia de un “factor de escala”
 - todas las distancias quedan multiplicadas por un factor que depende del tiempo
 - La derivada temporal del factor de escala es positiva
 - → aumenta en el tiempo

¡¡El Universo se está expandiendo!!

El problema de los neutrones...



In the hot, early universe, protons and neutrons were equally numerous since the energy was high enough to exchange them freely back and forth.



Free neutrons begin to decay at a faster rate than they are produced.

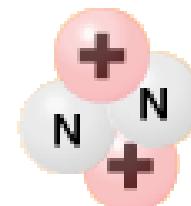
3×10^{10} K 0.9×10^9 K

Present universe
74% hydrogen

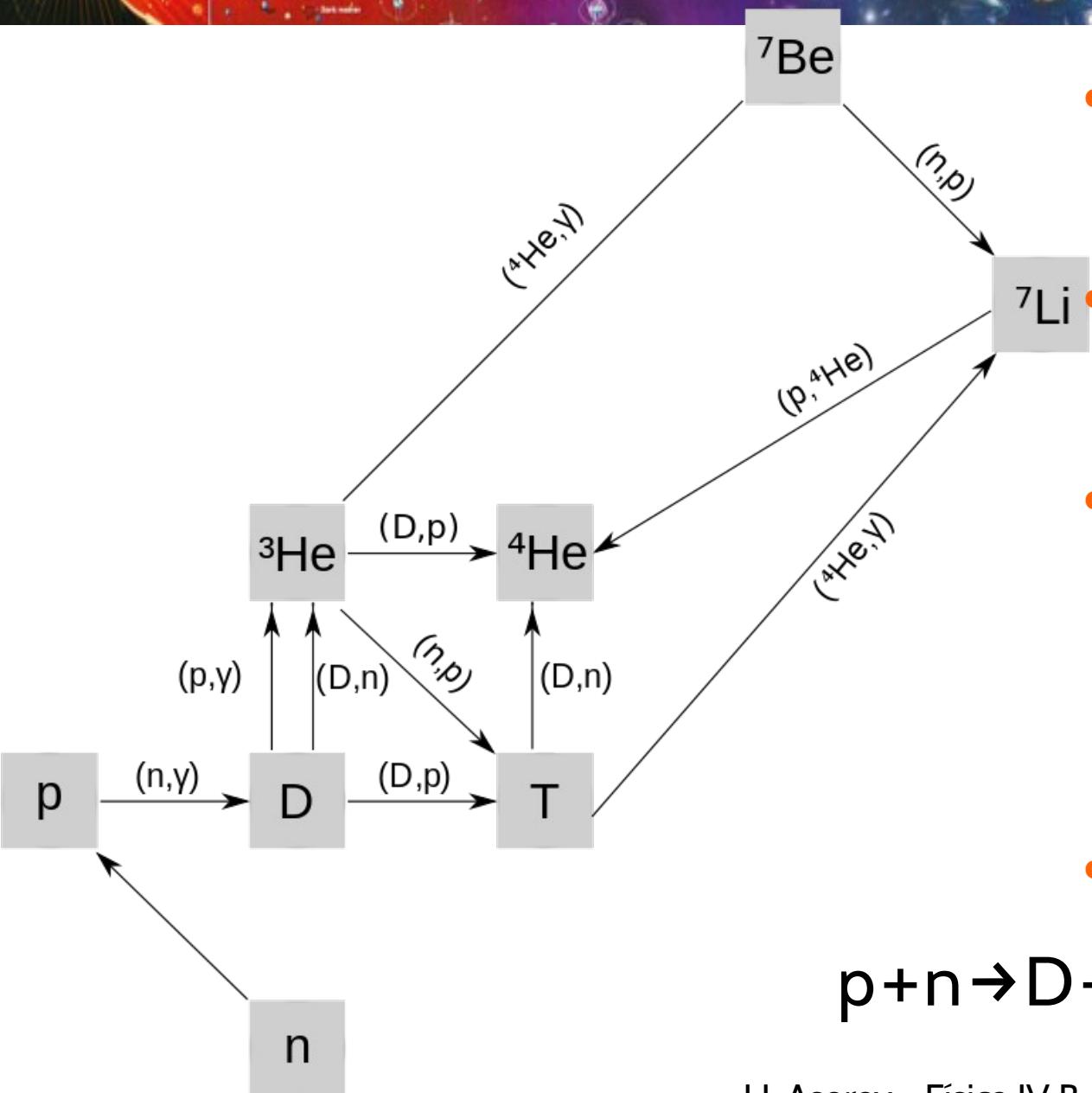
Deuterium becomes stable, so neutrons quickly combine to produce deuterium and then helium, stopping the neutron decay.



26% helium
by mass



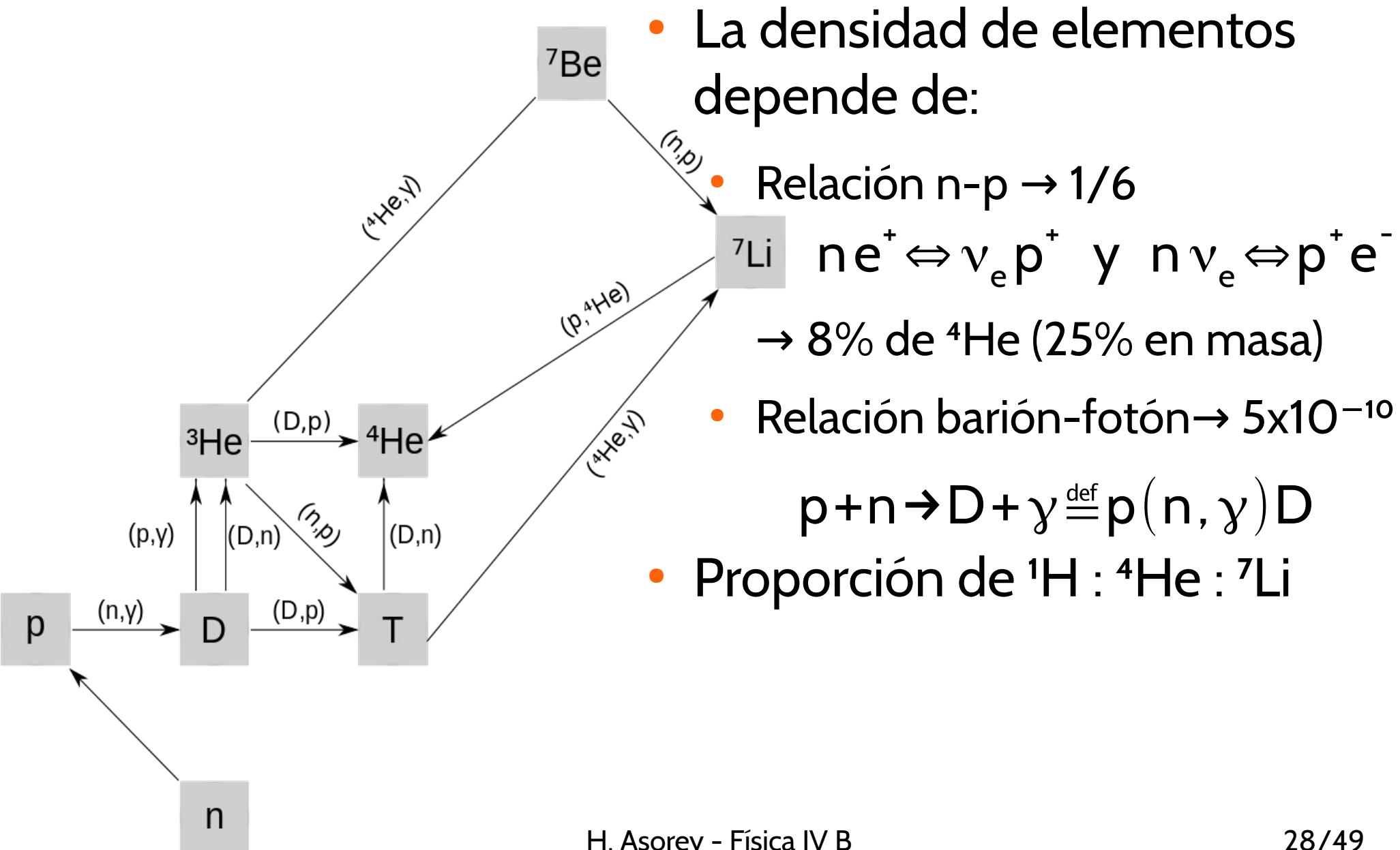
Nucleosíntesis en el big-bang



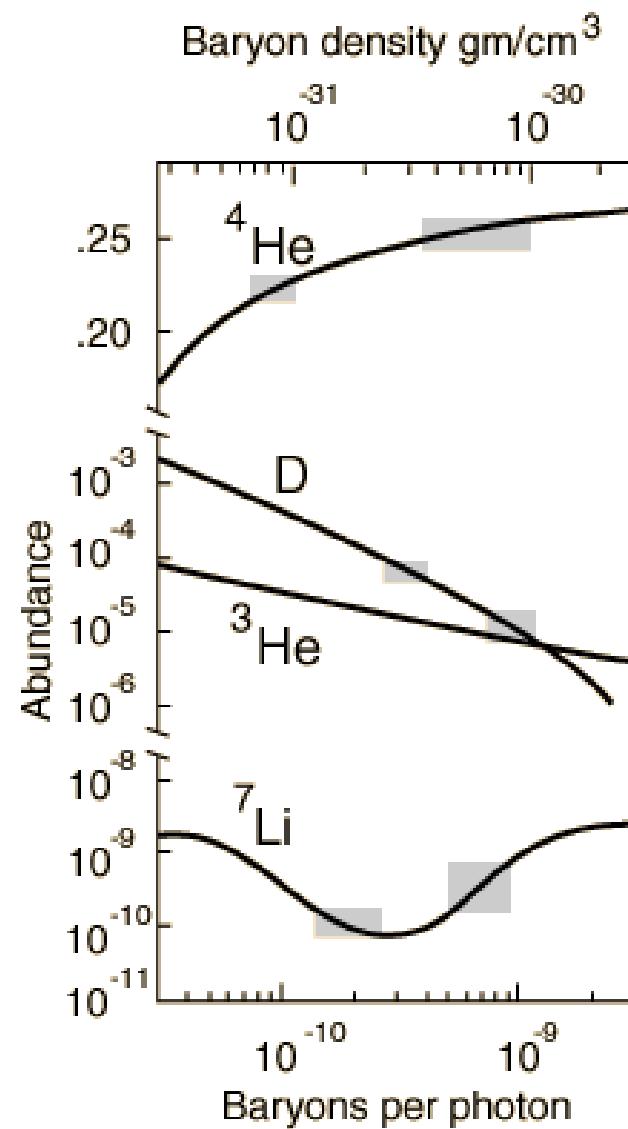
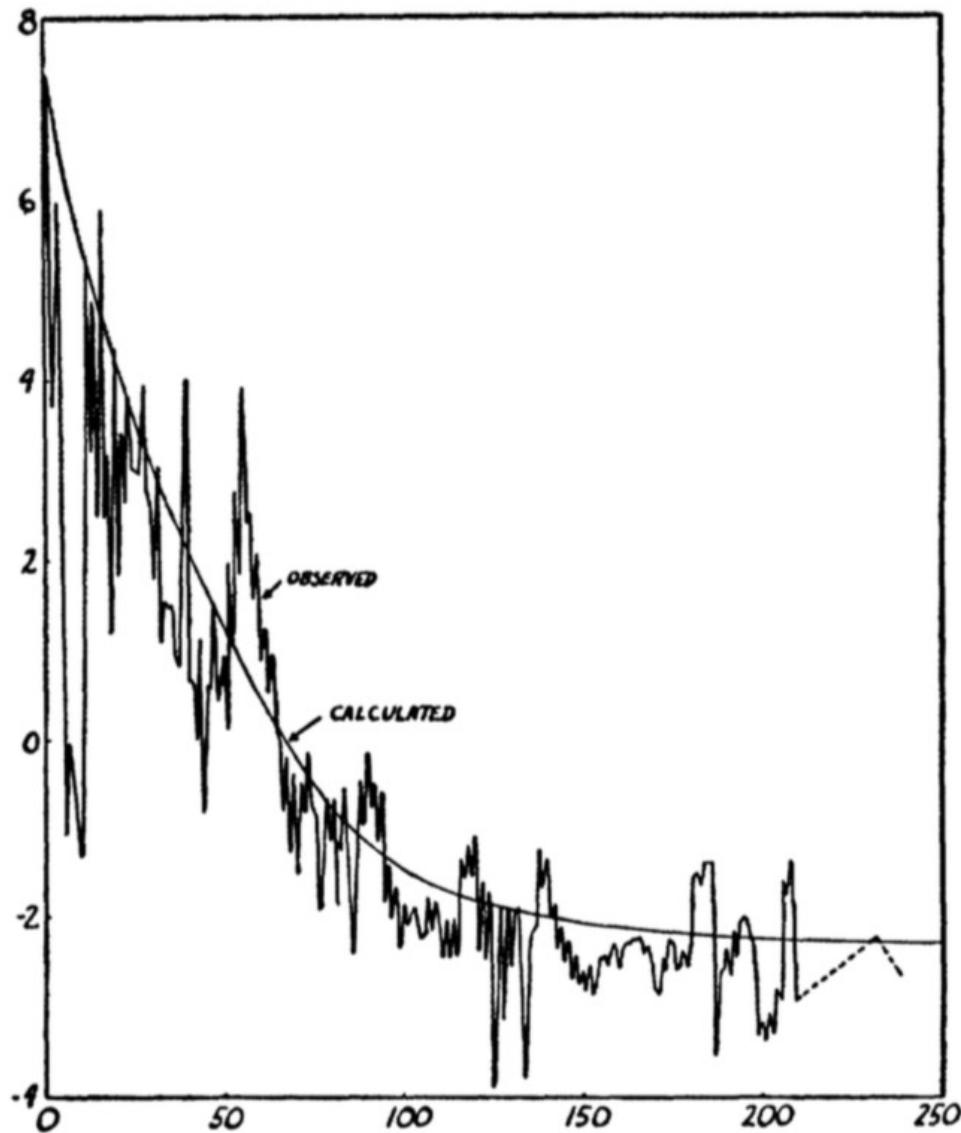
- Formación de átomos simples
- Principal fuente de hidrógeno y helio
- Los átomos pesados se forman en la nucleosíntesis estelar (supernovas)
- Notación:

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

Nucleosíntesis en el big-bang



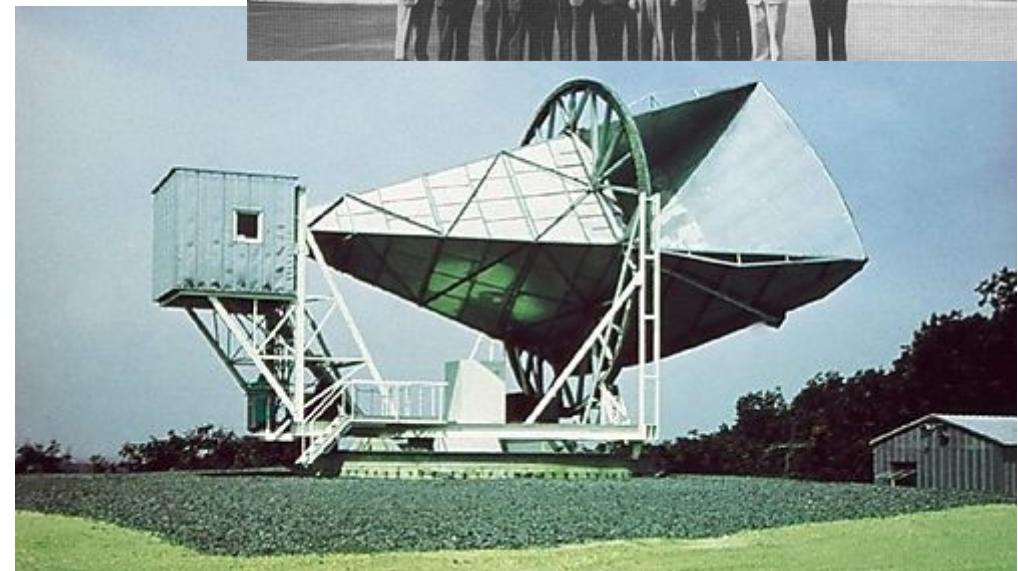
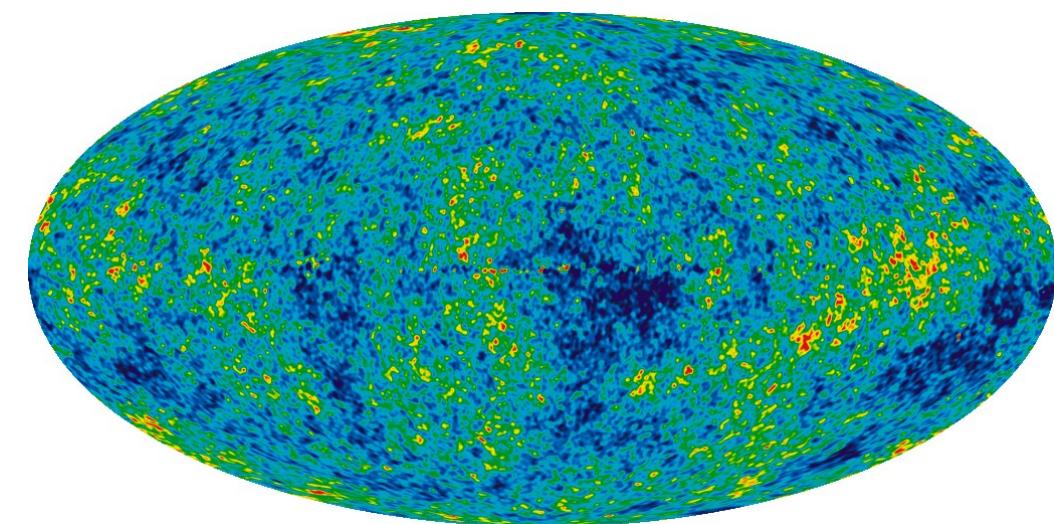
El paper alfabético: Alpher - Bethe - Gamow



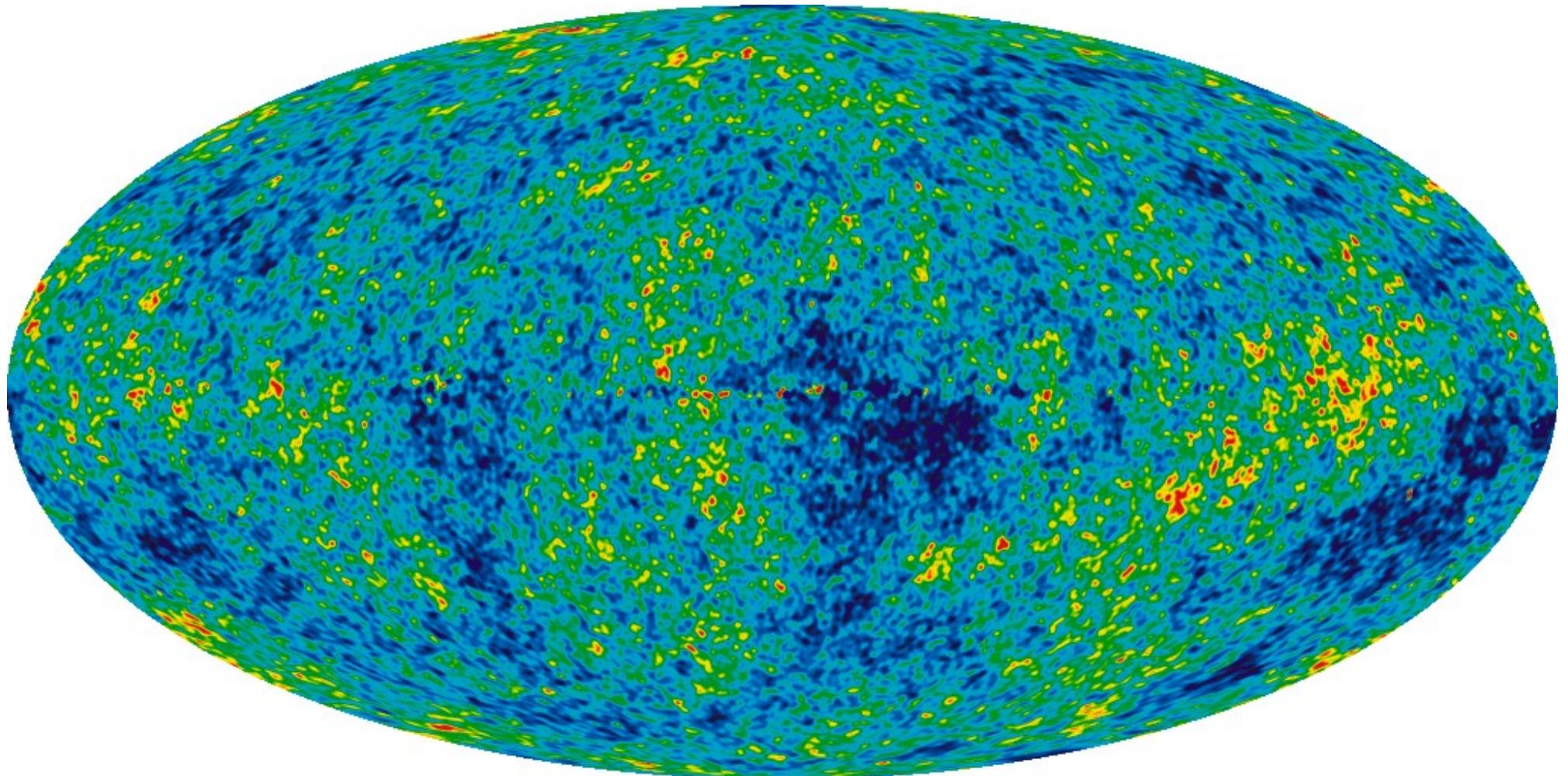


El residuo del big bang

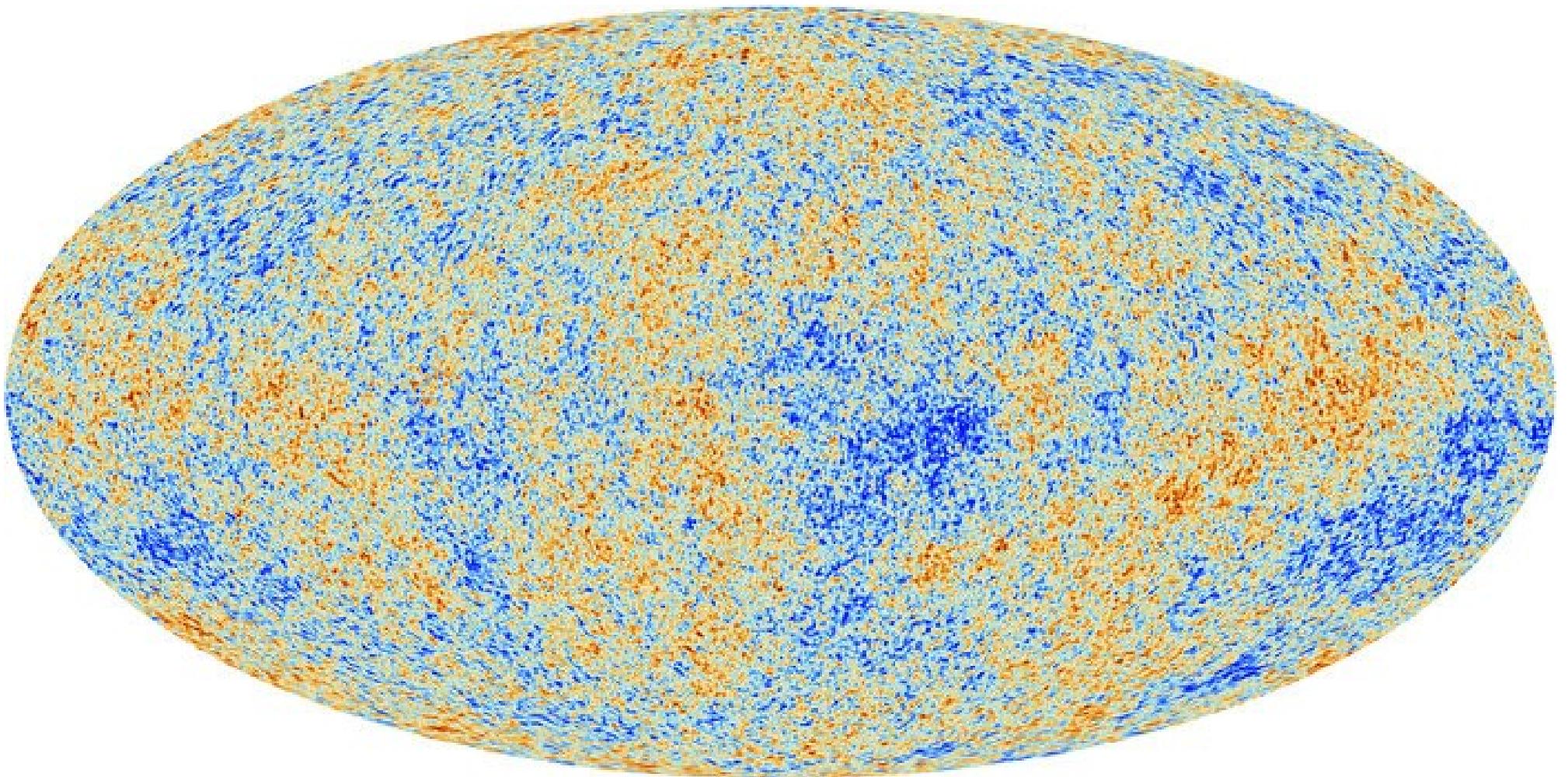
- Alpher & (Bethe) & Gamow → Paper alfabético
- Penzias & Wilson (1965)
- $\lambda=7.35$ cm
- ¿Energía? ¿Temperatura?



Radiación de fondo de microondas

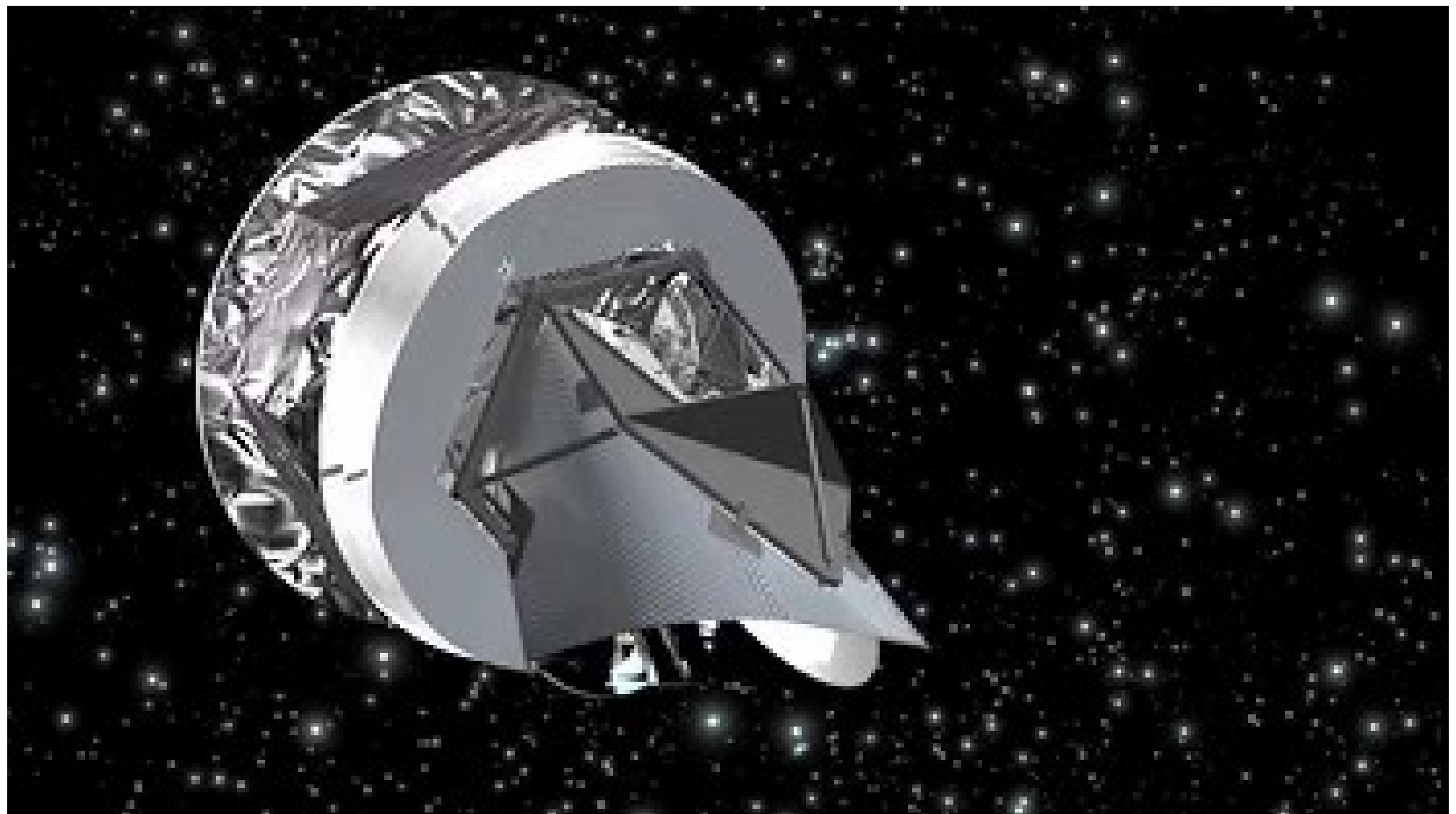


Radiación de fondo de microondas





Así se construye



Radiación de fondo de microondas

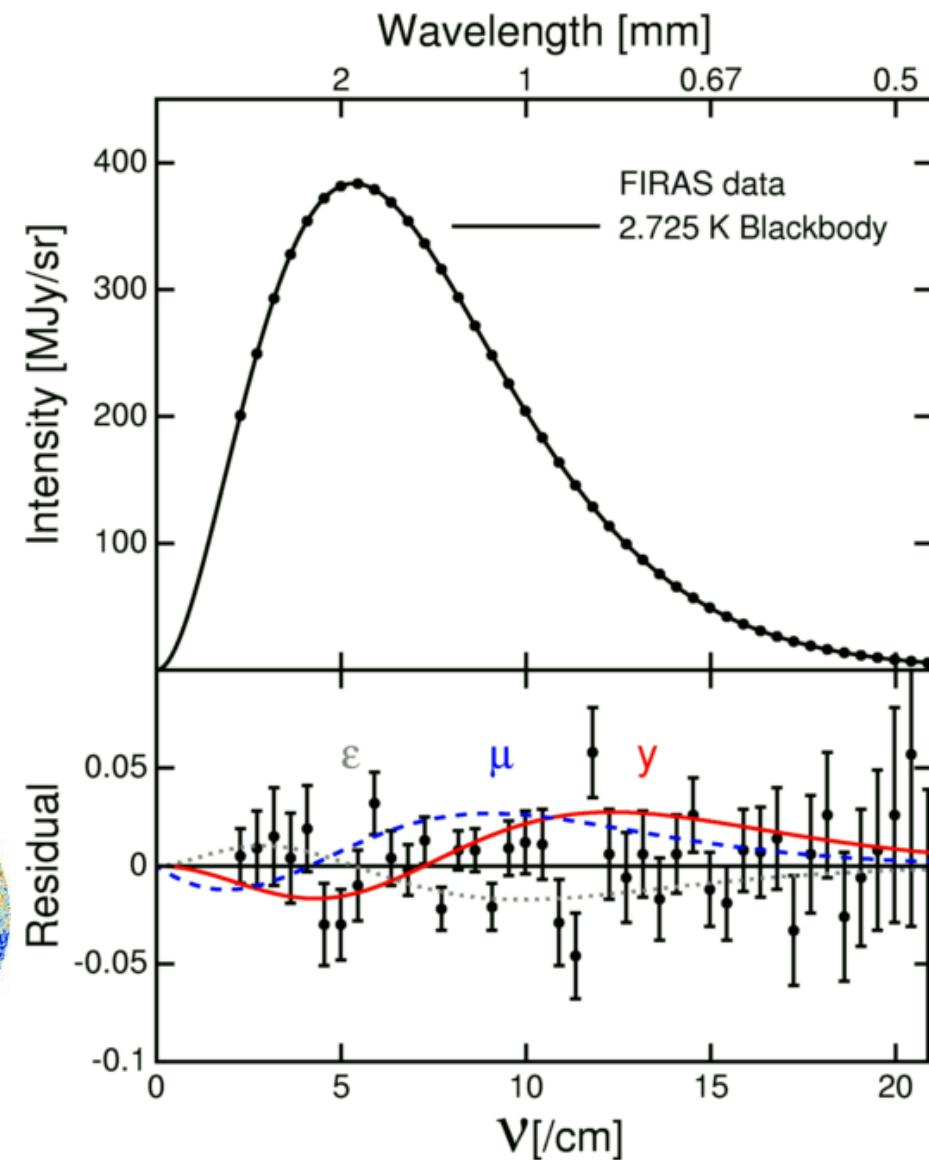
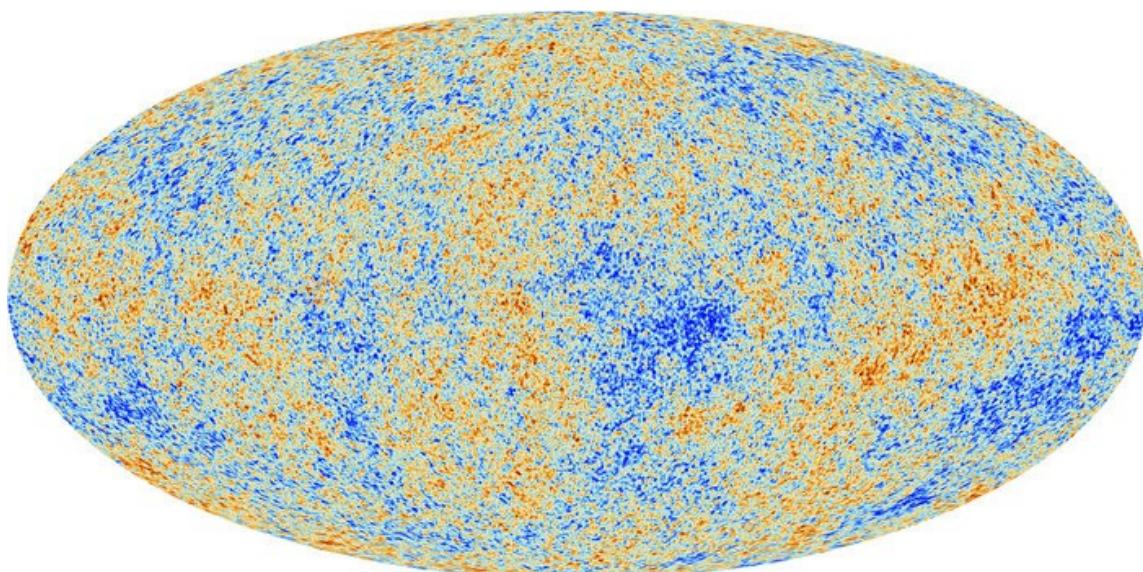
- Radiación de cuerpo negro:

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

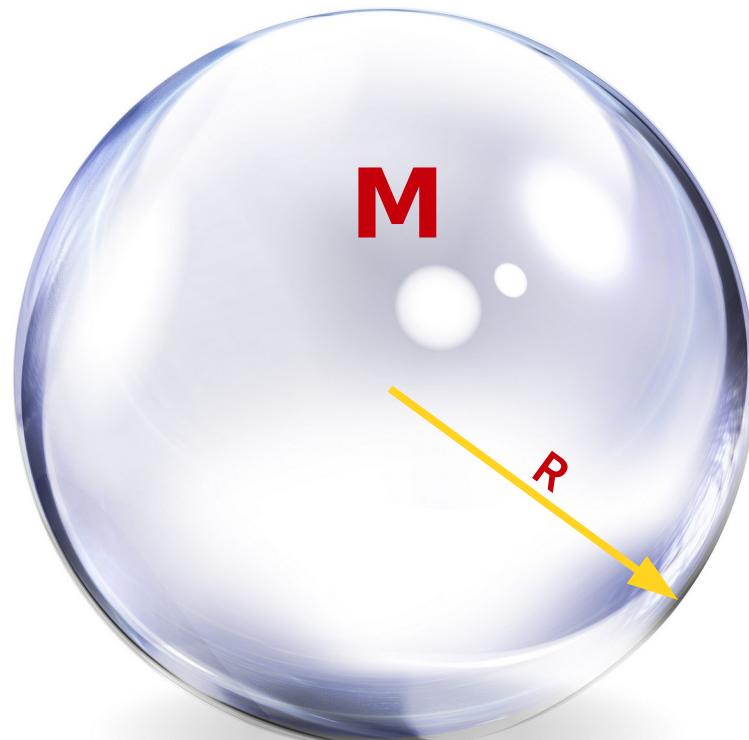
$$n_\gamma = 430 \text{ fotones/cm}^3$$

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

$$\langle \Delta T_{ij} \rangle = 10^{-5} \text{ K}$$



¿La gravedad podrá compensar la expansión?



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

- 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 en d es

$$N = H_0 d$$

Sia 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 ρ y volumen $V \Rightarrow \rho = M/V \Rightarrow$

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

$$\text{Reemplazando } N_E^2 = H_0^2 R^2 \Rightarrow$$

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

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

Densidad
crítica



Midiendo...

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

$$\Omega_i \equiv \frac{\rho_i}{\rho_c}$$
$$\Omega_{\text{tot}} = \sum_i \Omega_i$$

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

$$\Omega = 1.00 \pm 0.01$$

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



¡Entendemos el Universo!





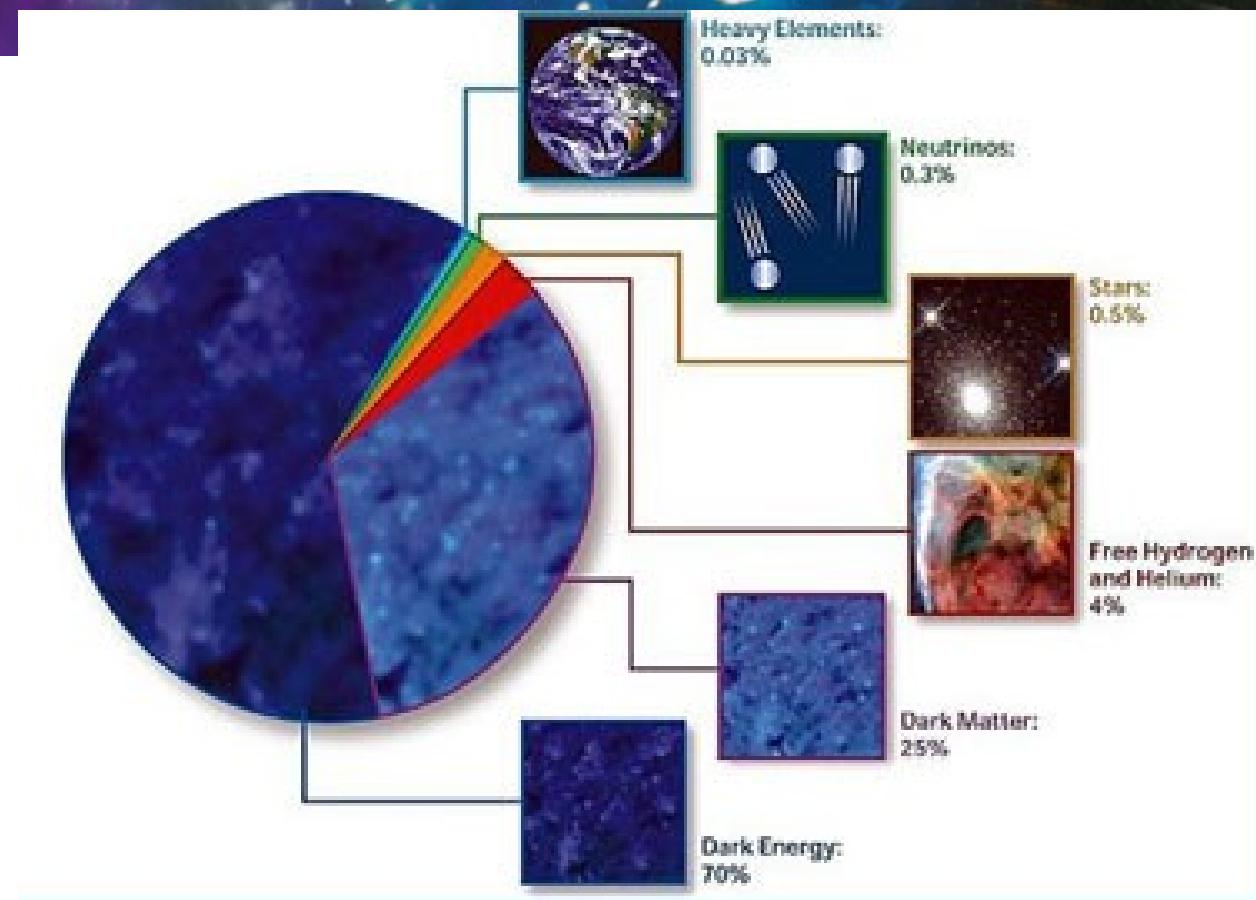
Alto, ¿cómo lo medimos...?

- 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:

- $\Omega_k = 10^{-5}$
- $\Omega_\gamma = 0.002$
- $\Omega_m = 0.0486 \pm 0.001$



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



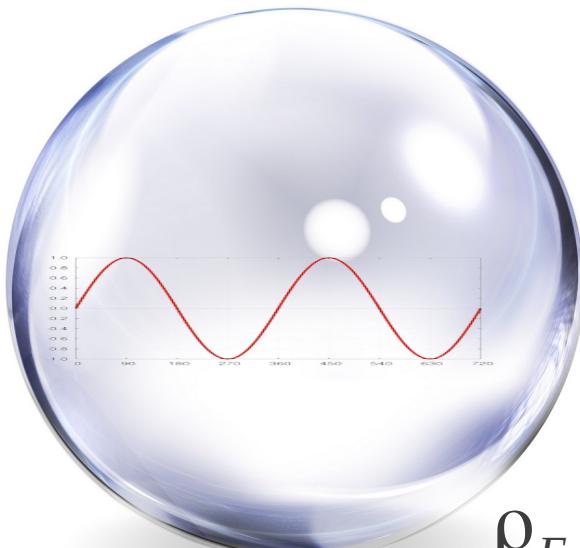


Materia y energía en la expansión

$$E=mc^2$$



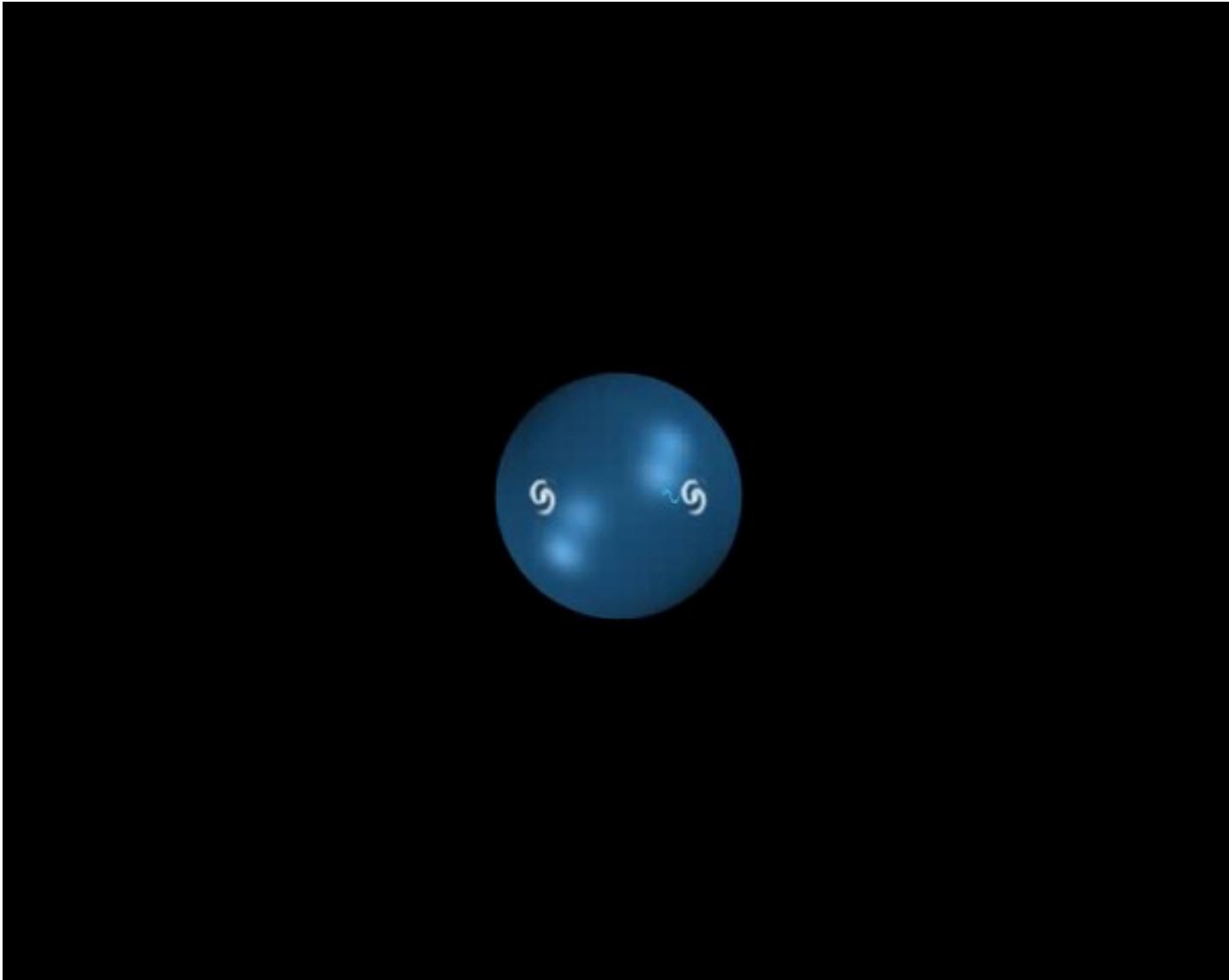
$$E=\frac{hc}{\lambda}$$



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



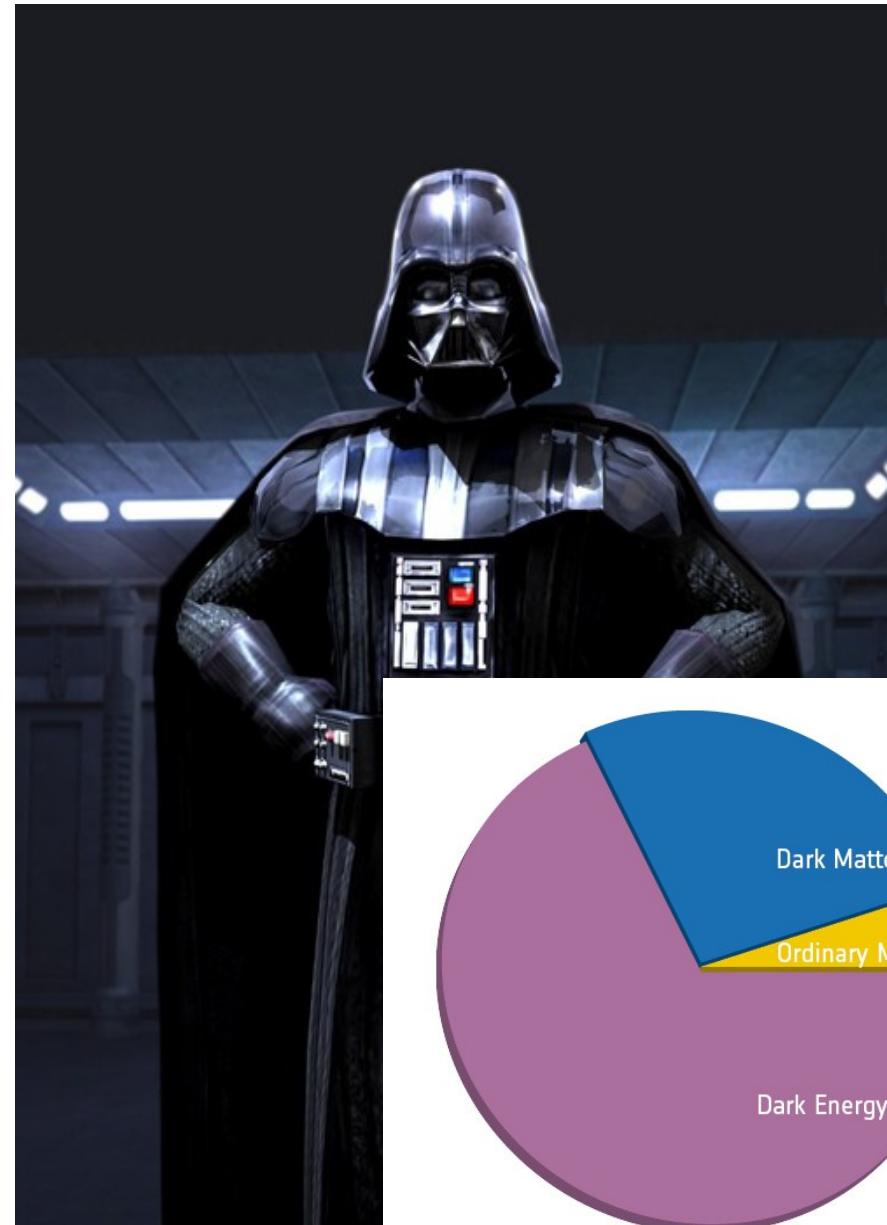
Para los fotones...



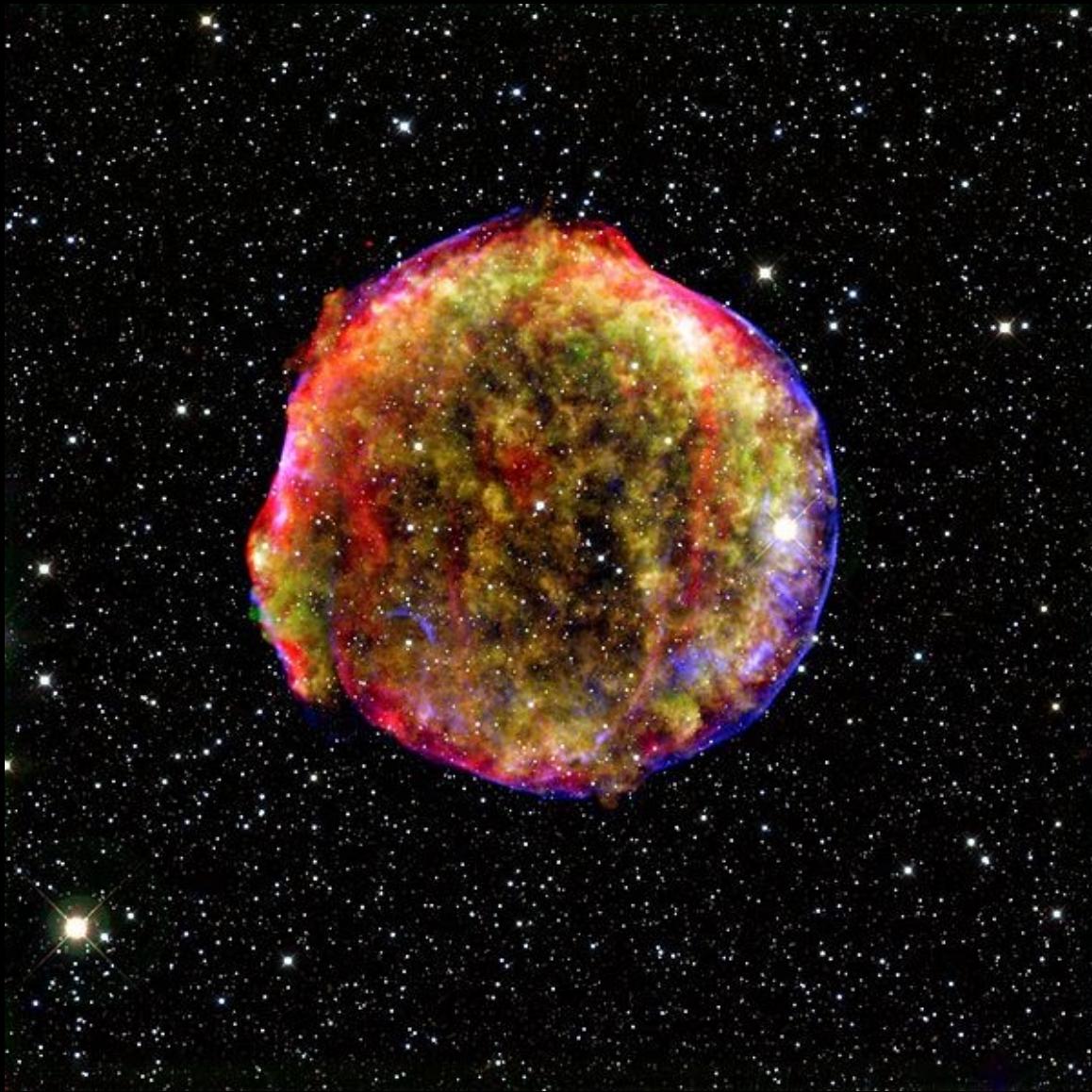
Contenido de materia energía del Universo

- Cómo se compone:

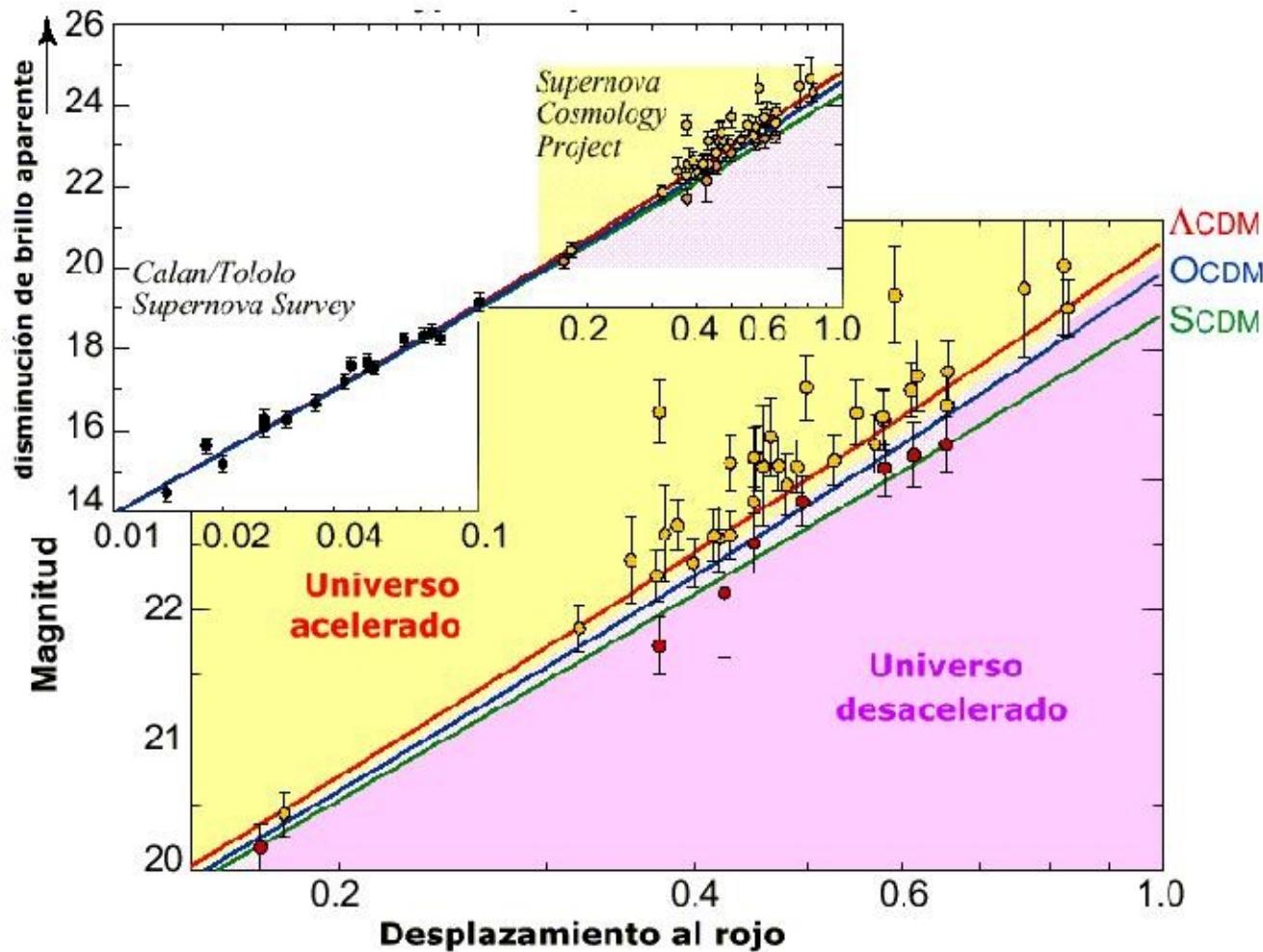
- $\Omega_k = 0.001\%$
- $\Omega_\gamma = 0.2\%$
- $\Omega_m = (4.86 \pm 0.001)\%$
- $\Omega_M = (25.89 \pm 0.0057)\%$
- $\Omega_{\text{mat}} = \Omega_m + \Omega_M = 30.89\%$
- $\Omega_\Lambda = (68.3 \pm 0.0062)\%$



Supernovas Ia

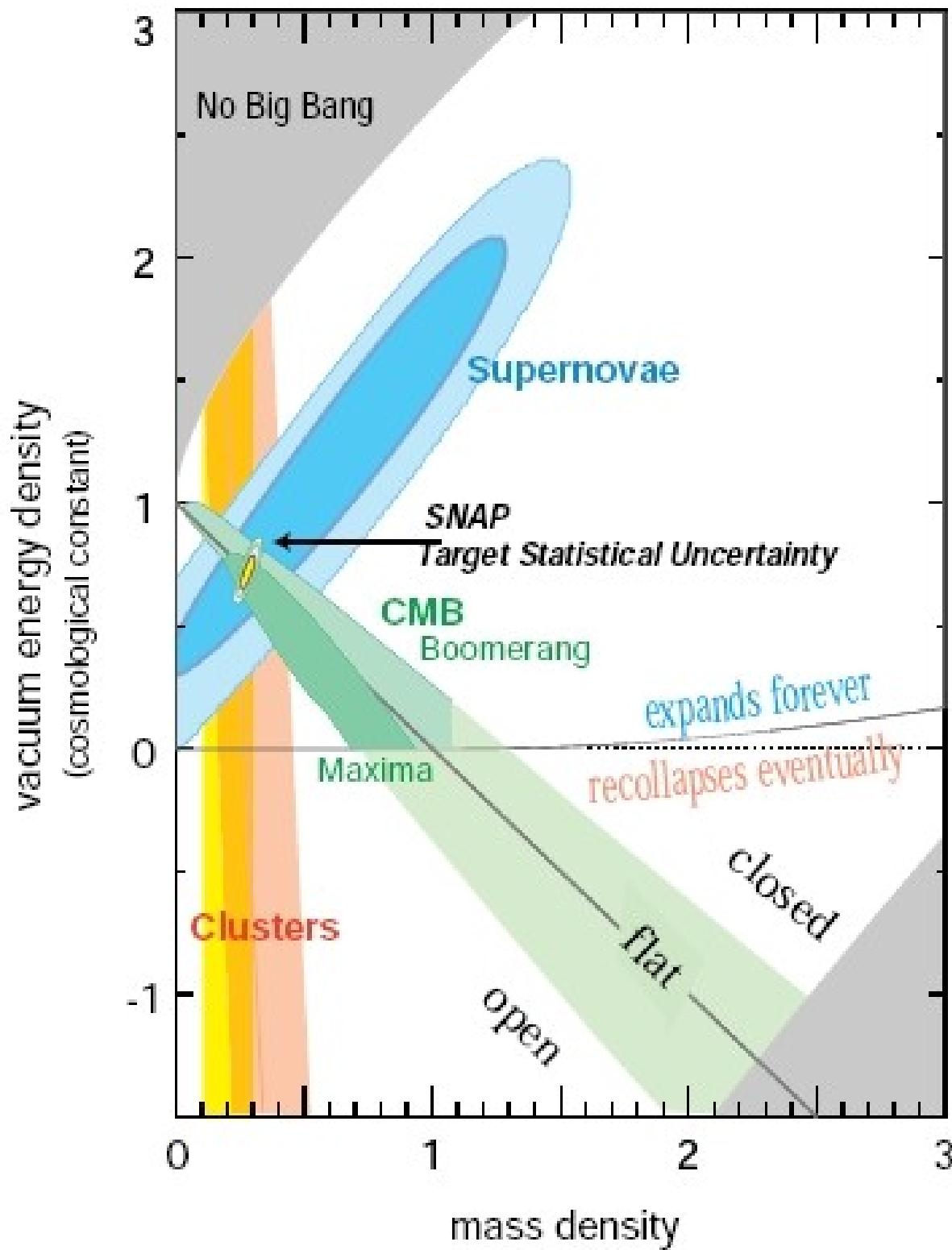


Expansión acelerada

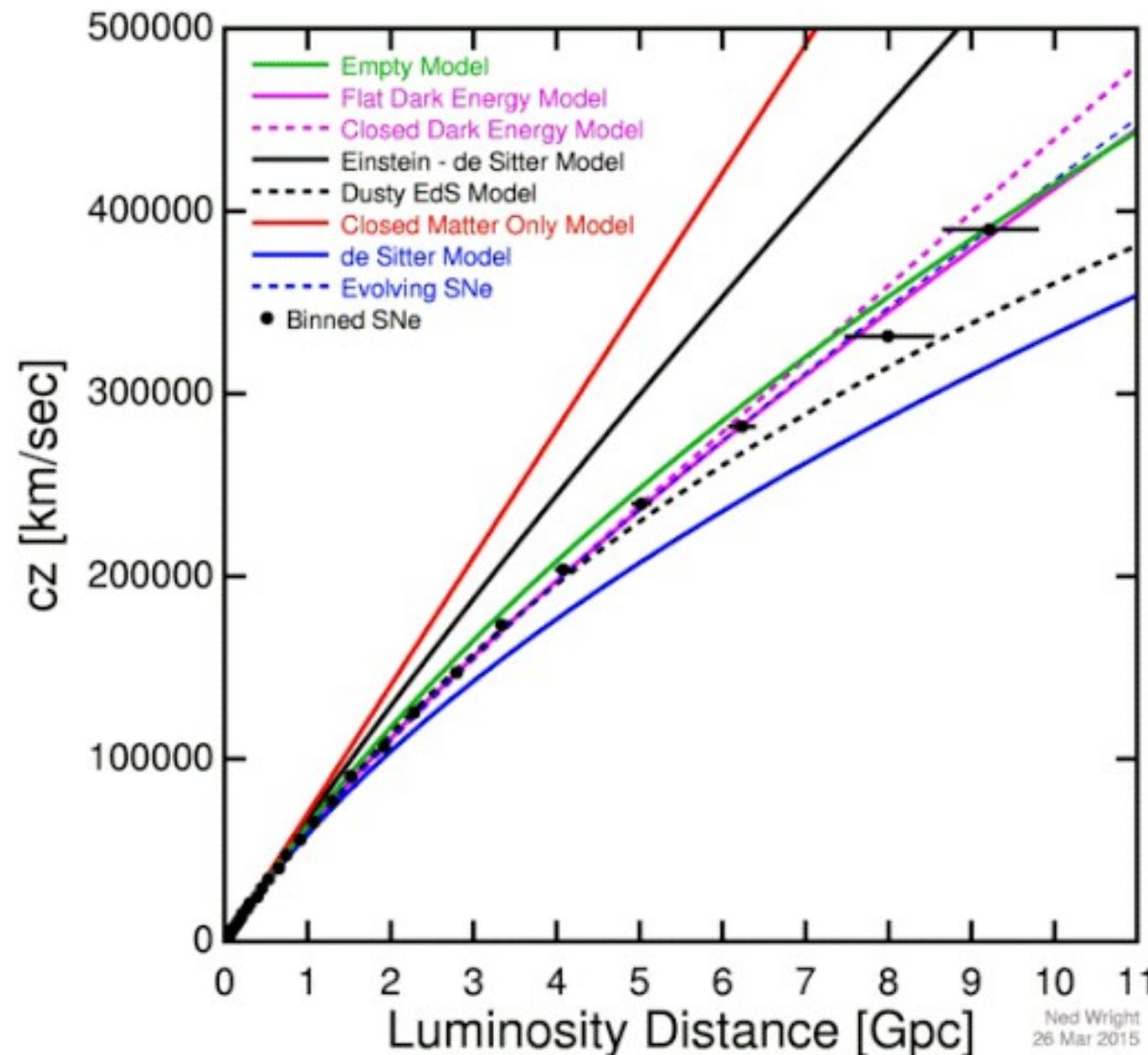




elo cosmológico



El nuevo diagrama de Hubble



Ned Wright
26 Mar 2015

Lo que viene...



→ COSMIC HISTORY

esa

