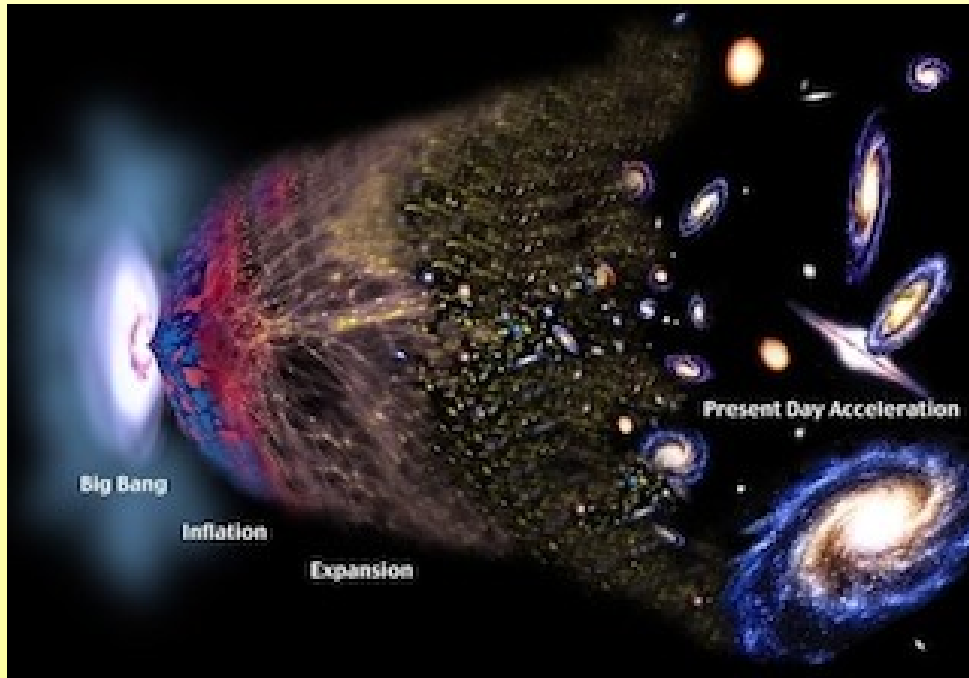


Inflación y los nuevos resultados del experimento Bicep



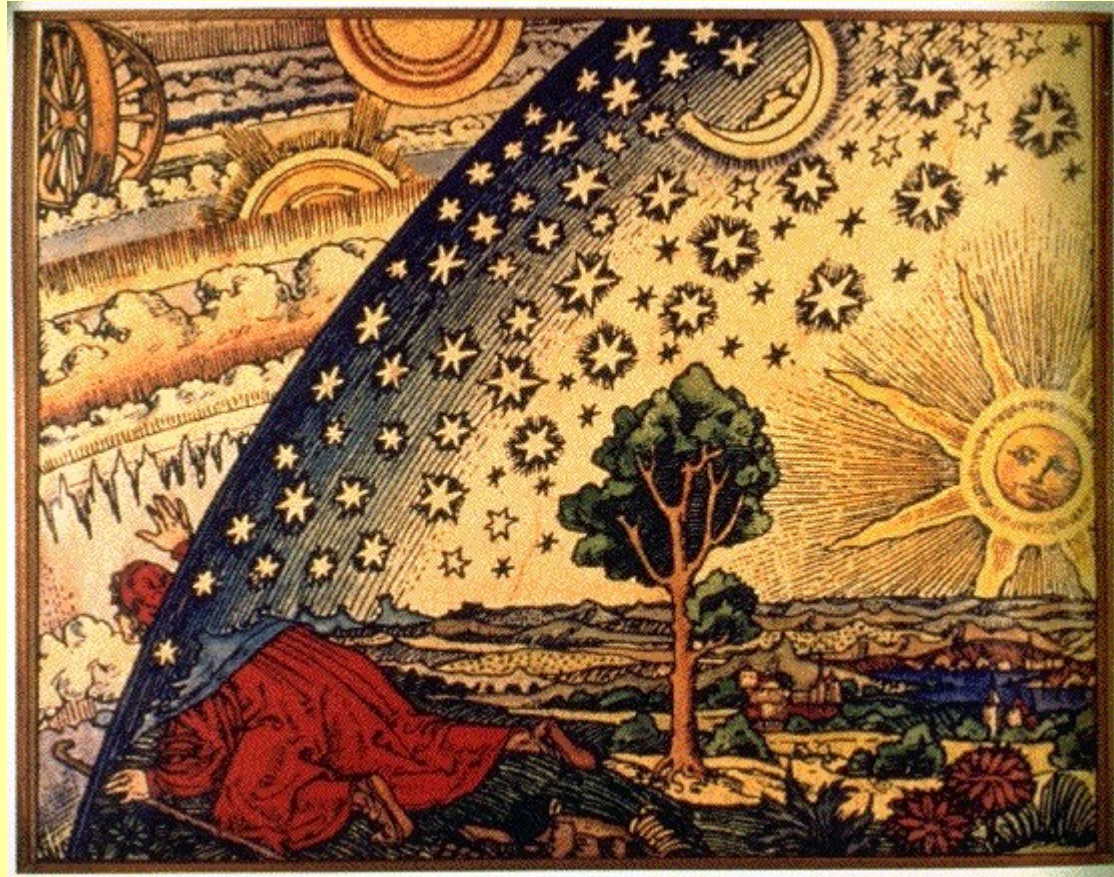
Gustavo Niz

Colima
Junio 2014

Contenido

- ¿Qué sabemos del Universo?
 - Radiación cósmica de fondo
 - Resultados de Bicep
- Inflación Cósmica
 - Implicaciones
 - Problemas
- Conclusiones

¿Qué sabemos del Universo?

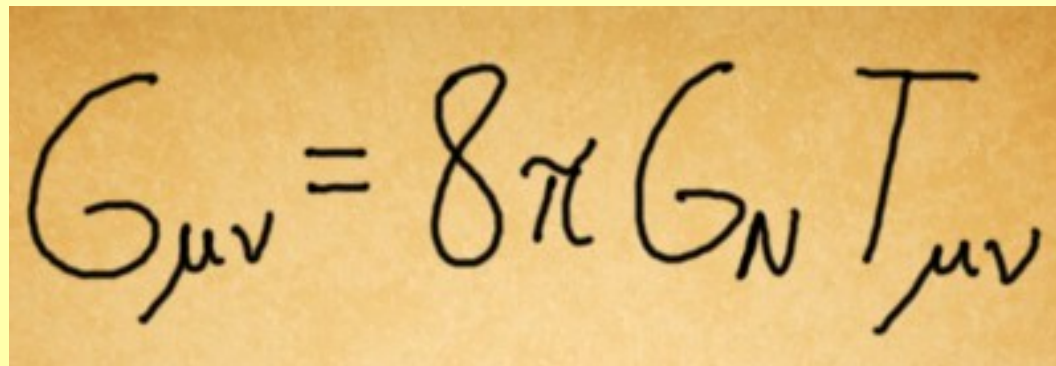


Grabado de Flammarion, 1888

¿Qué sabemos del Universo?

Punto de partida

Einstein (1915)

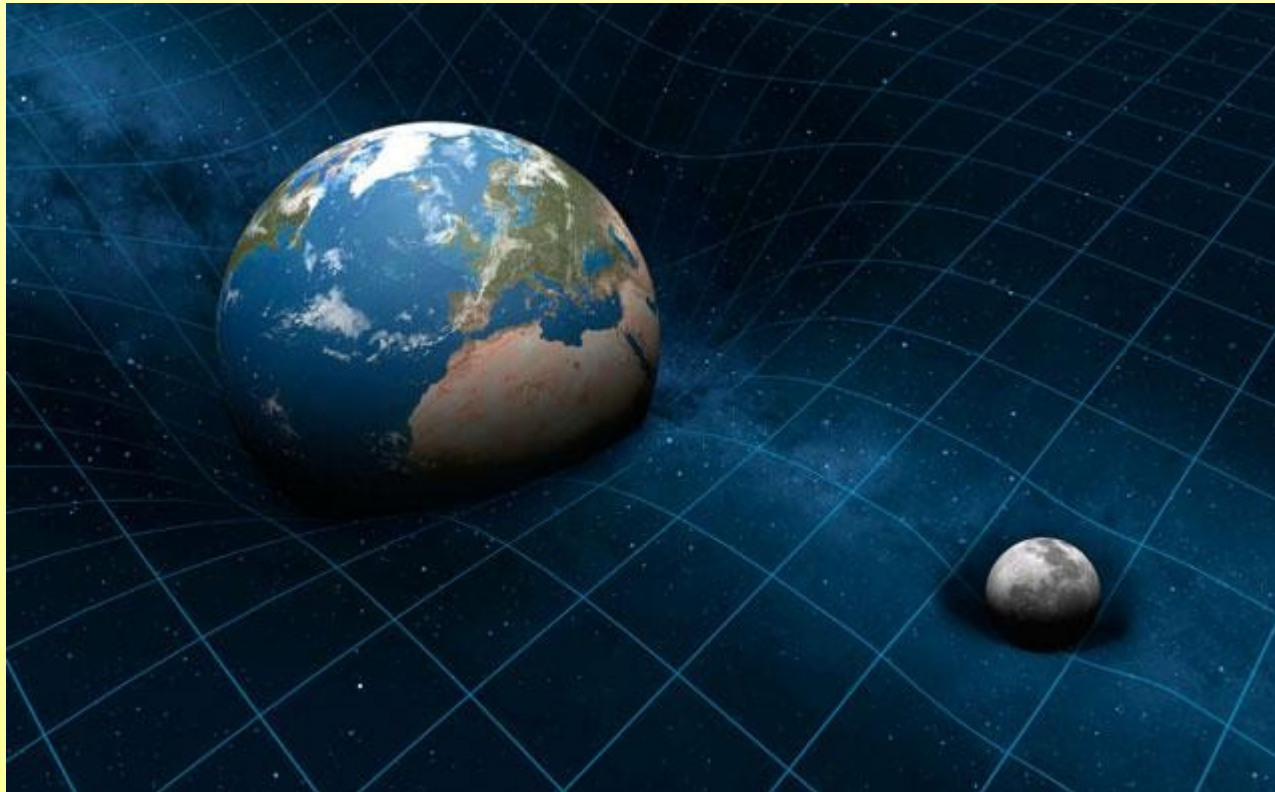

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$

*Geometría del
Espacio-tiempo*

Materia/Energía

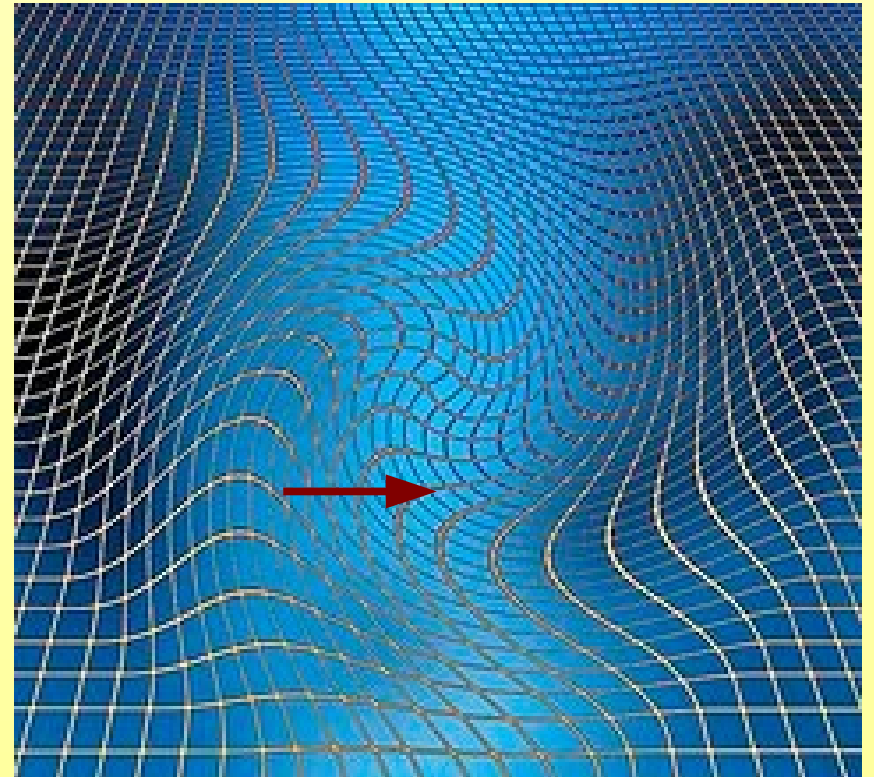
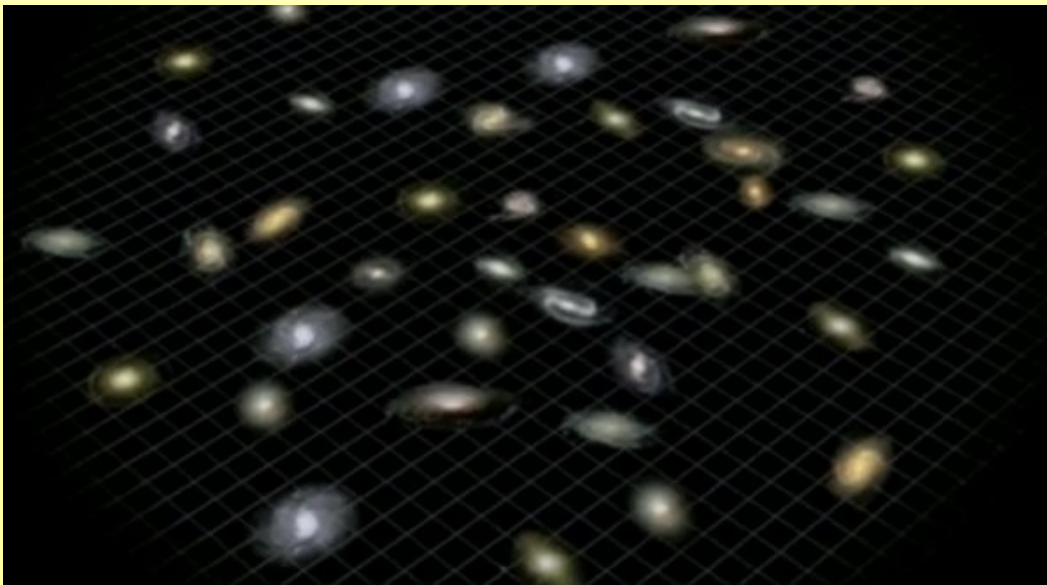
¿Qué sabemos del Universo?

El espacio-tiempo es como una “manta” invisible deformado por la materia o energía

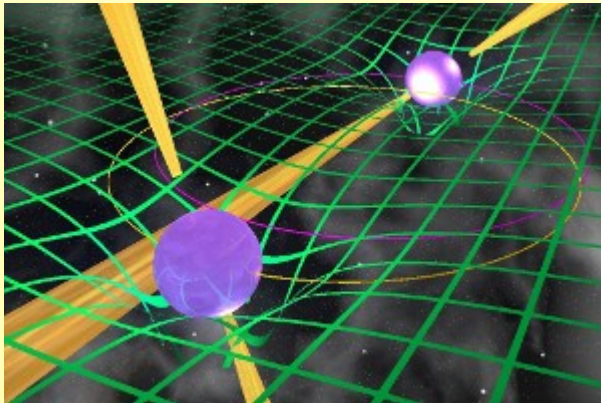


¿Qué sabemos del Universo?

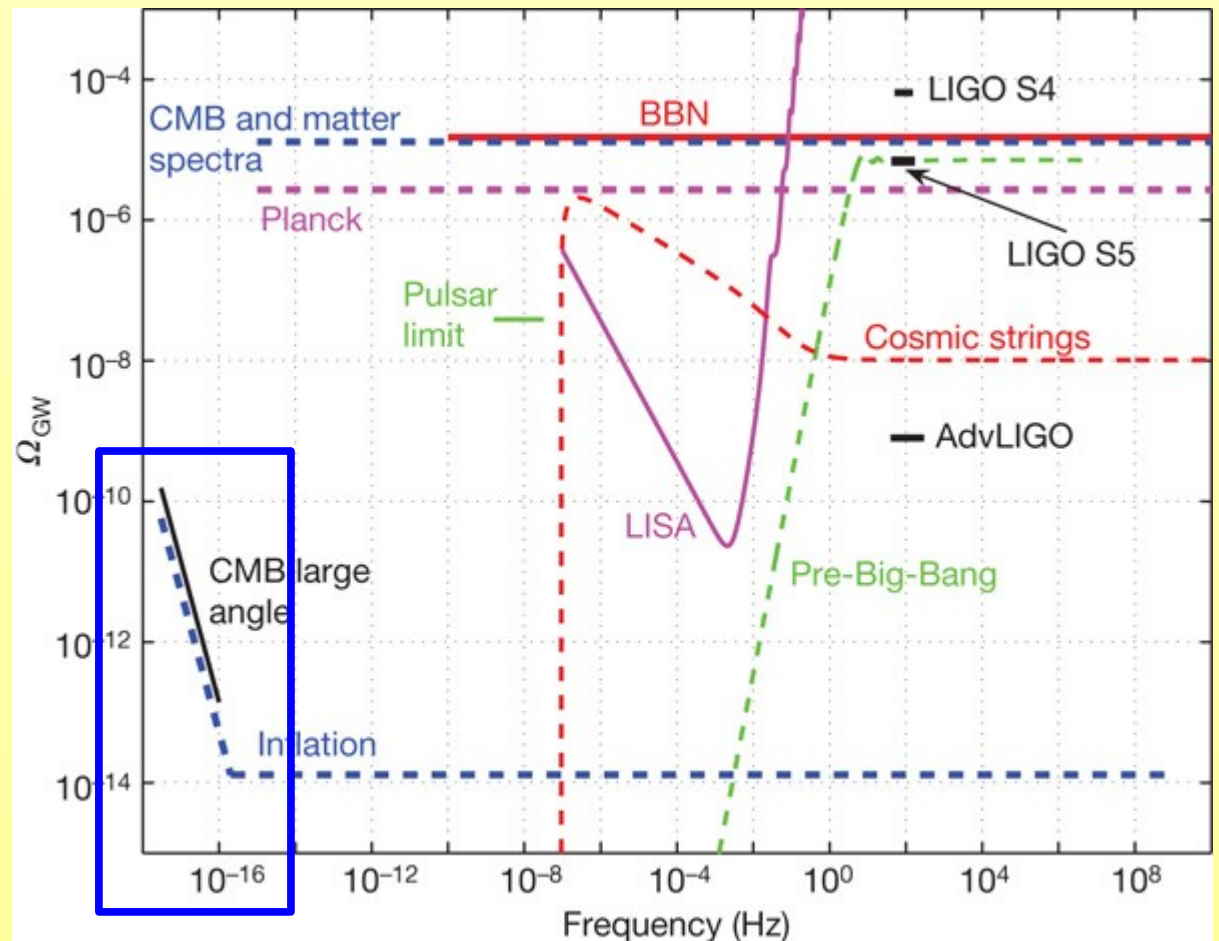
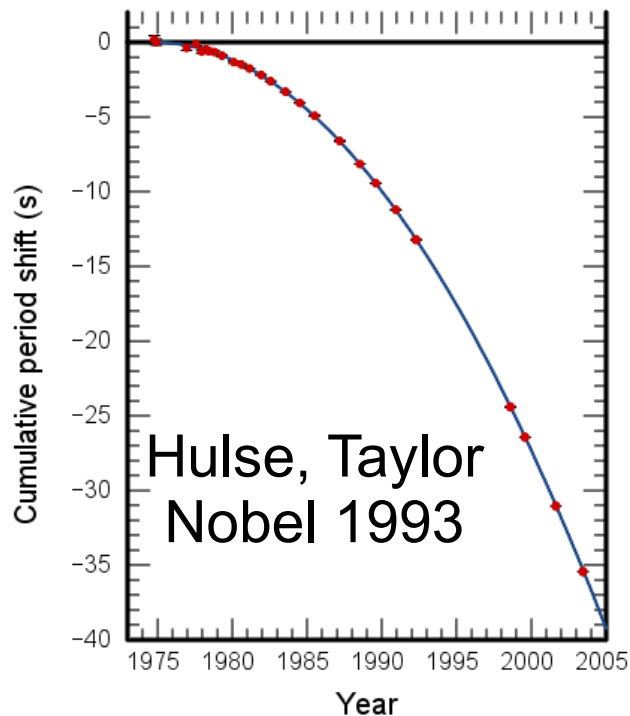
Ondas gravitacionales



¿Qué sabemos del Universo?



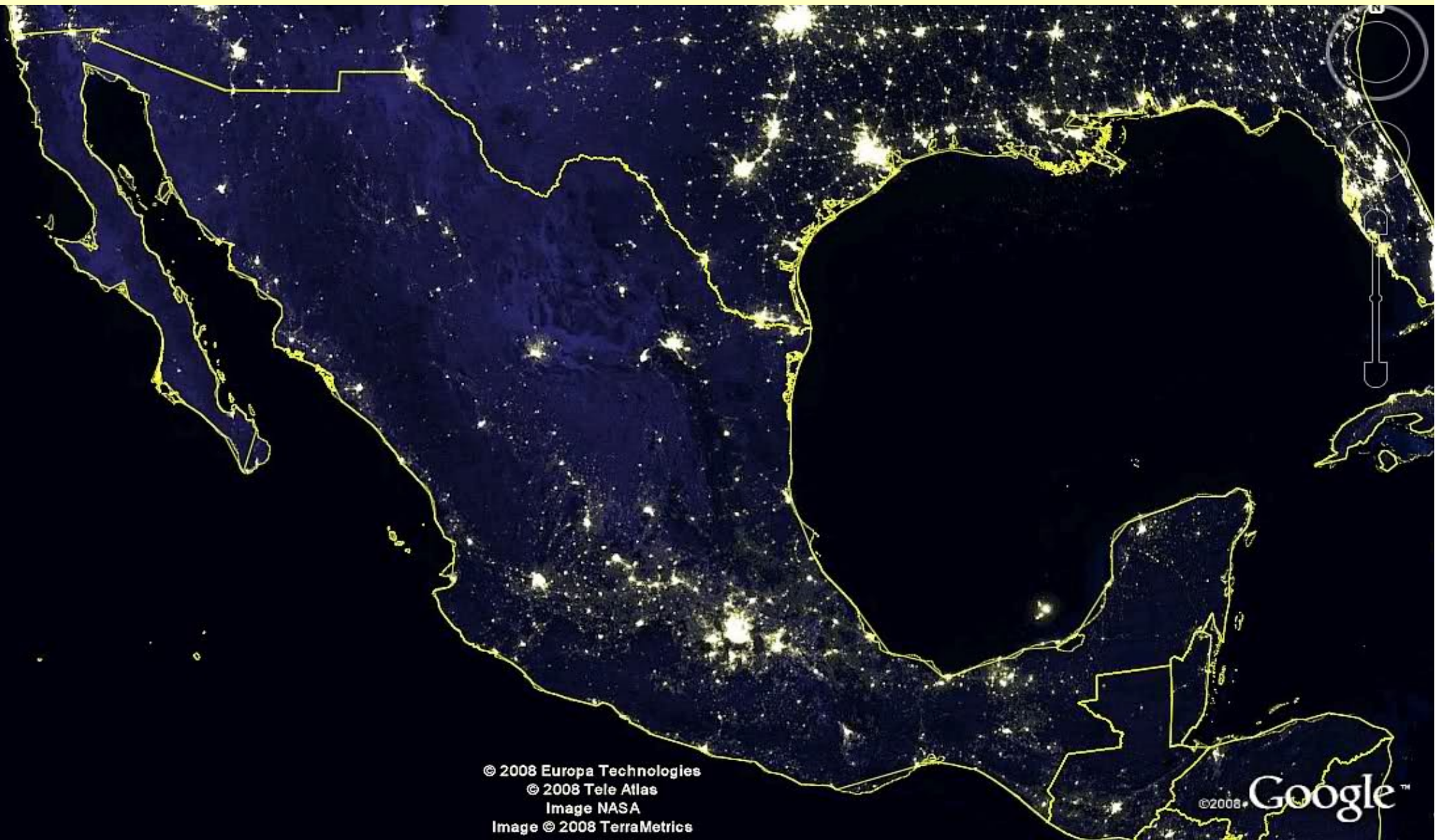
Ondas gravitacionales



¿Qué sabemos del Universo?



¿Qué sabemos del Universo?



© 2008 Europa Technologies
© 2008 Tele Atlas
Image NASA
Image © 2008 TerraMetrics

©2008 Google™

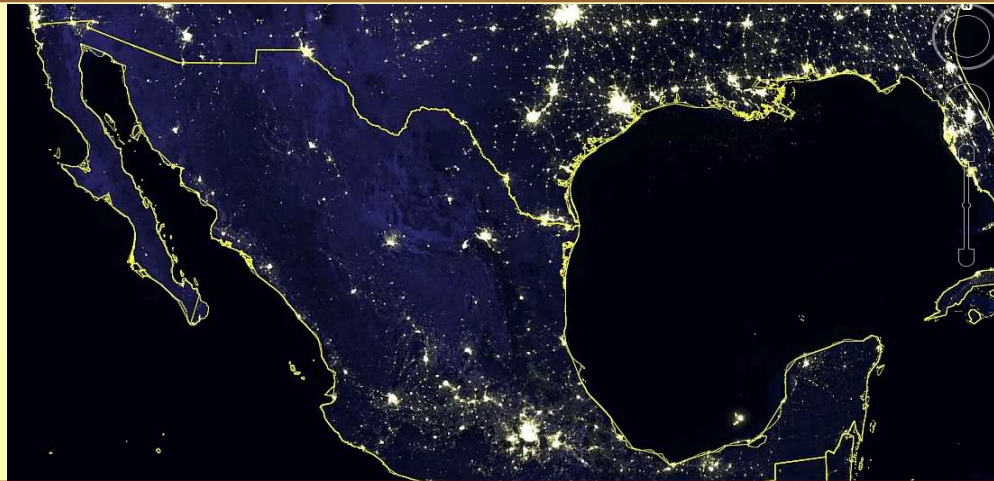
¿Qué sabemos del Universo?



¿Dónde hay más agricultura?

¿en las regiones con luz o sin luz?

¿Qué sabemos del Universo?



Hipótesis
(P. Bayesiana)

¿Qué sabemos del Universo?

Pero....



Cuidado!

¿Qué sabemos del Universo?

Observamos al Universo

- 1) mayoritariamente por la LUZ (fotones) que recibimos o dejamos de recibir
- 2) minoritariamente por: neutrinos, partículas alfa, etc.
- 3) vemos el pasado (velocidad de la luz) y sólo sobre el “cono de luz”



¿Qué sabemos del Universo?

Espectro de luz de Galaxias

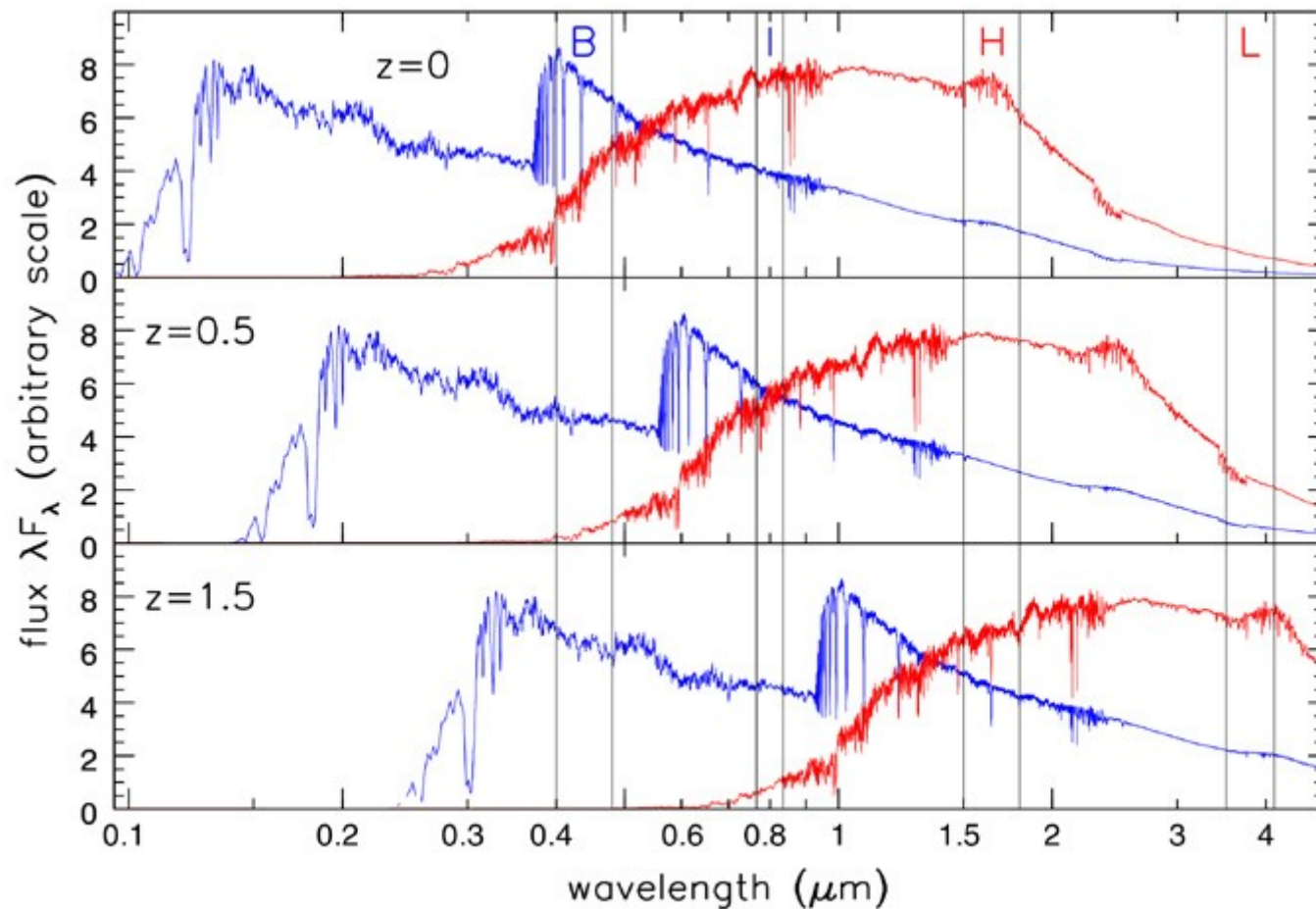
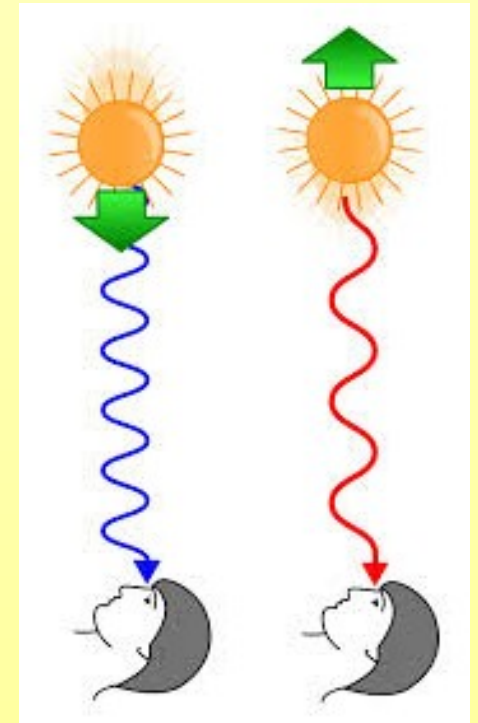
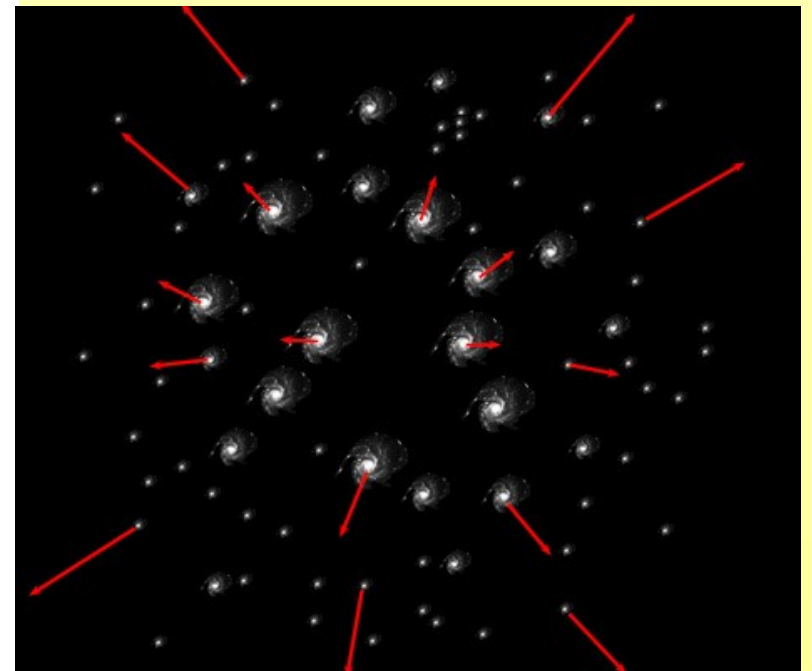
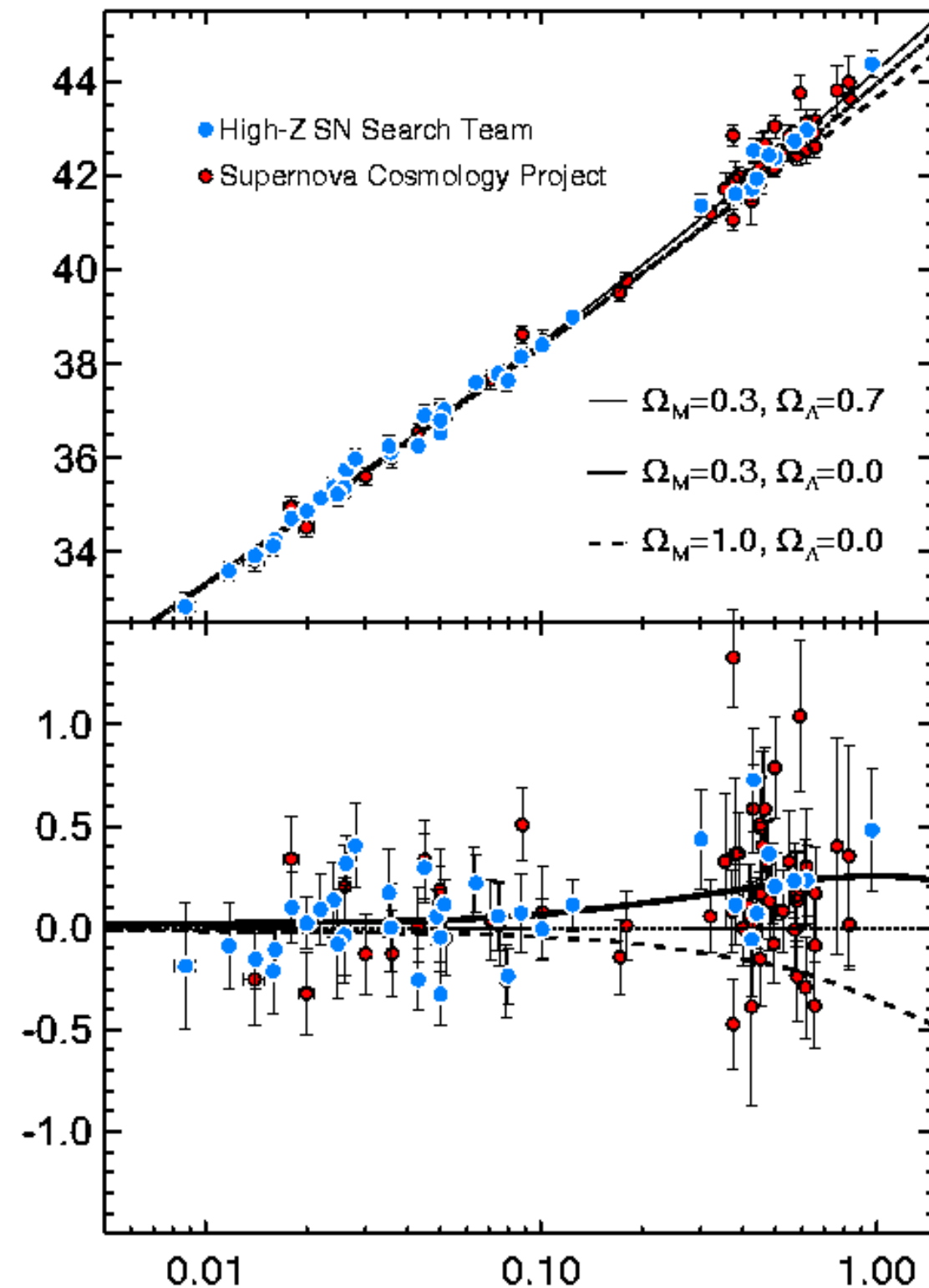


Fig 8.12 (S. Charlot) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Las galaxías se alejan de nosotros (Ley de Hubble)

El Universo se Expande!!



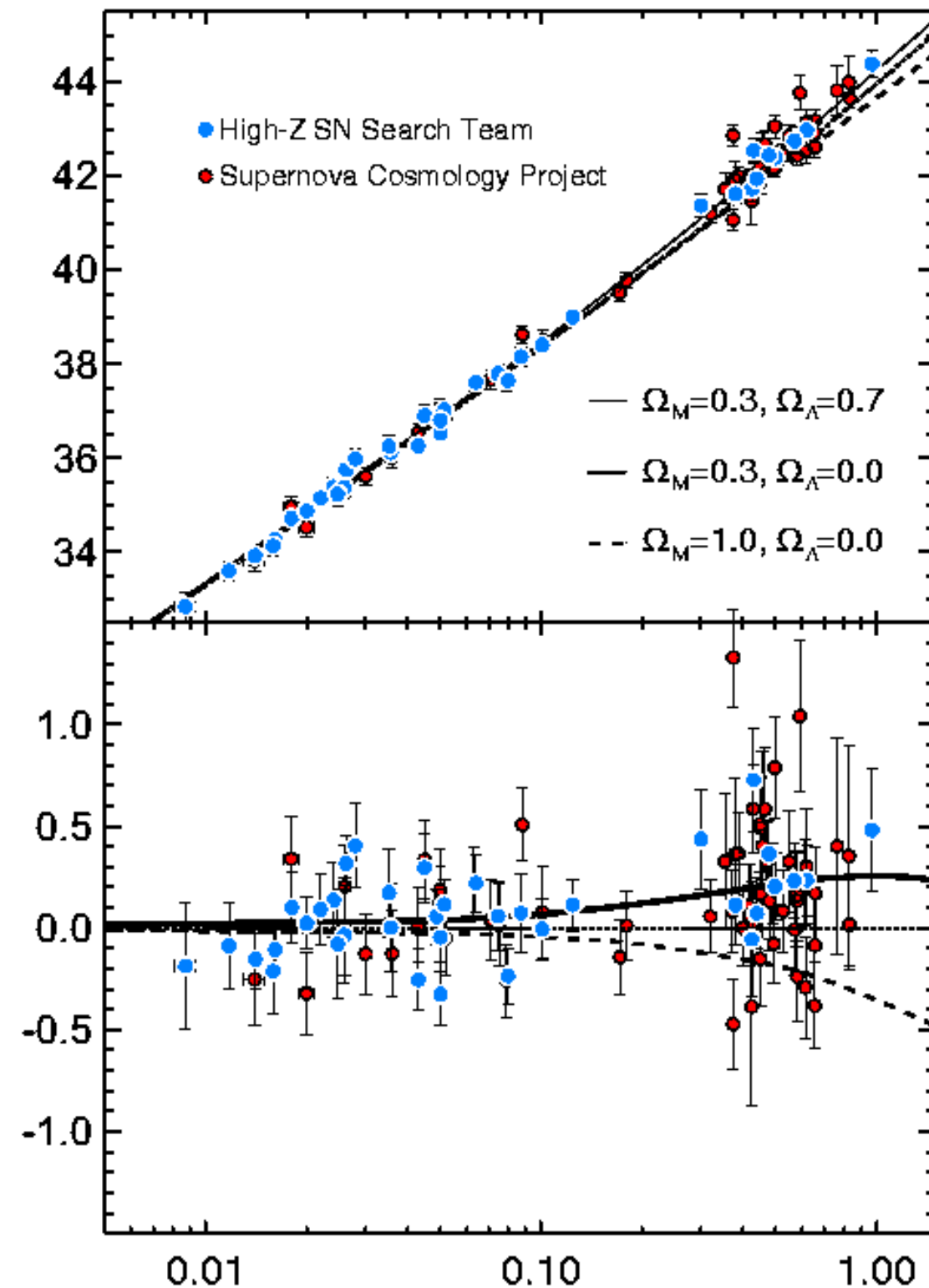
Las galaxias se alejan de nosotros (Ley de Hubble)

El Universo se
Expande!!

Y aceleradamente!!

Premio Nobel 2011
(Perlmutter, Riess, Schmidt)

Probabilidad de 5 sigmas
con la siguiente hipótesis



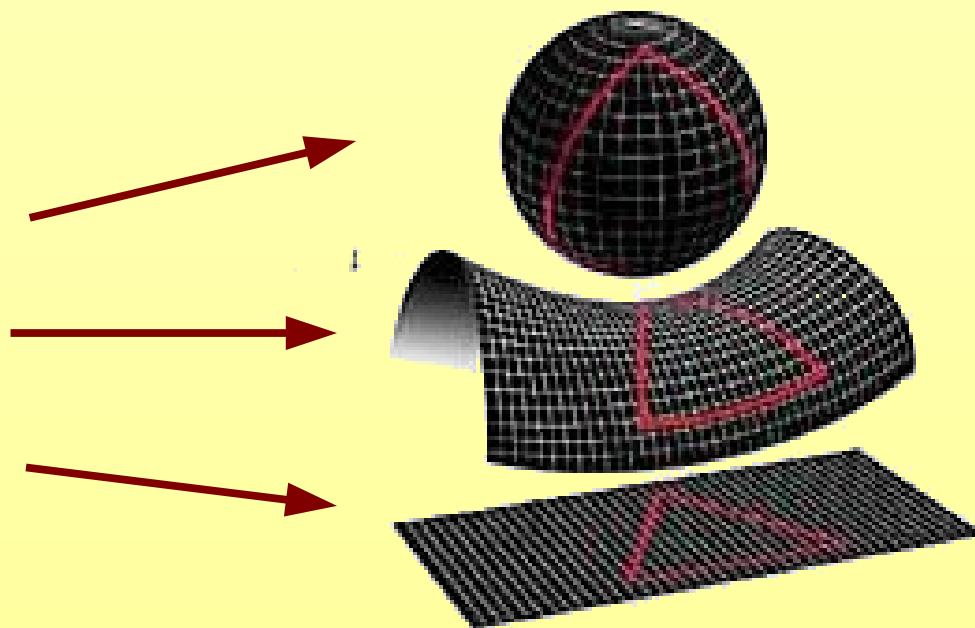
Hipótesis de FRWL

Asumiendo homegeidad e isotropía (y Rel. Gral.)

(FRWL)

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)(dr^2 + f(r)d\Omega_2^2)$$

$$f(r) = \begin{cases} \sin^2(r) \\ \sinh^2(r) \\ r^2 \end{cases}$$

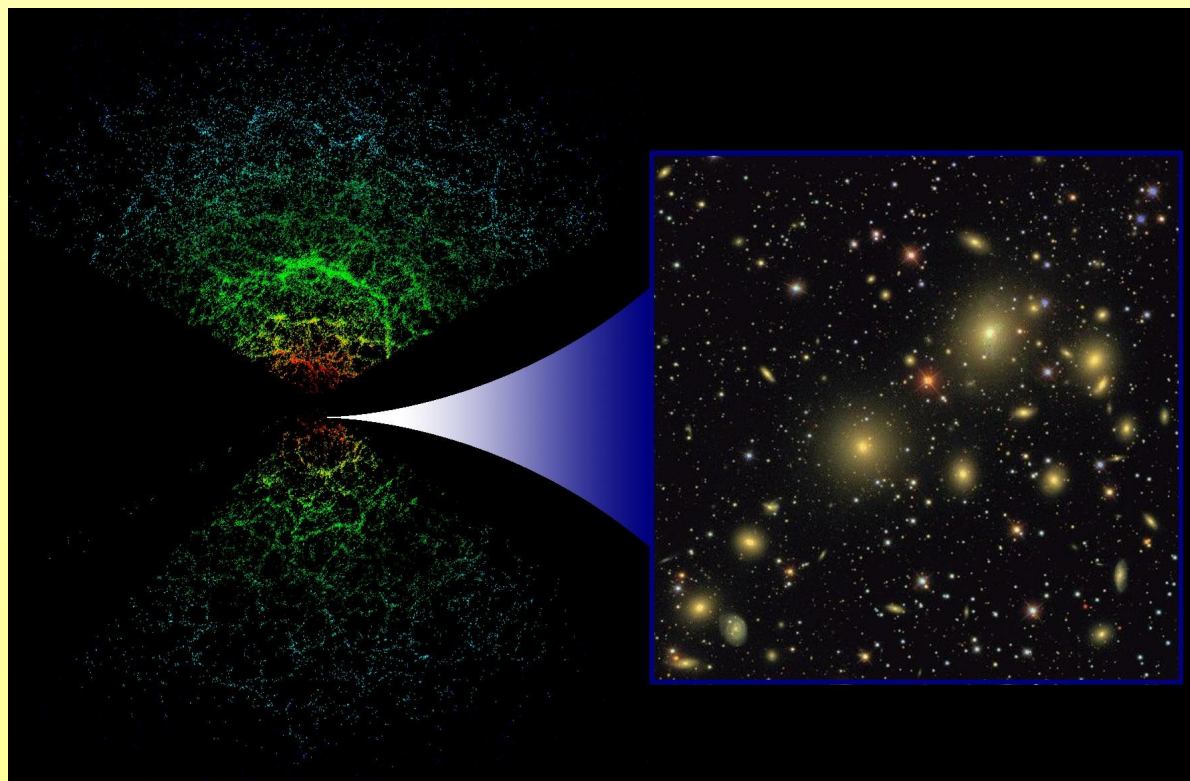


Hipótesis de FRWL

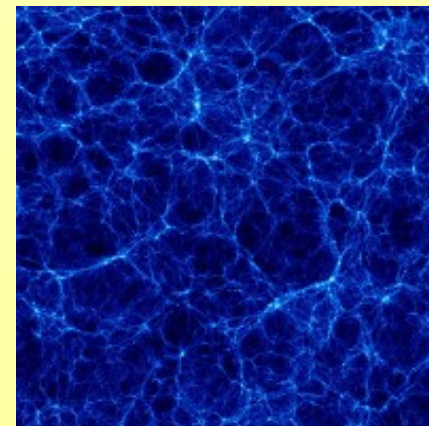
Asumiendo homegeidad e isotropía (y Rel. Gral.)

(FRWL)

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)(dr^2 + f(r)d\Omega_2^2)$$



(SDSS)

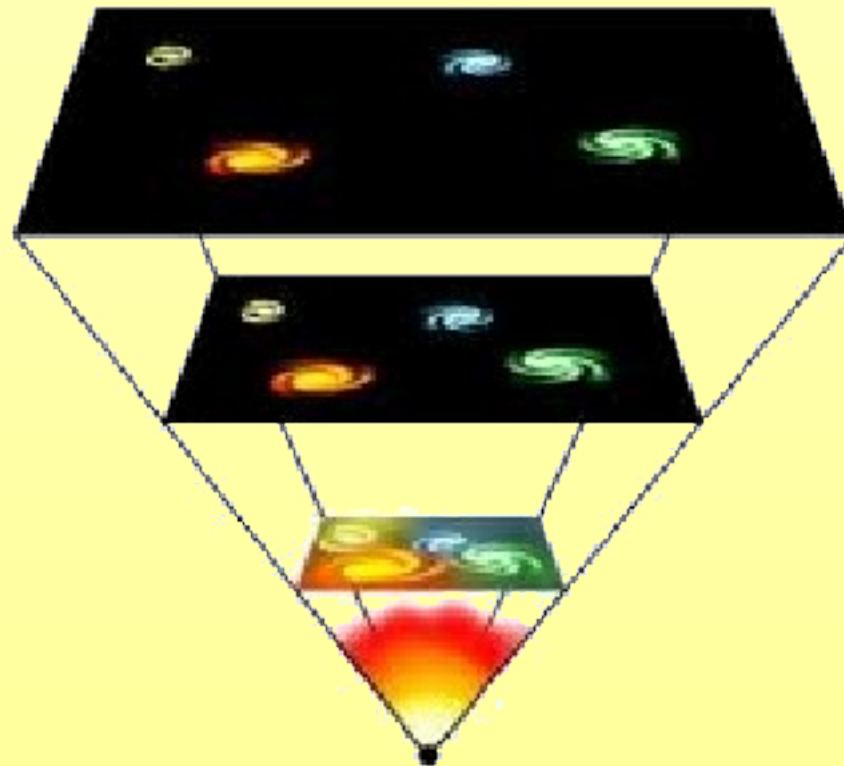


Homogeneidad > 200Mpc

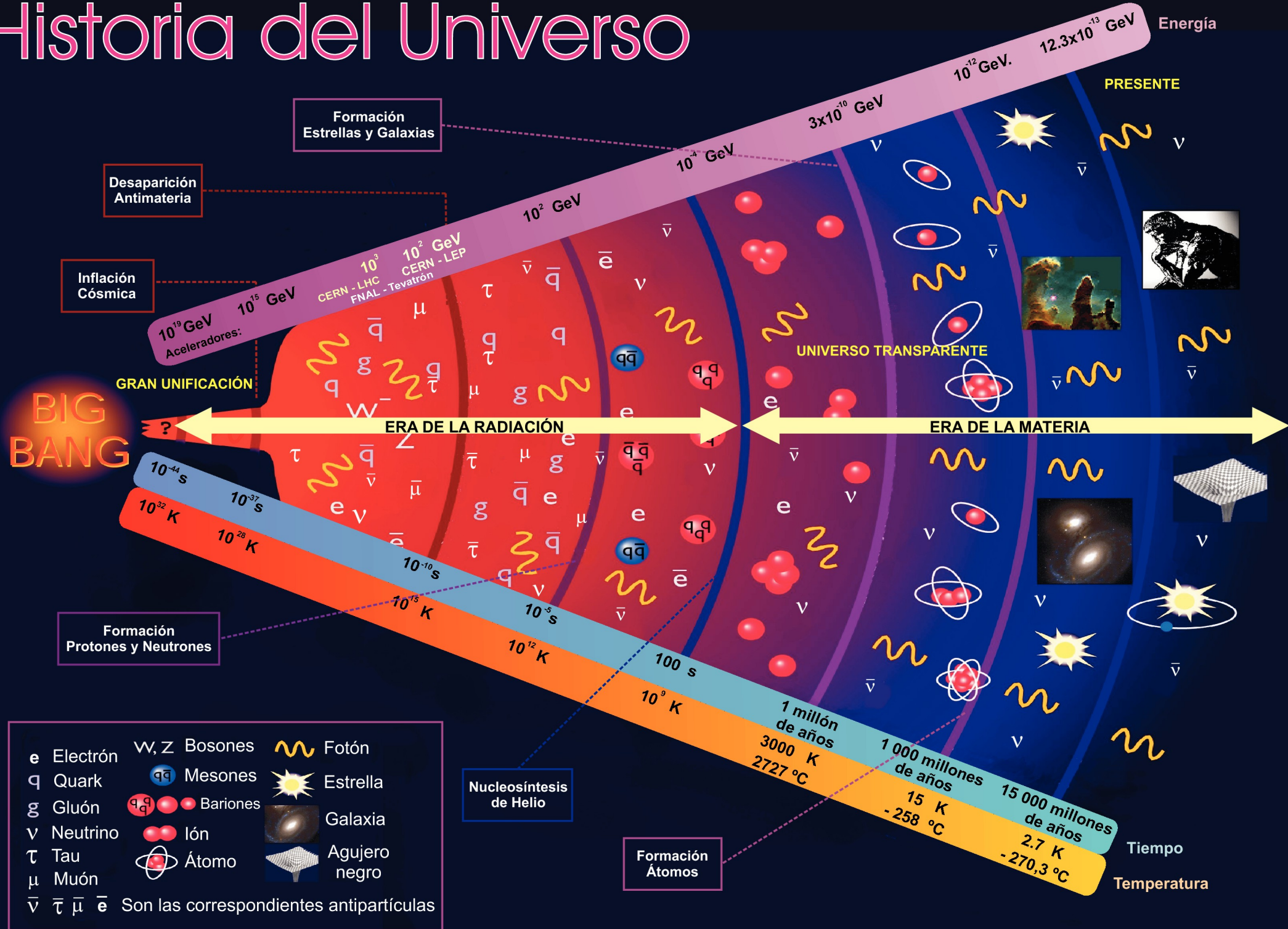
Hipótesis de FRWL

Un pasado más denso y caliente!

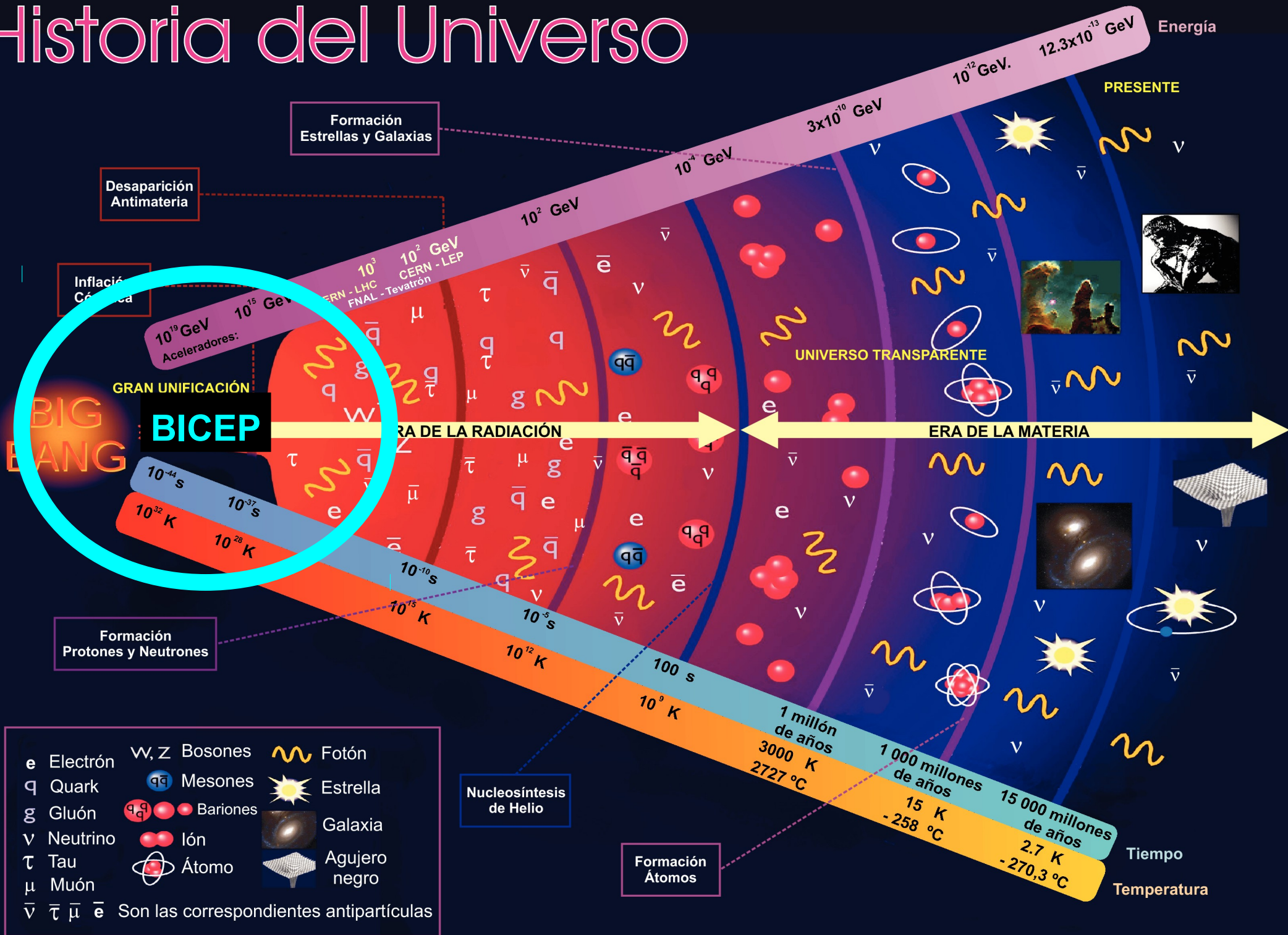
Teoría de la Gran Explosión Caliente (Hot Big Bang)



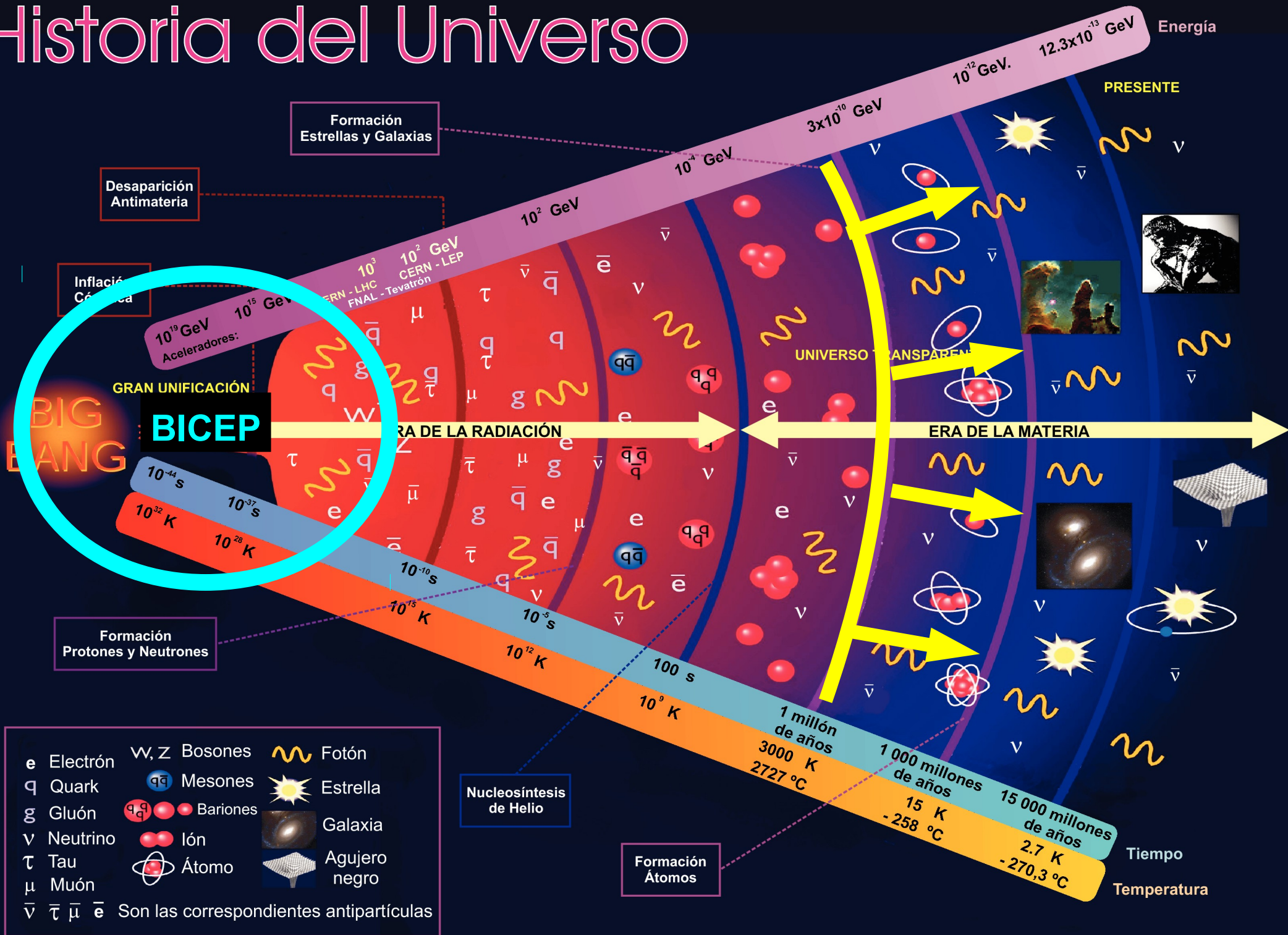
Historia del Universo



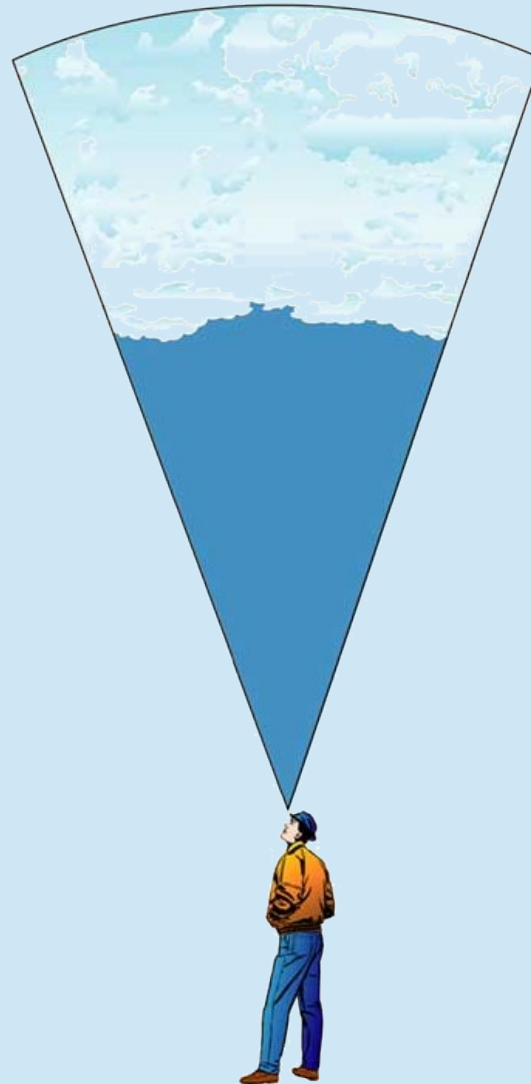
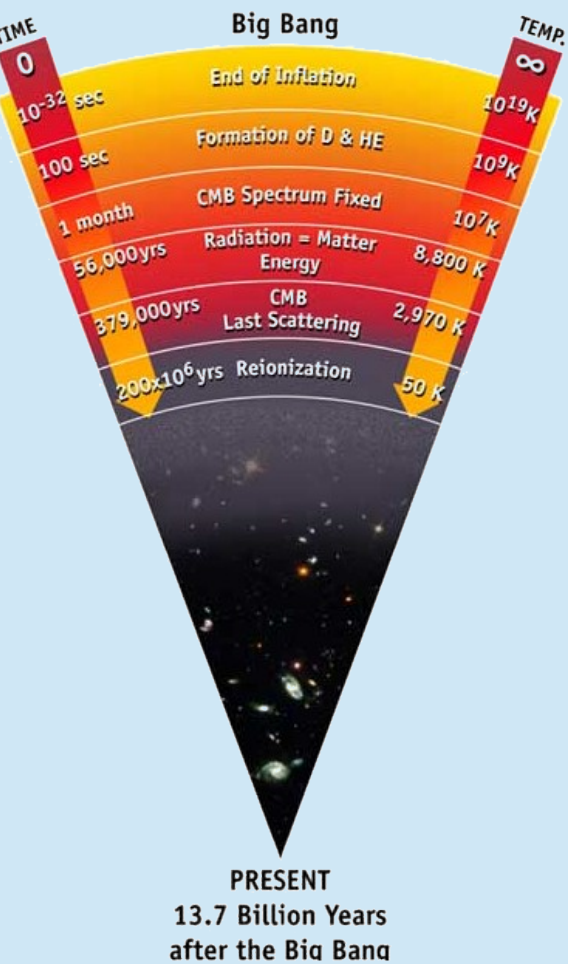
Historia del Universo



Historia del Universo

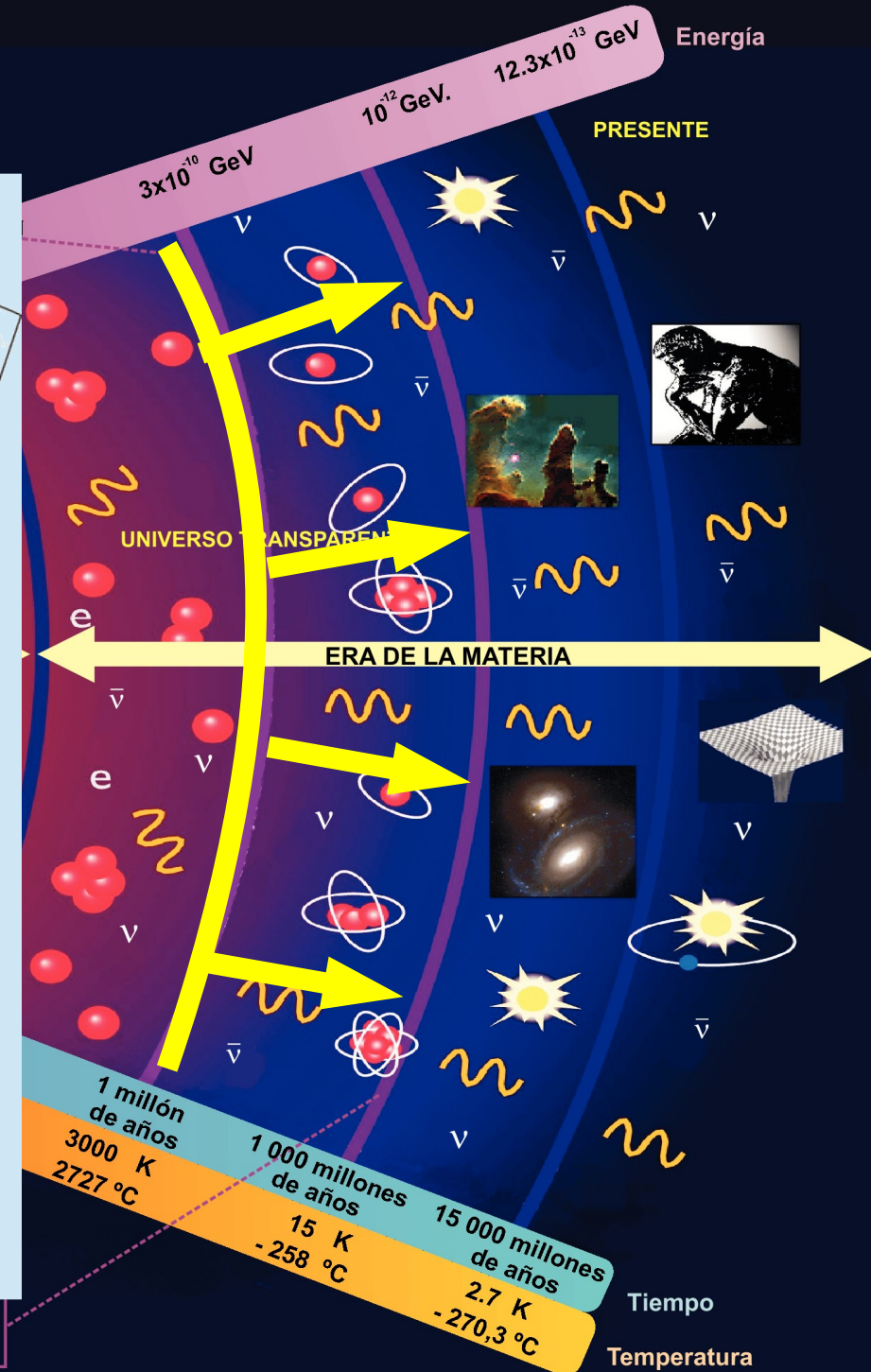


Historia del Universo



τ Tau μ Muón $\bar{\nu}$ $\bar{\tau}$ $\bar{\mu}$ $\bar{e}$ Son las correspondientes antipartículas
 Átomo Agujero negro

Formación Átomos

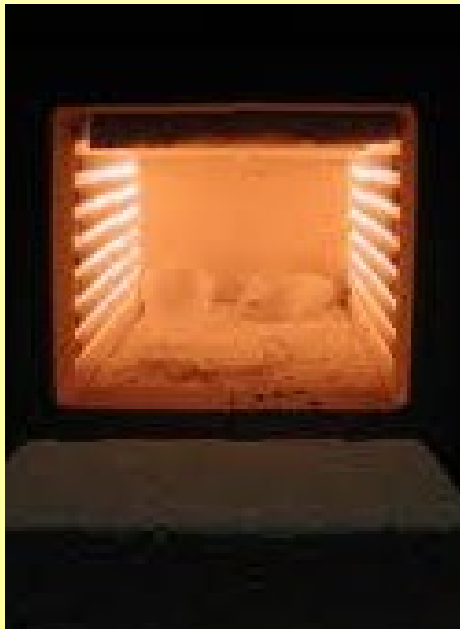


Radiación cósmica de fondo

El Universo temprano es como un horno caliente

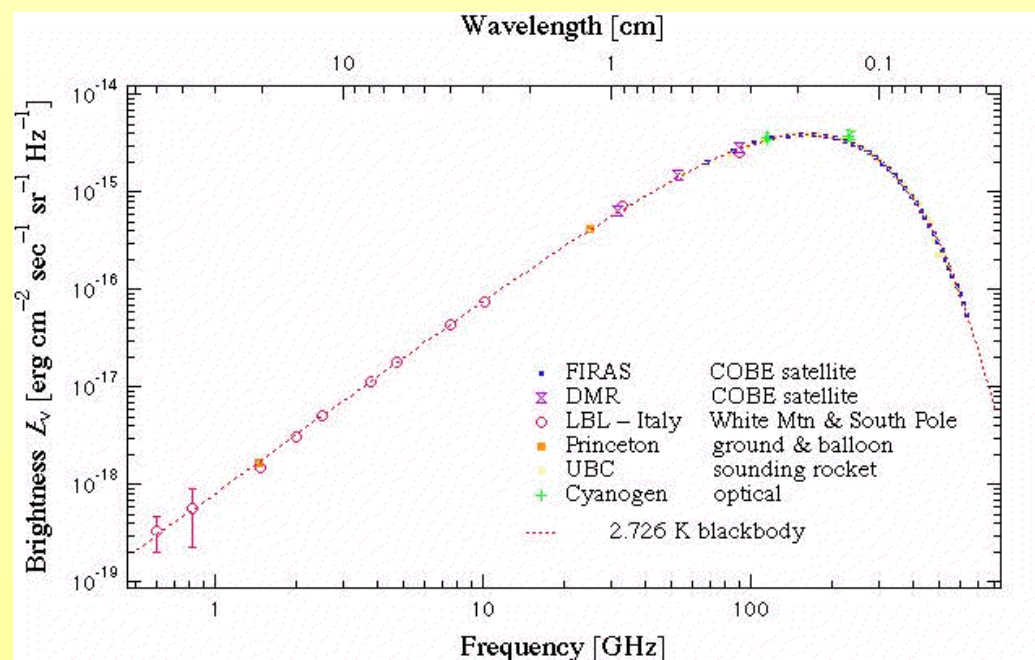
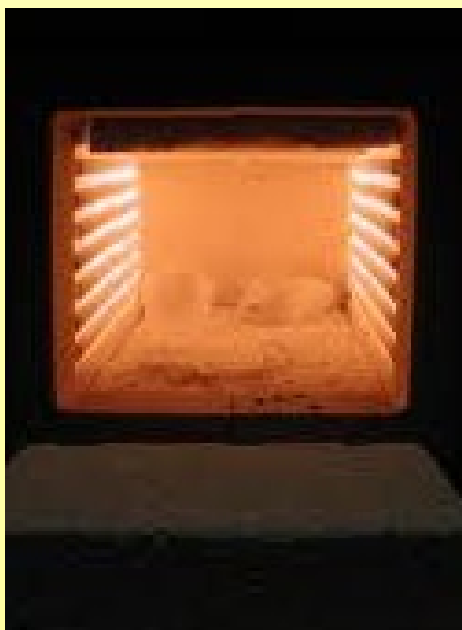
Debe existir un resplandor de fondo (Gamow y Alpher)

Descubierta por Penzias y Willson 2964 (Nobel, 1978)



Radiación cósmica de fondo

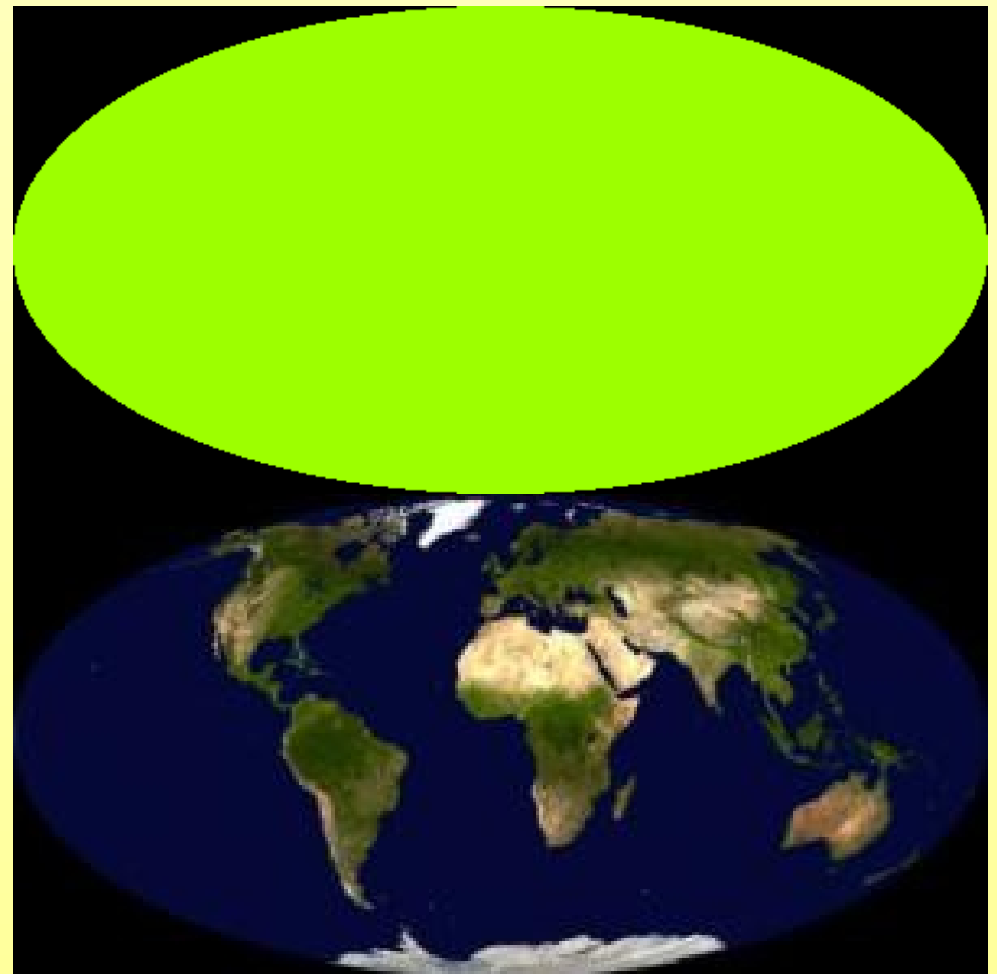
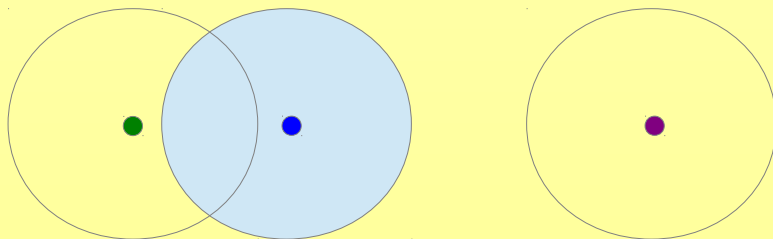
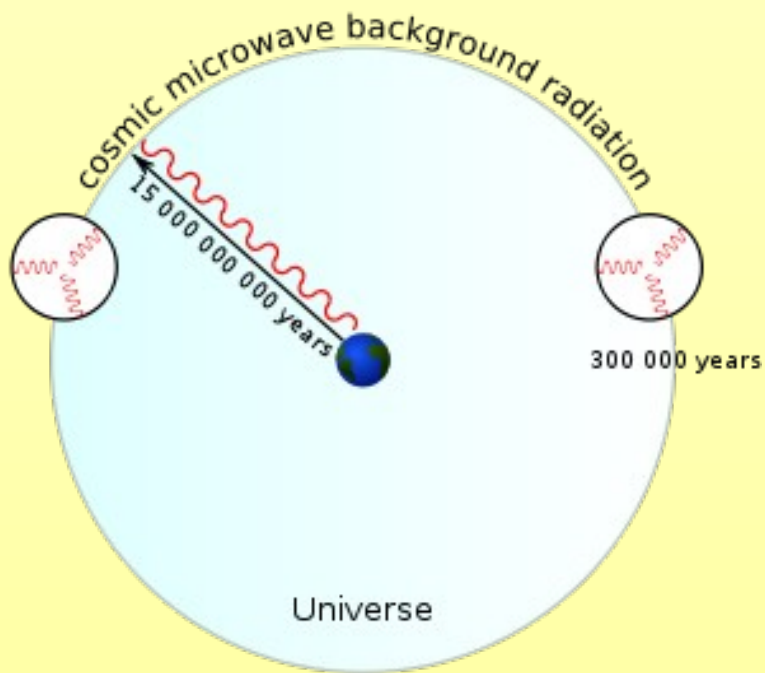
La radiación tiene un espectro de cuerpo negro



$$T = 2.7 \text{ K}$$

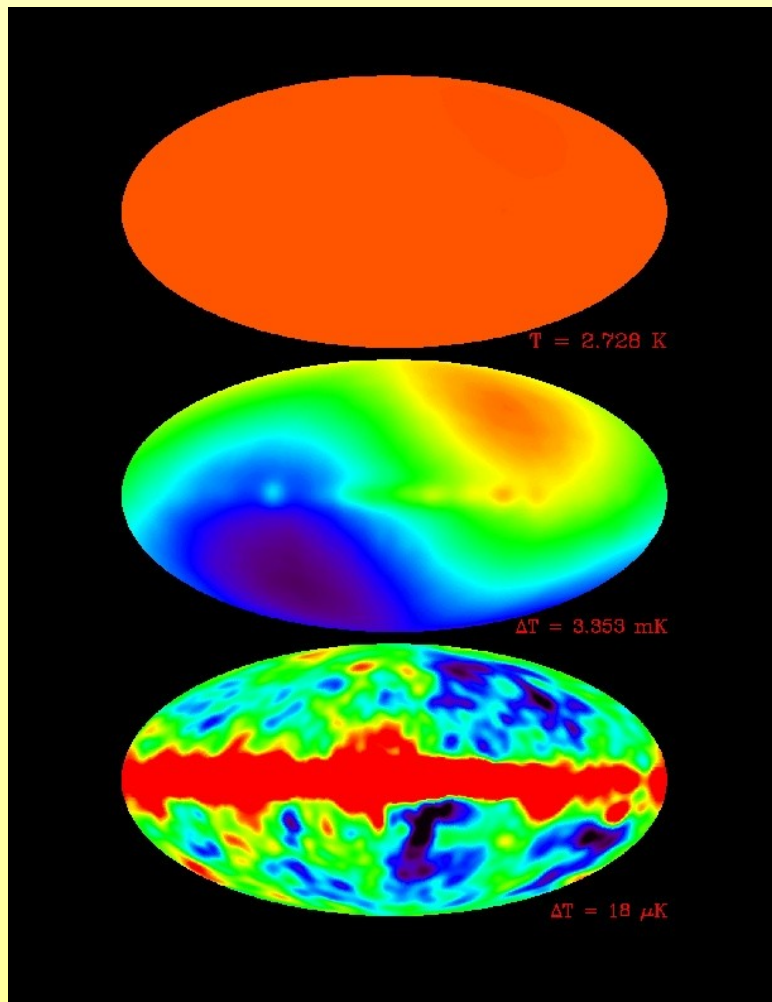
Radiación cósmica de fondo

La radiación es Isotrópica y Homogénea

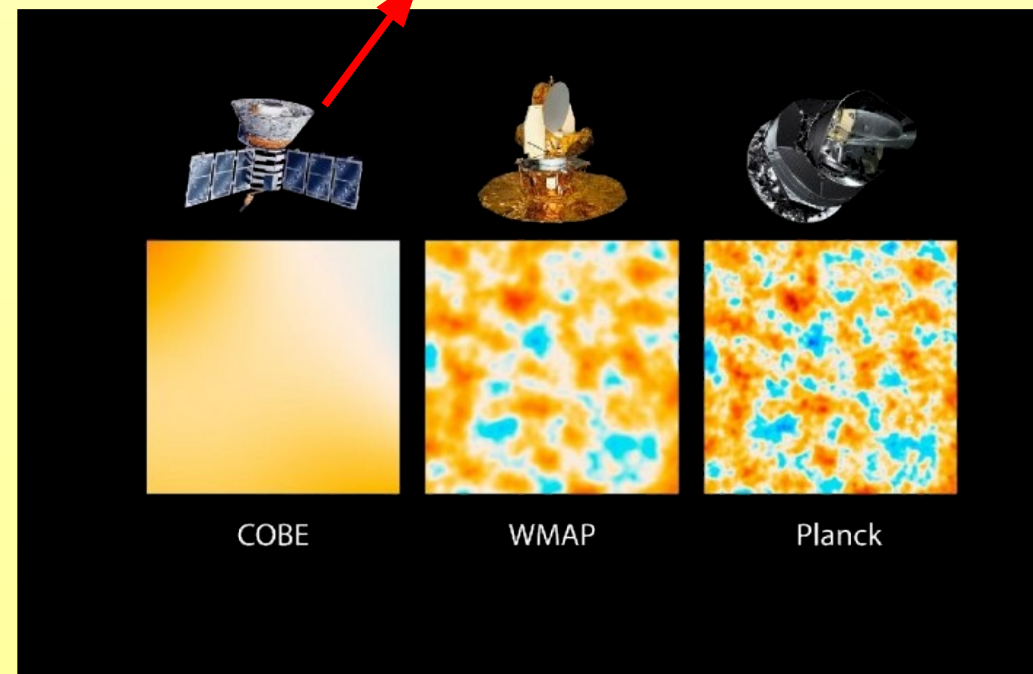


Radiación cósmica de fondo

Pero hay **pequeñas** fluctuaciones!



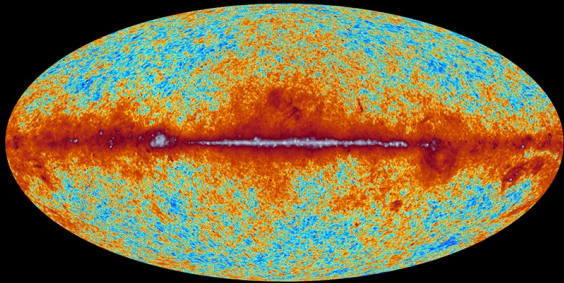
Smoot y Mather, Nobel, 2006



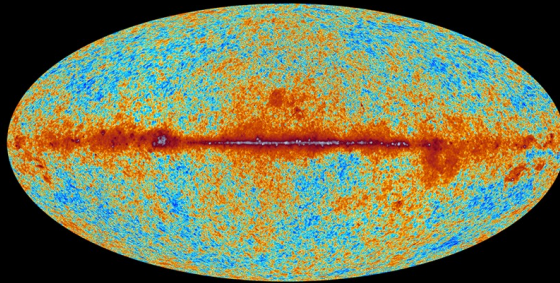


planck

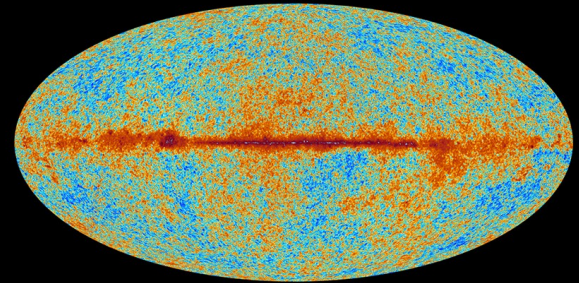
The sky as seen by Planck



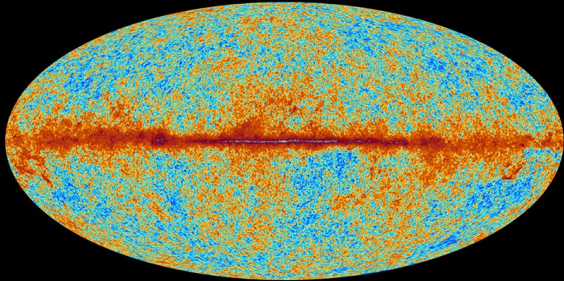
30 GHz



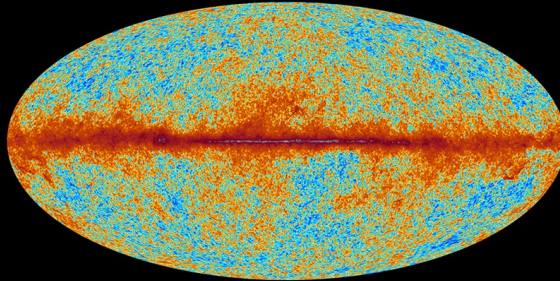
44 GHz



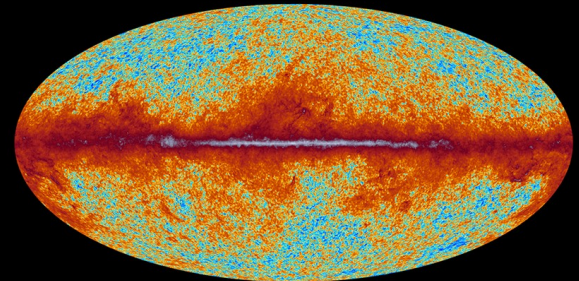
70 GHz



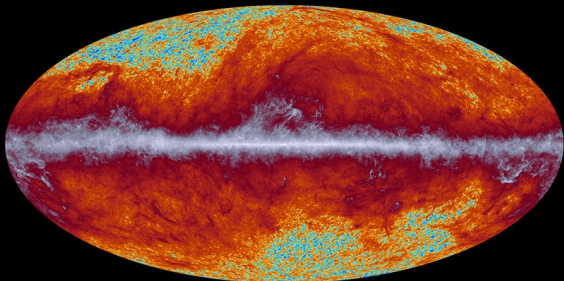
100 GHz



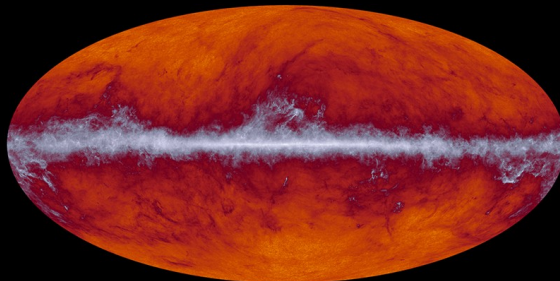
143 GHz



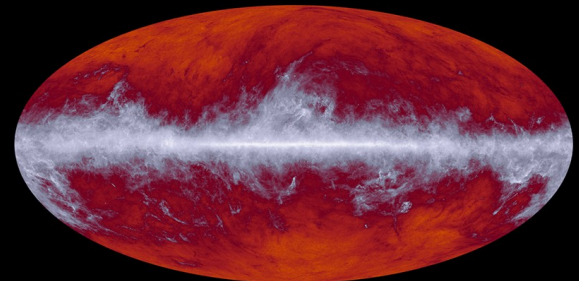
217 GHz



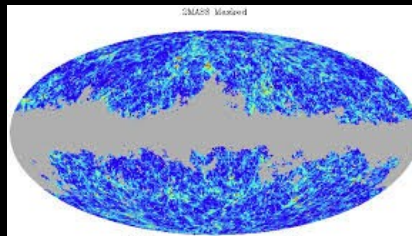
353 GHz



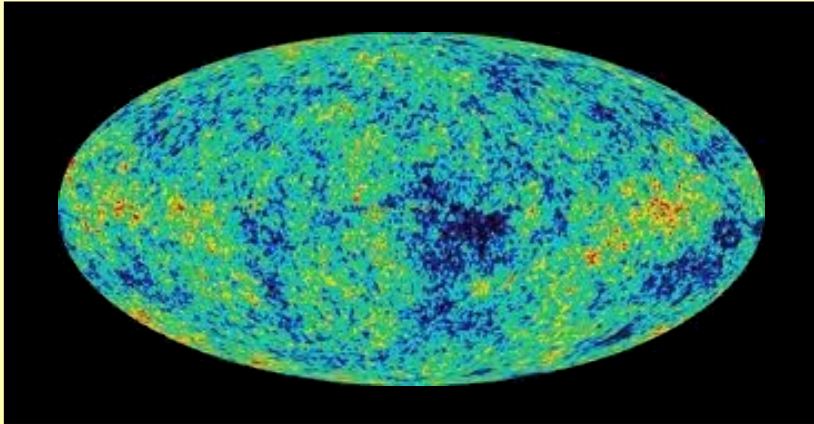
545 GHz



857 GHz



Radiación cósmica de fondo



Las perturbaciones son

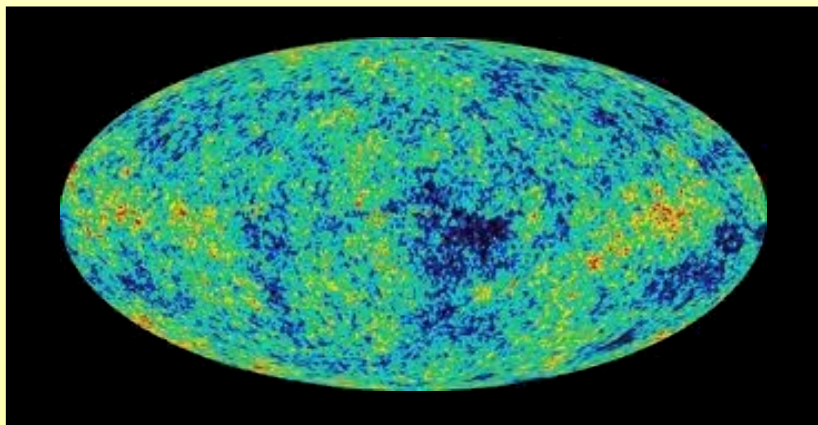


Gaussianas



Casi invariantes de escala

Radiación cósmica de fondo

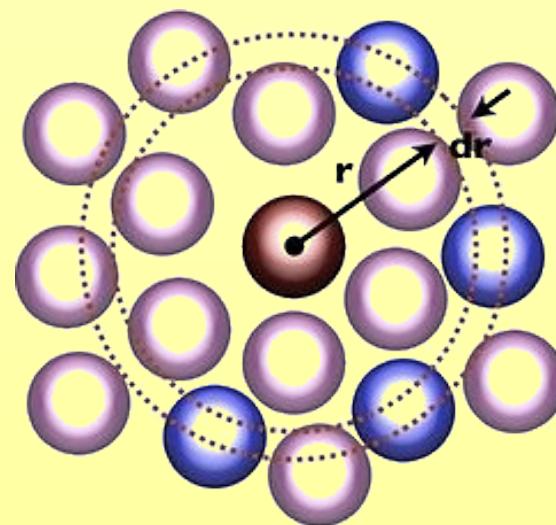


¿Qué otra información
podemos extraer?

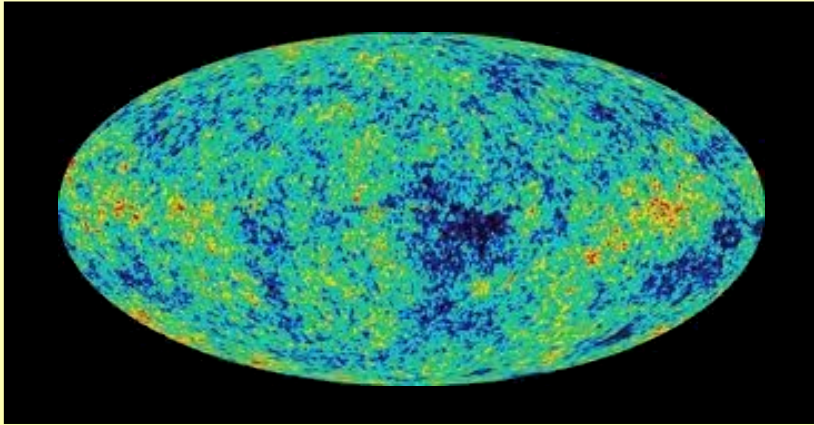
Correlación de pares

$$\xi(x, x') \sim \langle \Delta T(x) \Delta T(x') \rangle$$

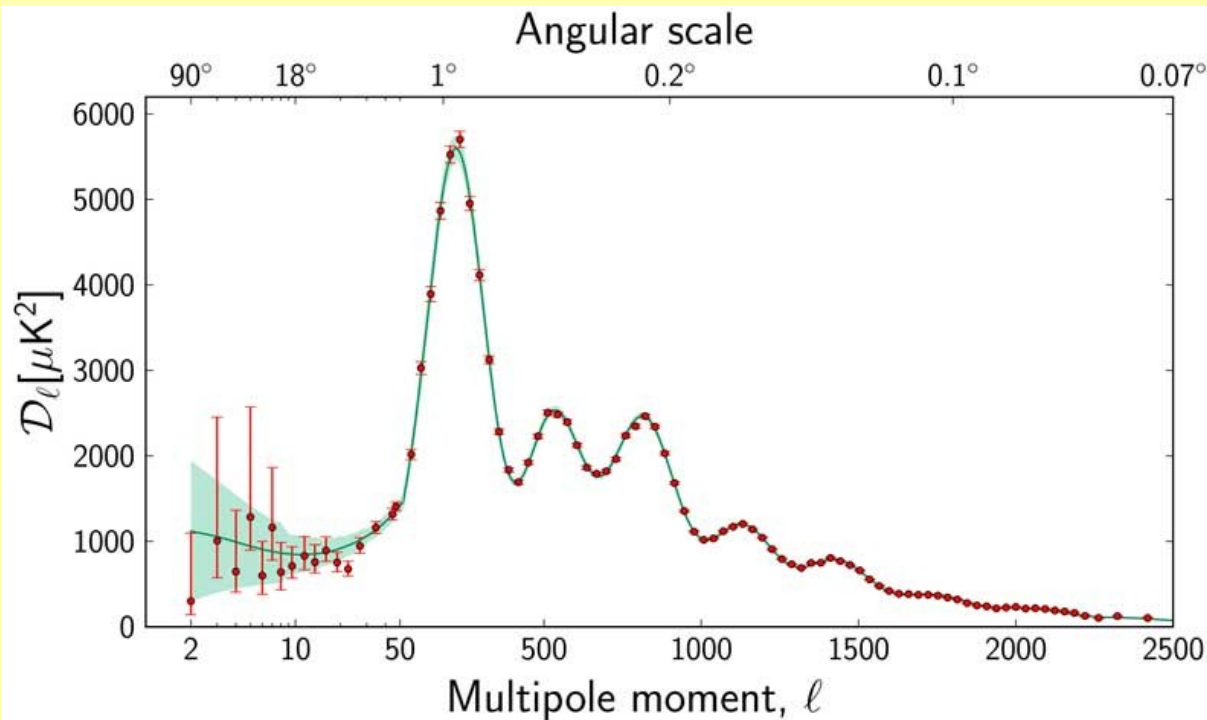
$$r = x' - x$$



Radiación cósmica de fondo

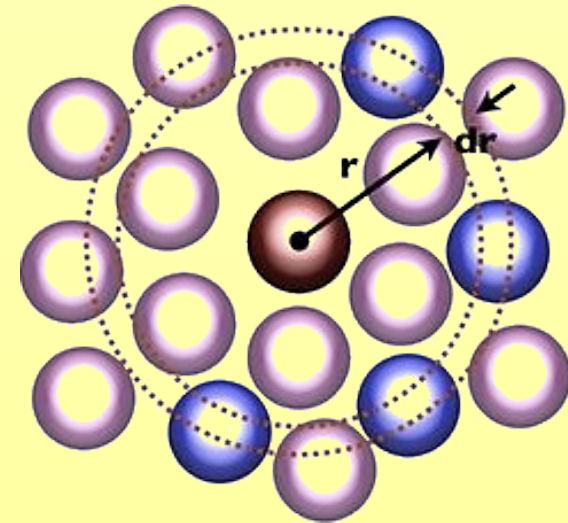


Planck, 2013

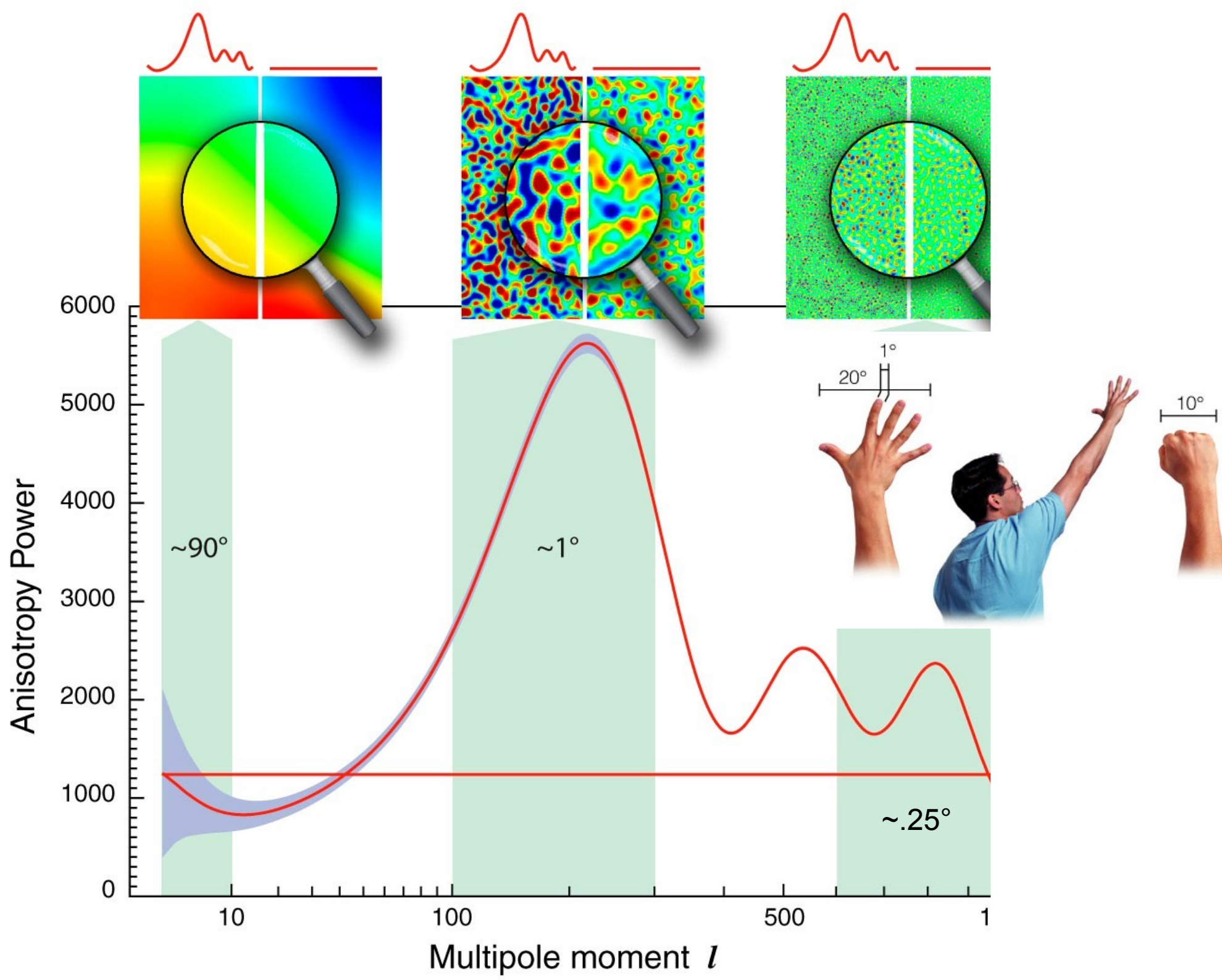


¿Qué otra información podemos extraer?

Correlación de pares

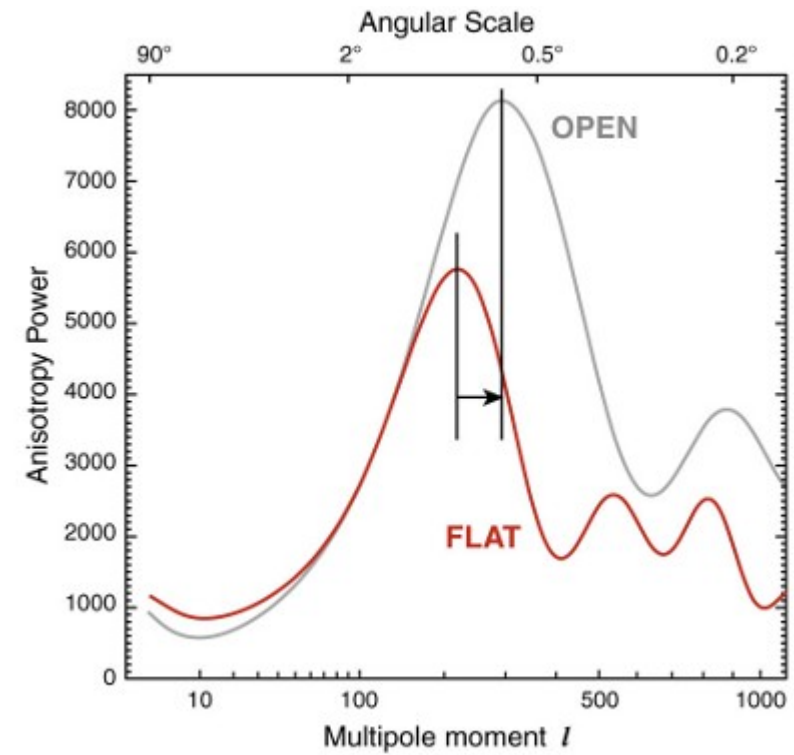
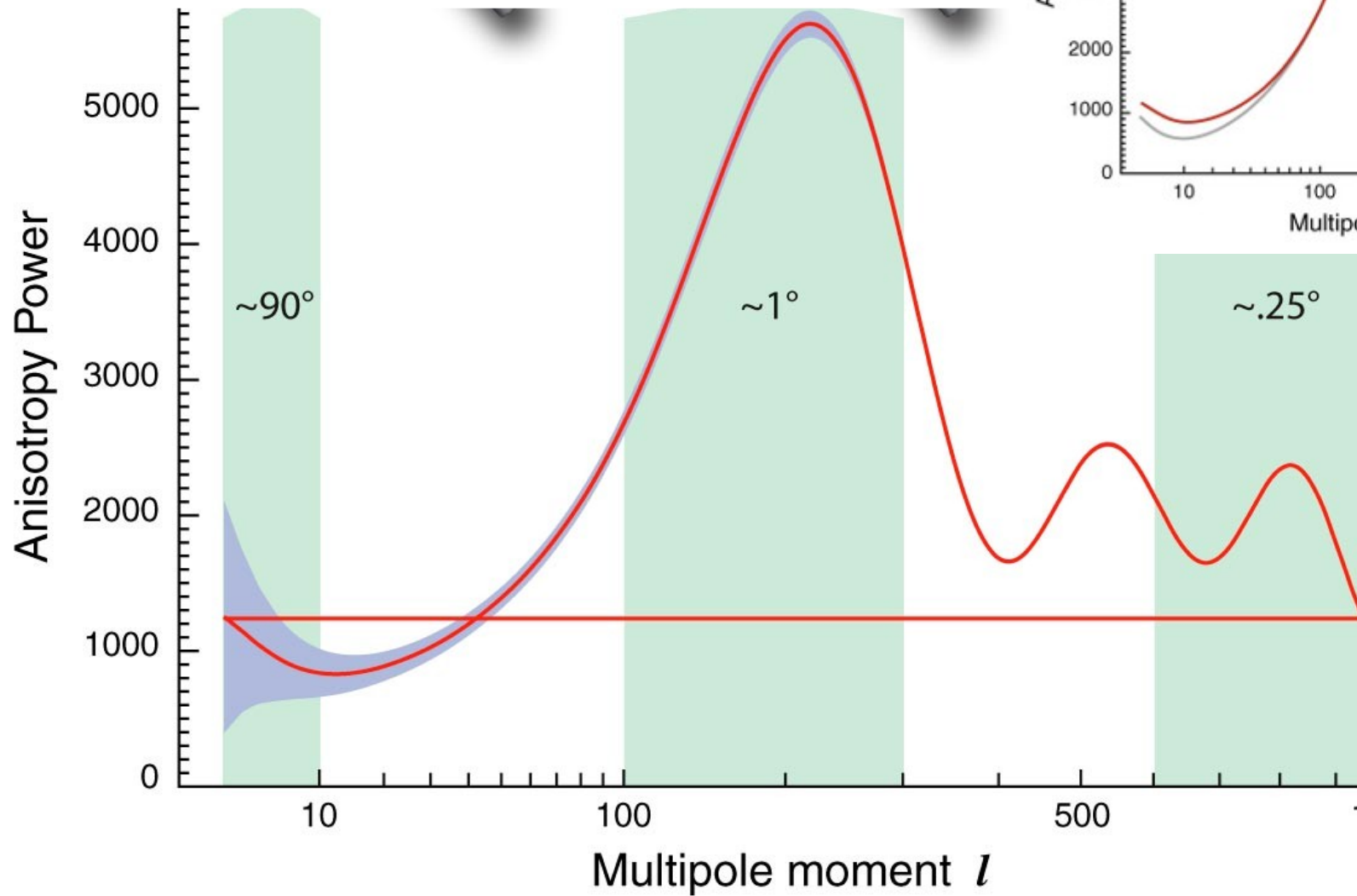


Espectro de potencias
Coeficientes de los
esféricos armónicos

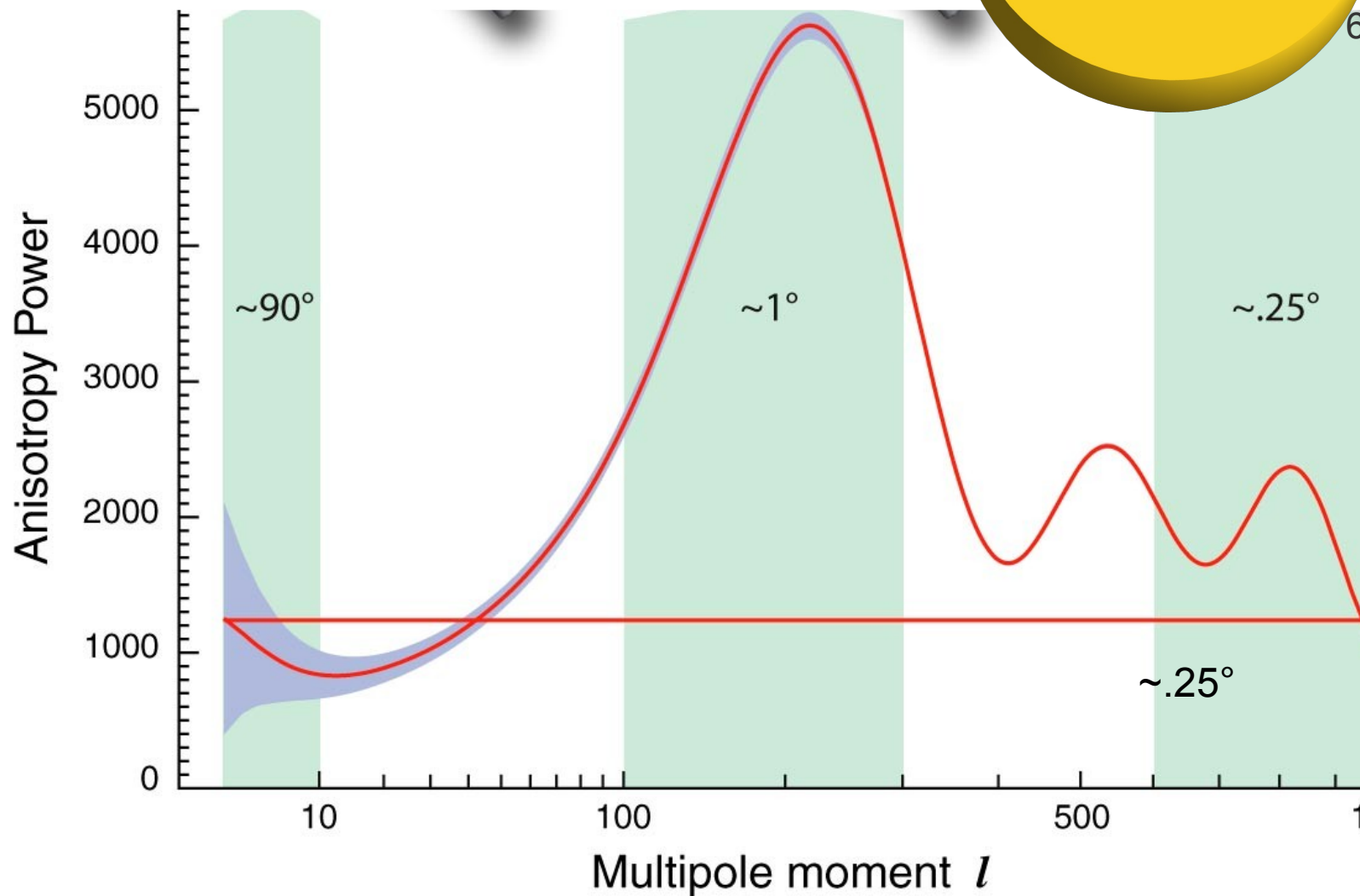
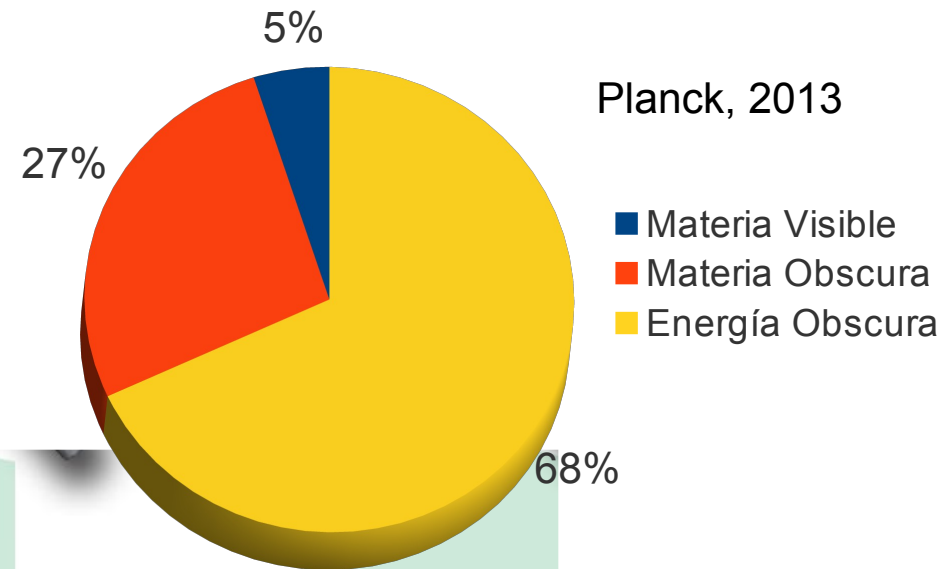


Nuestro Universo
es Plano
(error < 0.1%)

Planck, 2013

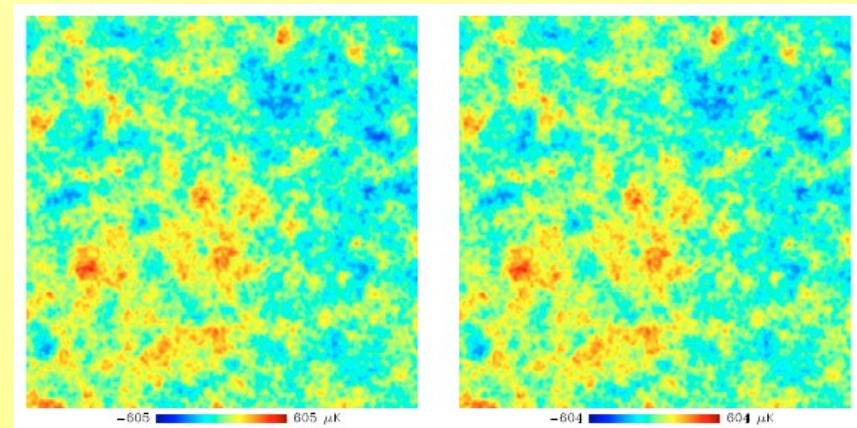
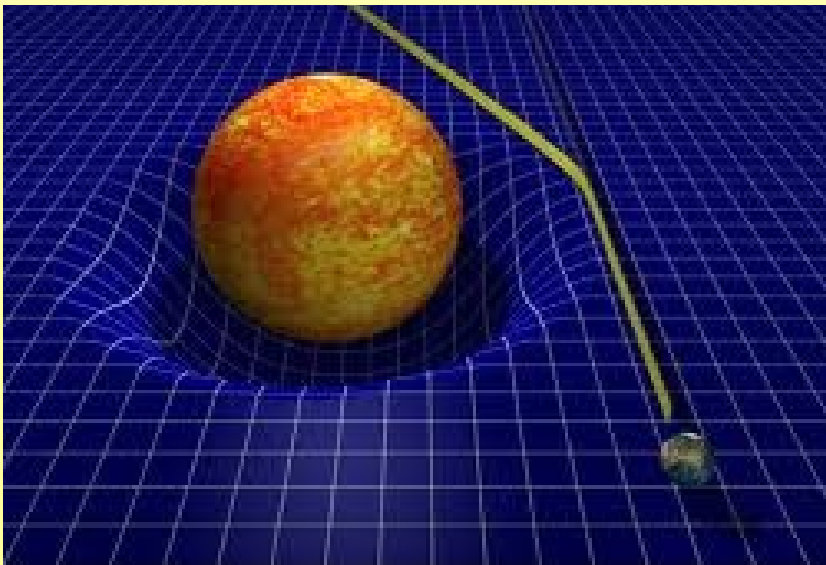
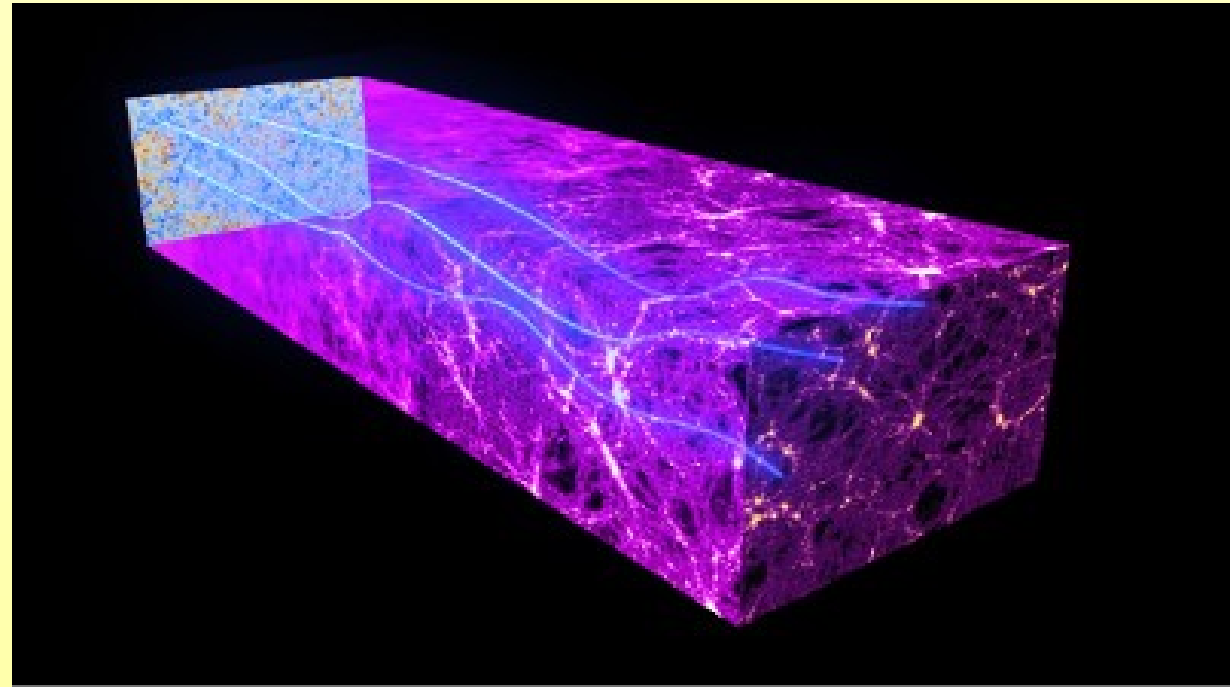


Los otros picos dicen la cantidad de
Materia Visible, Materia Oscura
Y Energía Oscura del Universo



Otros efectos

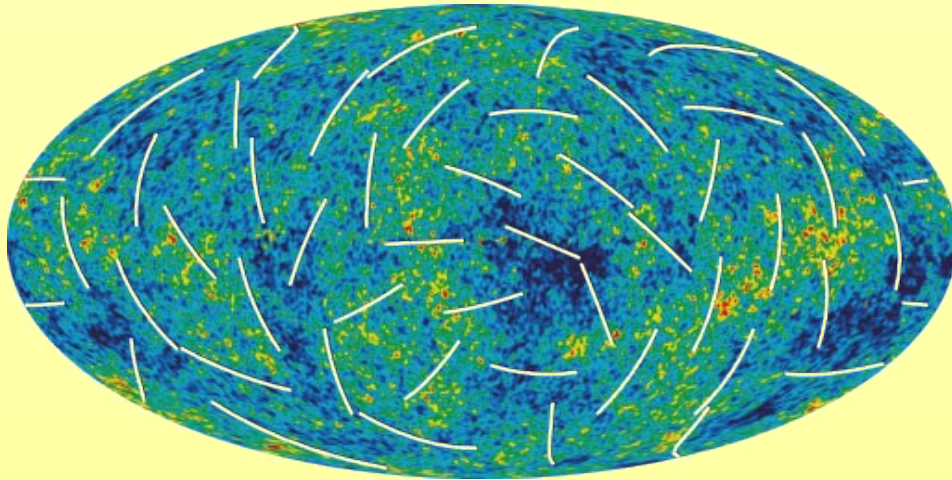
Lentes gravitacionales
afectan las trayectorias
de los fotones



Modos E y B

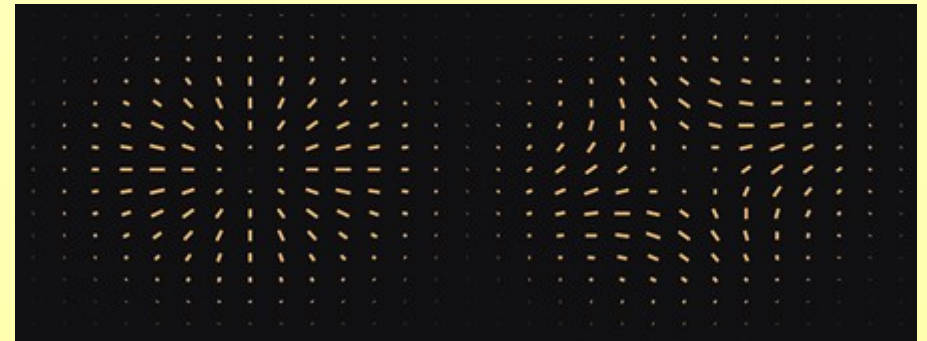
Polarización

Equivalentes al campo
Eléctrico y Magnético



E

B

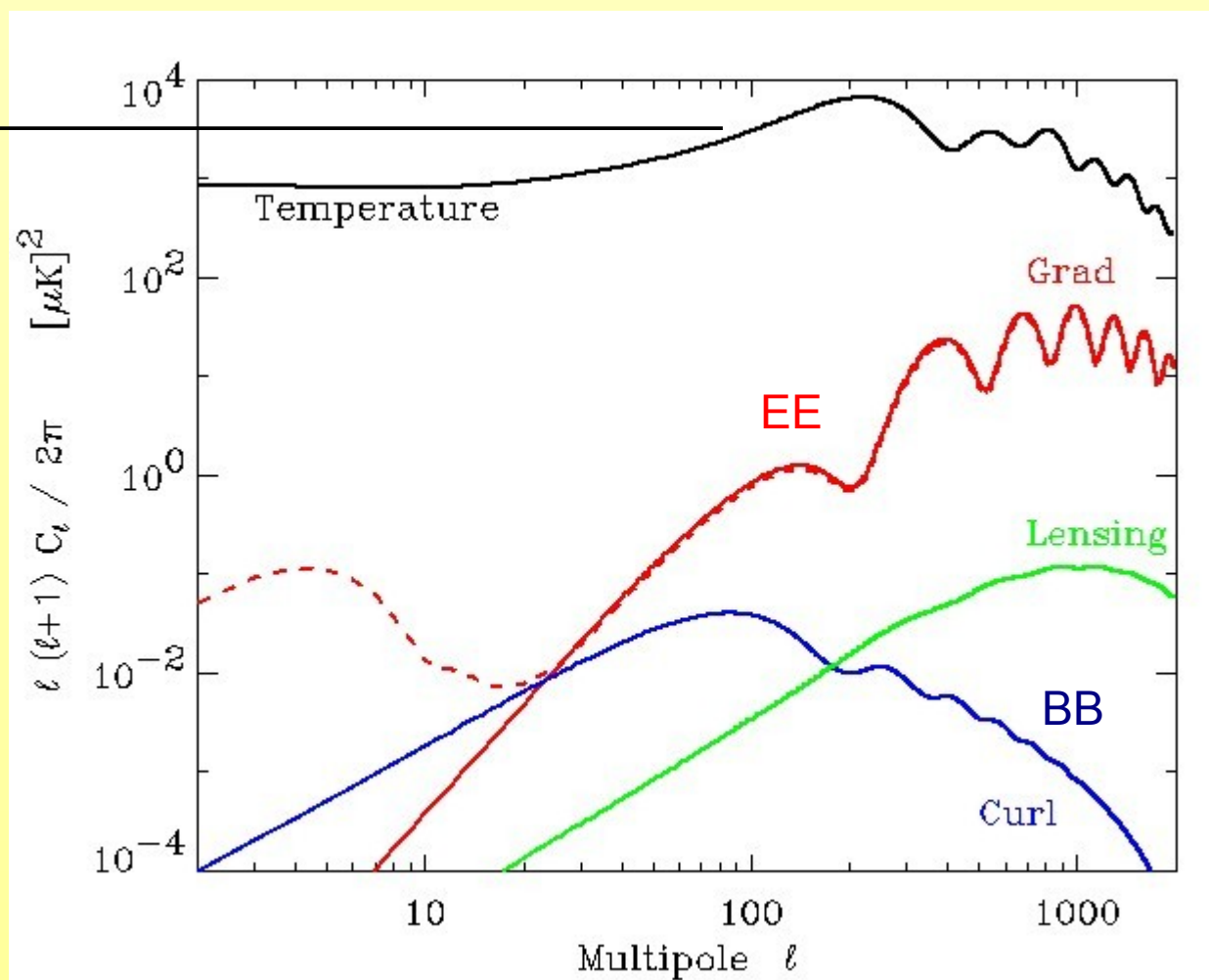
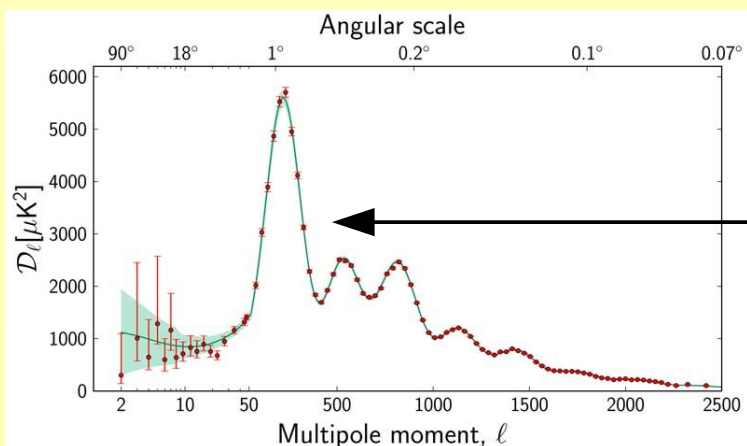


Divergencia

Rotacional

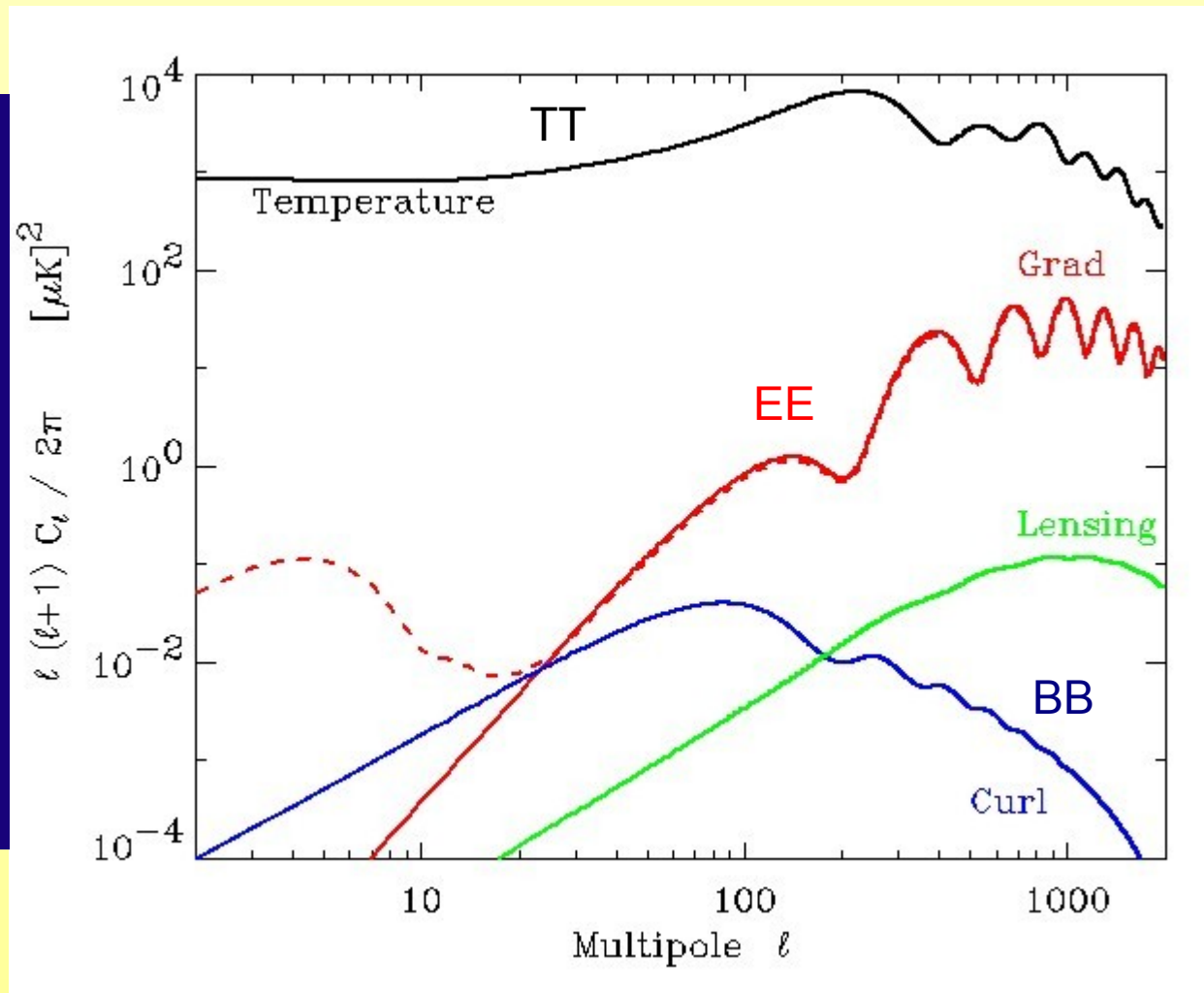
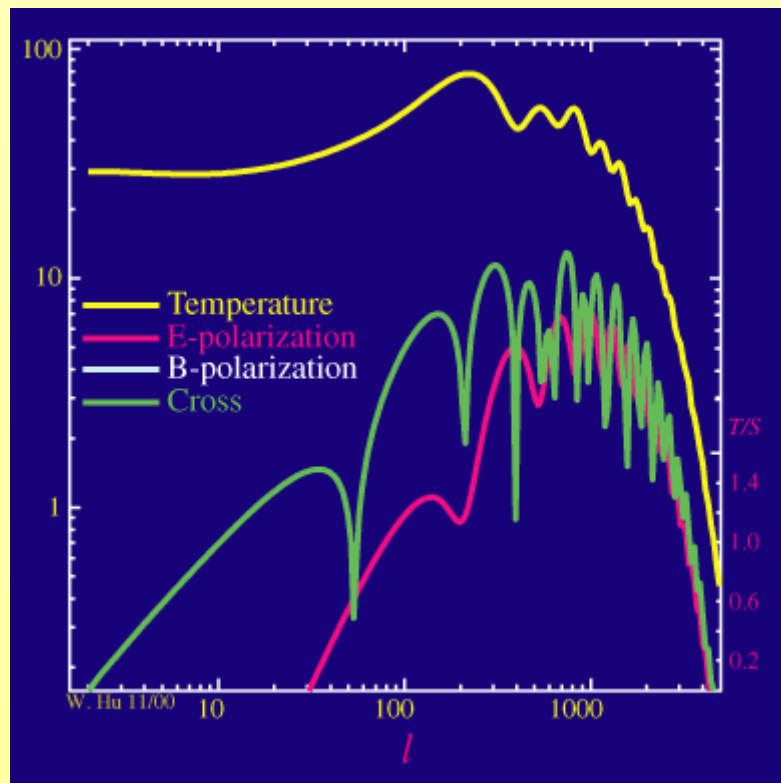
Modos E y B

Minúscula señal!!!



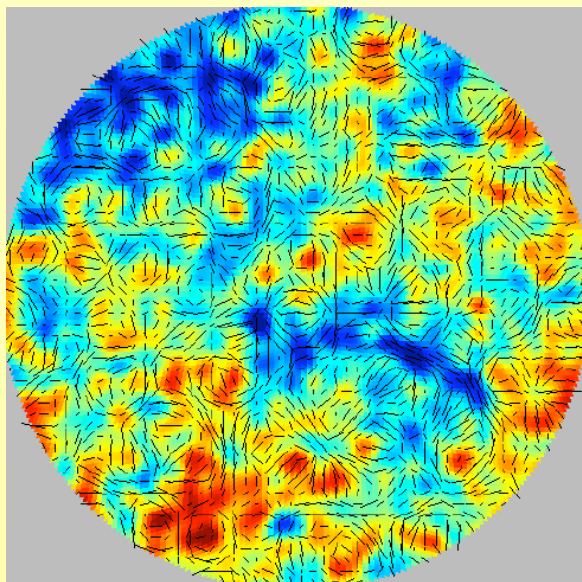
Modos E y B

Minúscula señal!!!

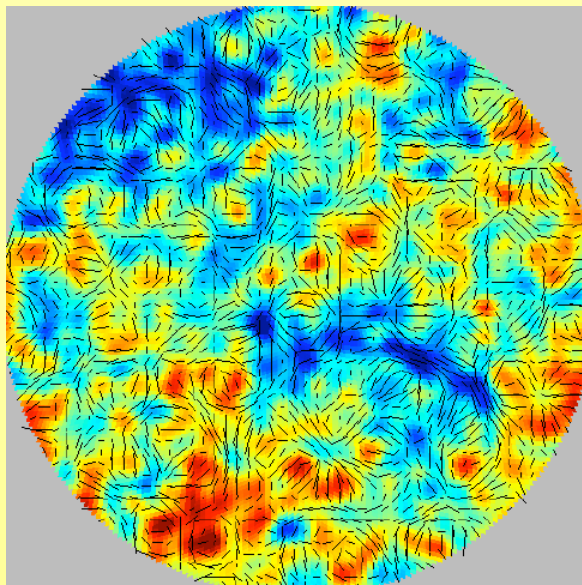


Modos E y B

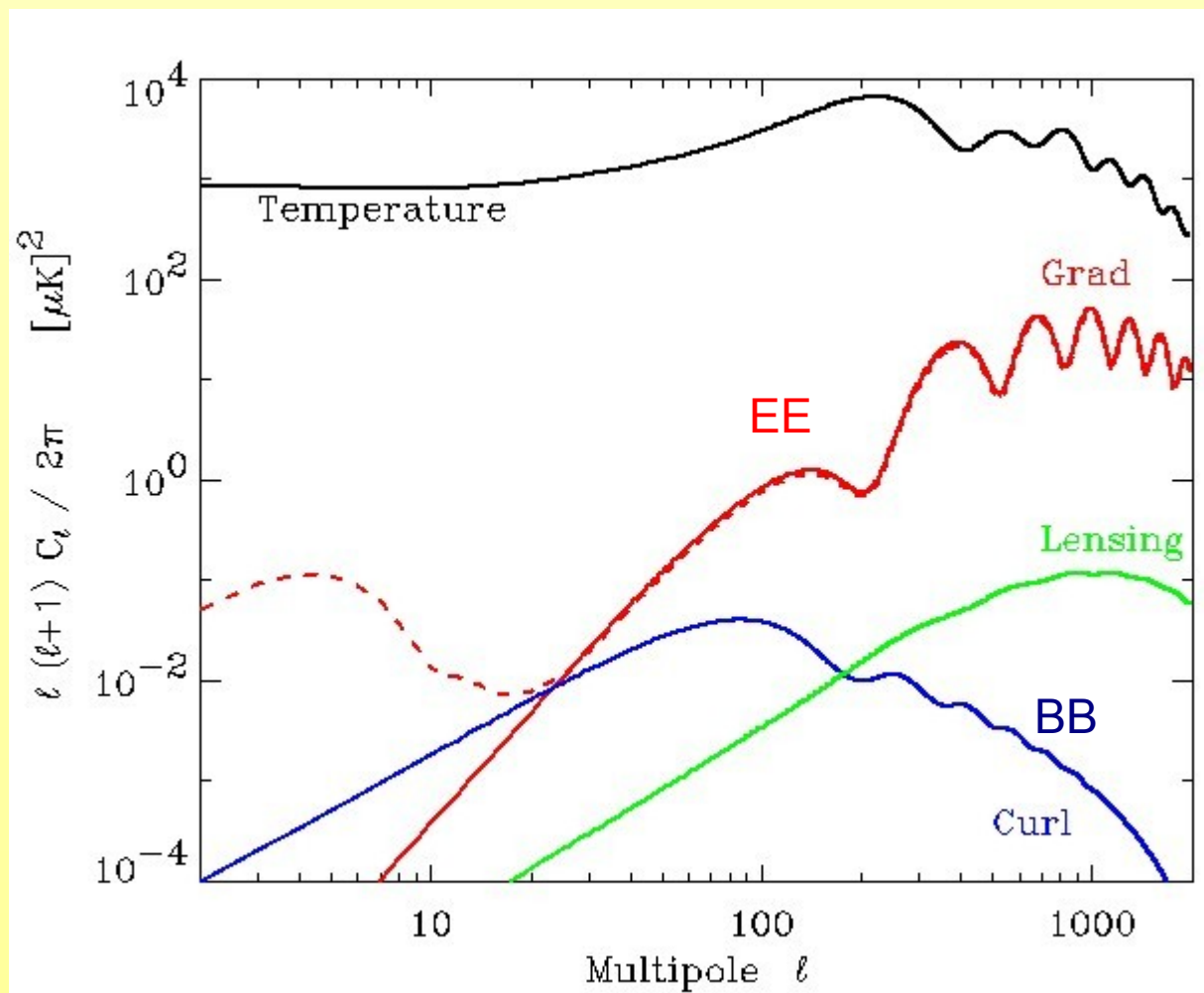
$r=0$



$r=0.3$



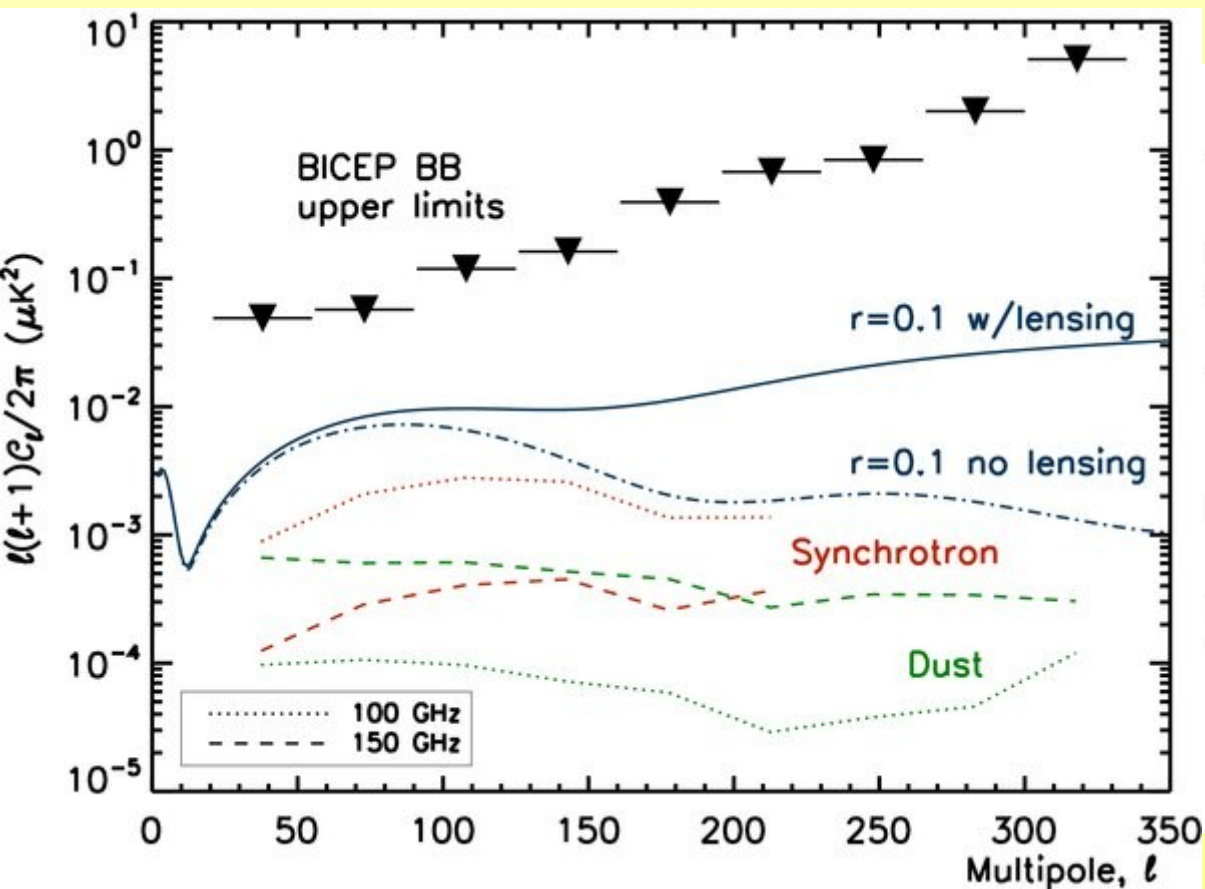
Minúscula señal!!!



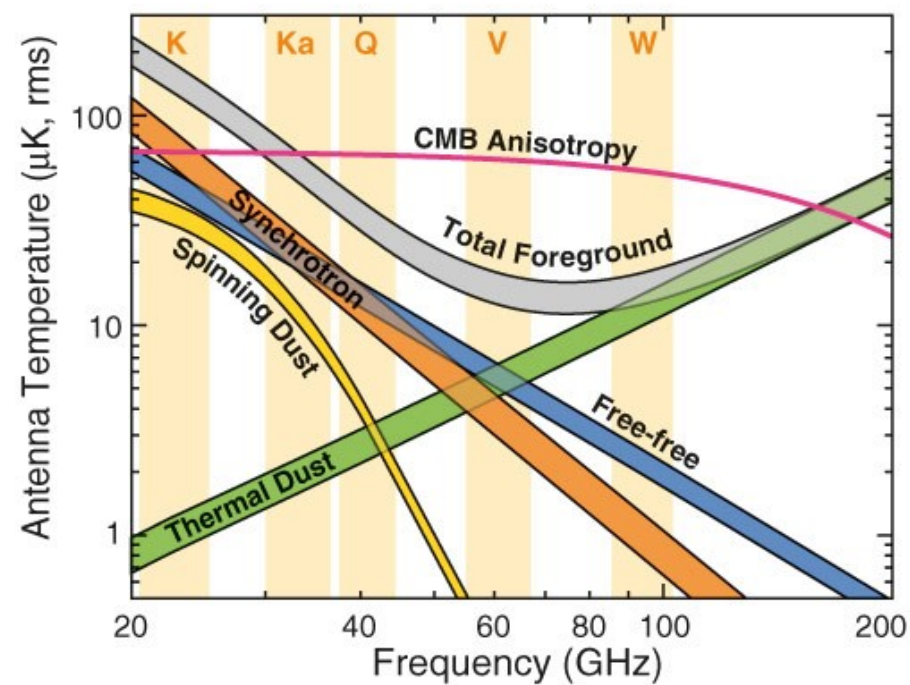
Modos E y B

Modos B

El pasado!



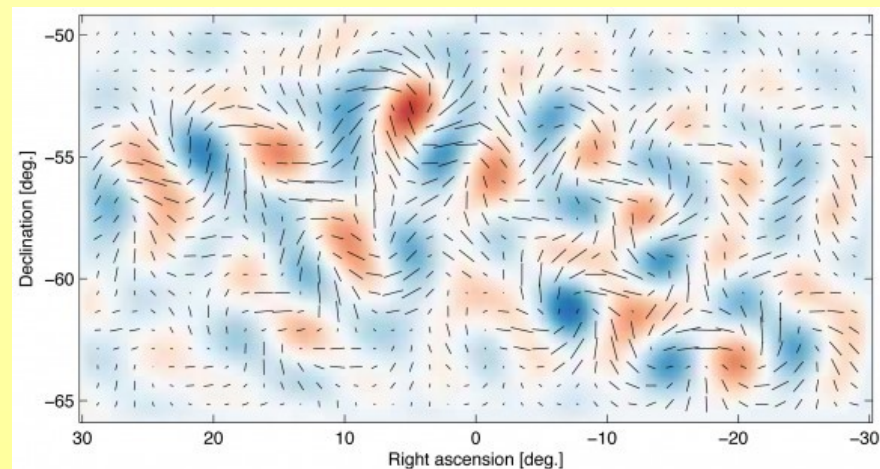
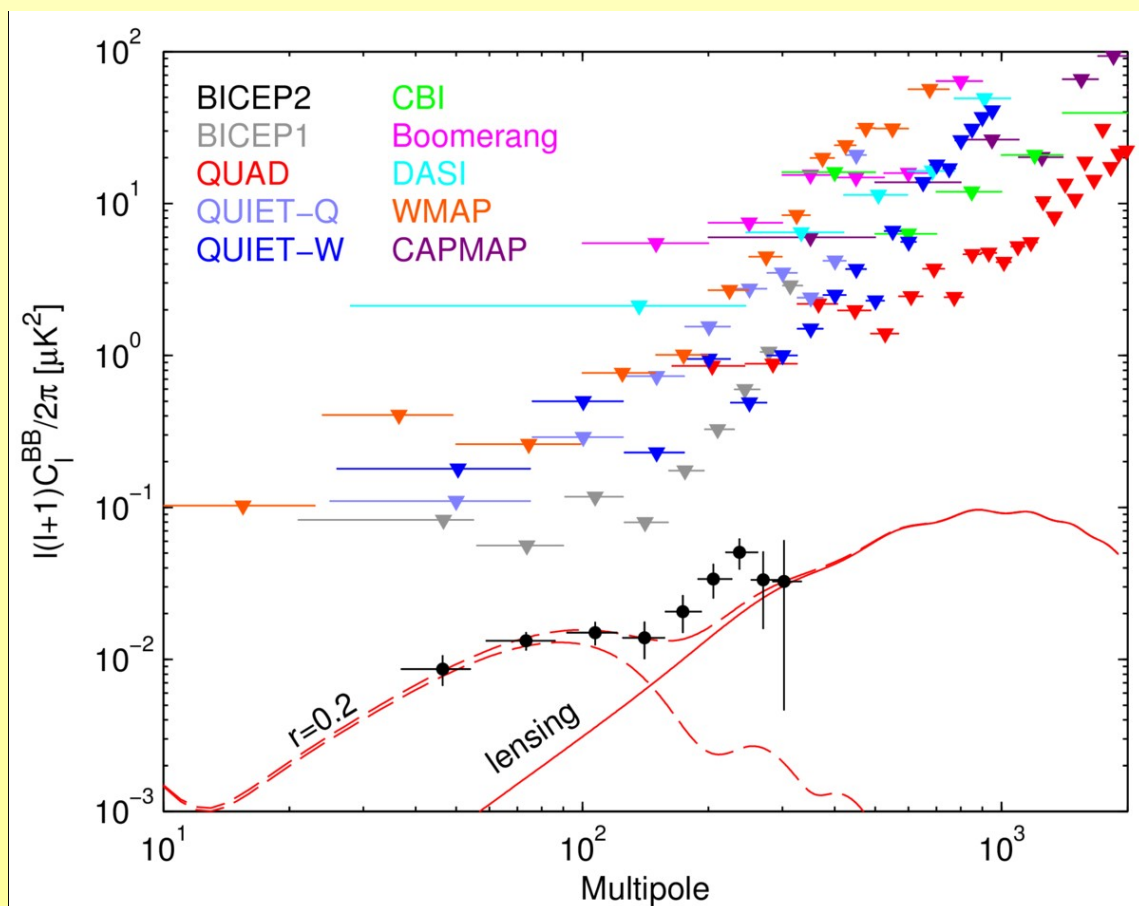
Contaminación



Modos E y B

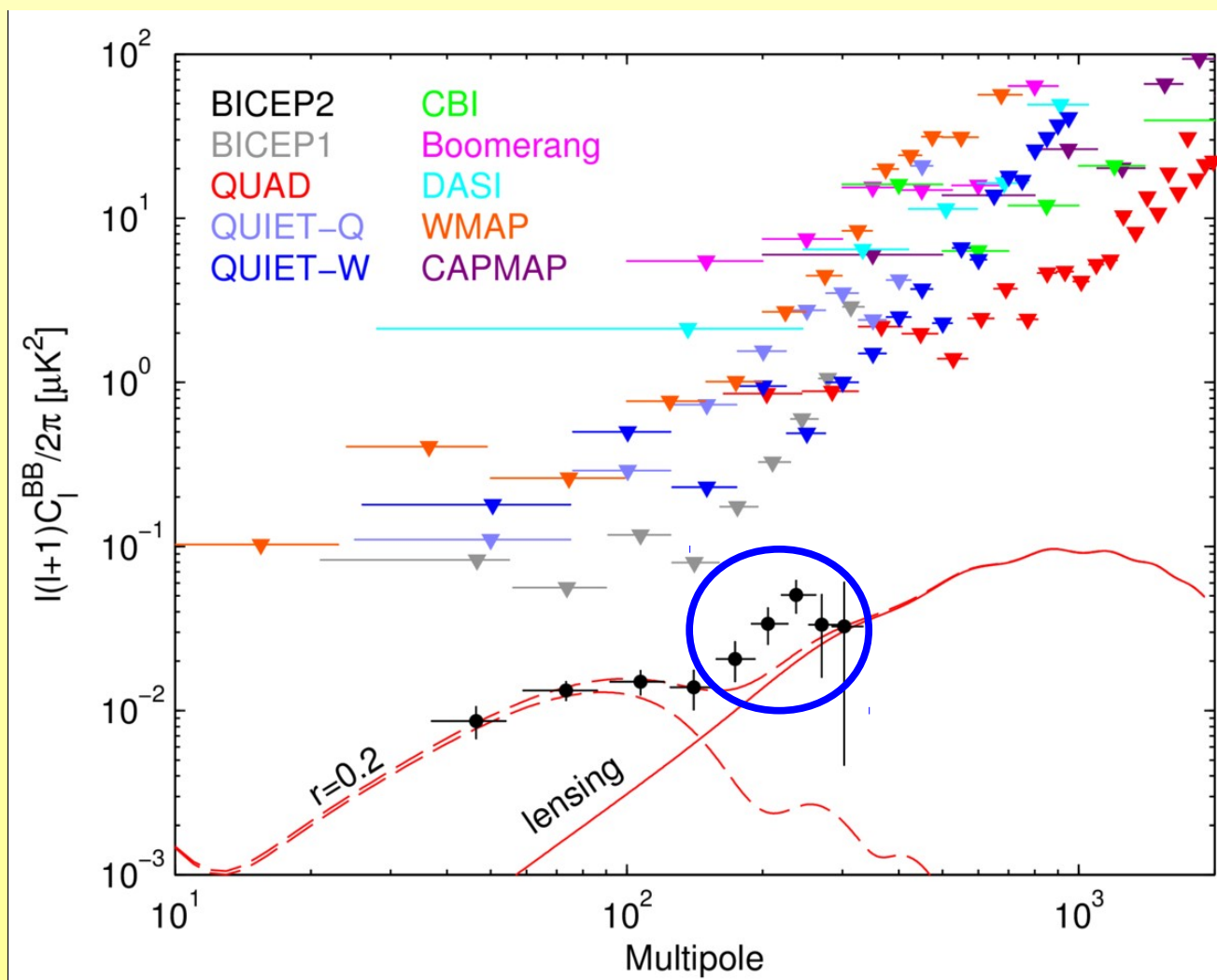
Modos B

Los nuevos datos!



Modos E y B

Los nuevos datos!



¿ Y esto qué ?

¿Qué tiene que ver todo esto con:

Inflación?

Ondas gravitacionales?

Gravedad cuántica?

¿Qué es Inflación?

Problemas del modelo de Big Bang Caliente

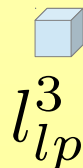
1) Monopolos magnéticos

¿Con tantas transiciones de fase por qué no hay reliquias topológicas?

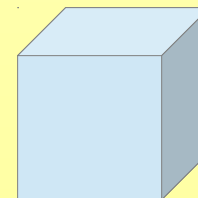
2) Problema del horizon

¿Por qué regiones desconectas del Universo tienen la misma temperatura en la radiación de fondo?

3) ¿Tamaño?



Expansión
13.7 G años



1mm^3

$\neq 20^{28}\text{m}^3$

4) ¿Universo Plano?

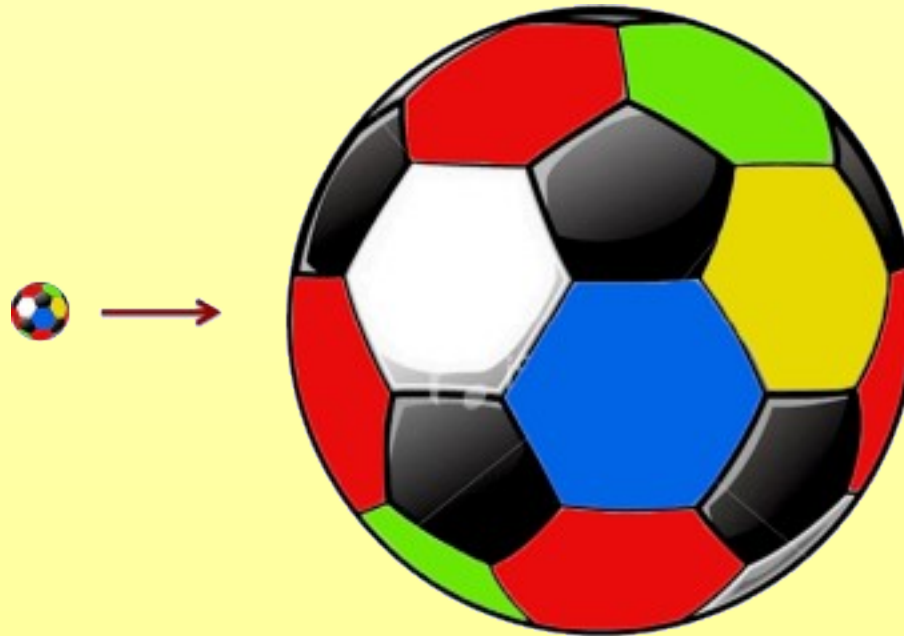
5) La singularidad inicial

¿Qué es Inflación?

Mecanismo de Inflación

Fase de expansión exponencial del Universo temprano

$t=10^{-35}$ s

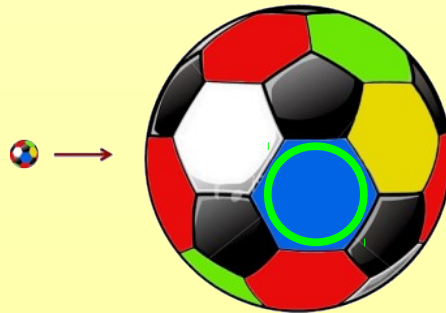


¿Qué es Inflación?

Problemas del modelo de Big Bang Caliente

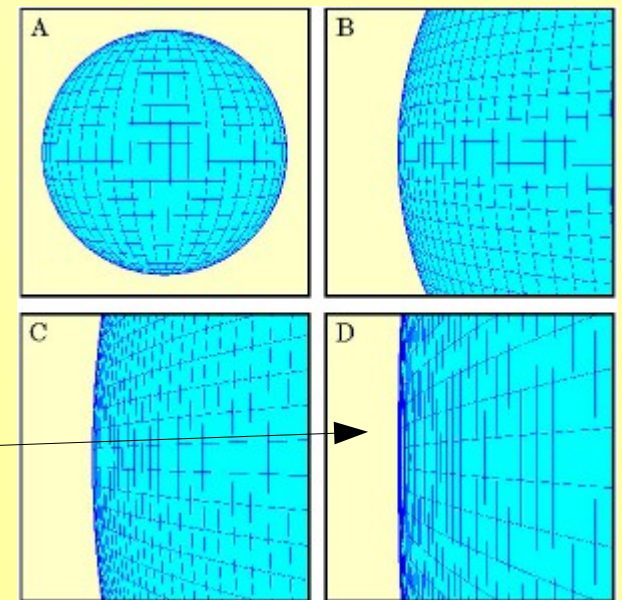
1) Monopolos magnéticos Los diluye!

2) Problema del horizon



3) ¿Tamaño? Expansión exponencial

4) ¿Universo Plano?



5) La singularidad inicial Sin resolver satisfactoriamente

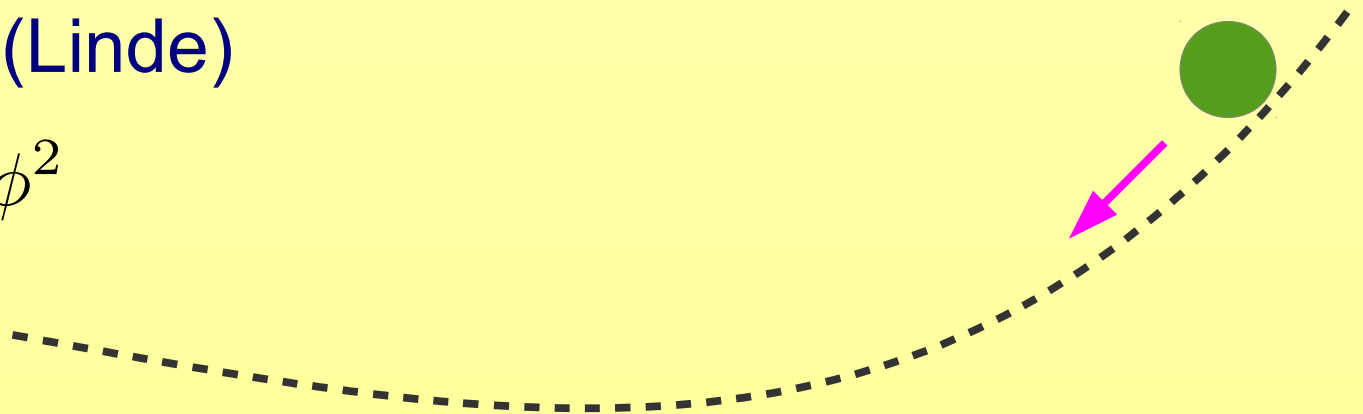
Inflación

Realización más sencilla: Campo escalar canónico rodando **lento** por un potencial

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{m_{pl}^2}{2} R - \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right)$$

Modelo sencillo (Linde)

$$V(\phi) = \frac{1}{2} m^2 \phi^2$$



Inflación

Ecuaciones de Friedmann

$$H^2 = \frac{1}{3m_{pl}^2} \left[\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right], \quad \ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -V'(\phi).$$

Si asumimos **rodamiento despacio** (energía potencial domina sobre cinética), entonces

$$H^2 \simeq \frac{V(\phi)}{3m_{pl}^2}, \quad 3H\dot{\phi} \simeq -V'(\phi)$$

Que implica la solución

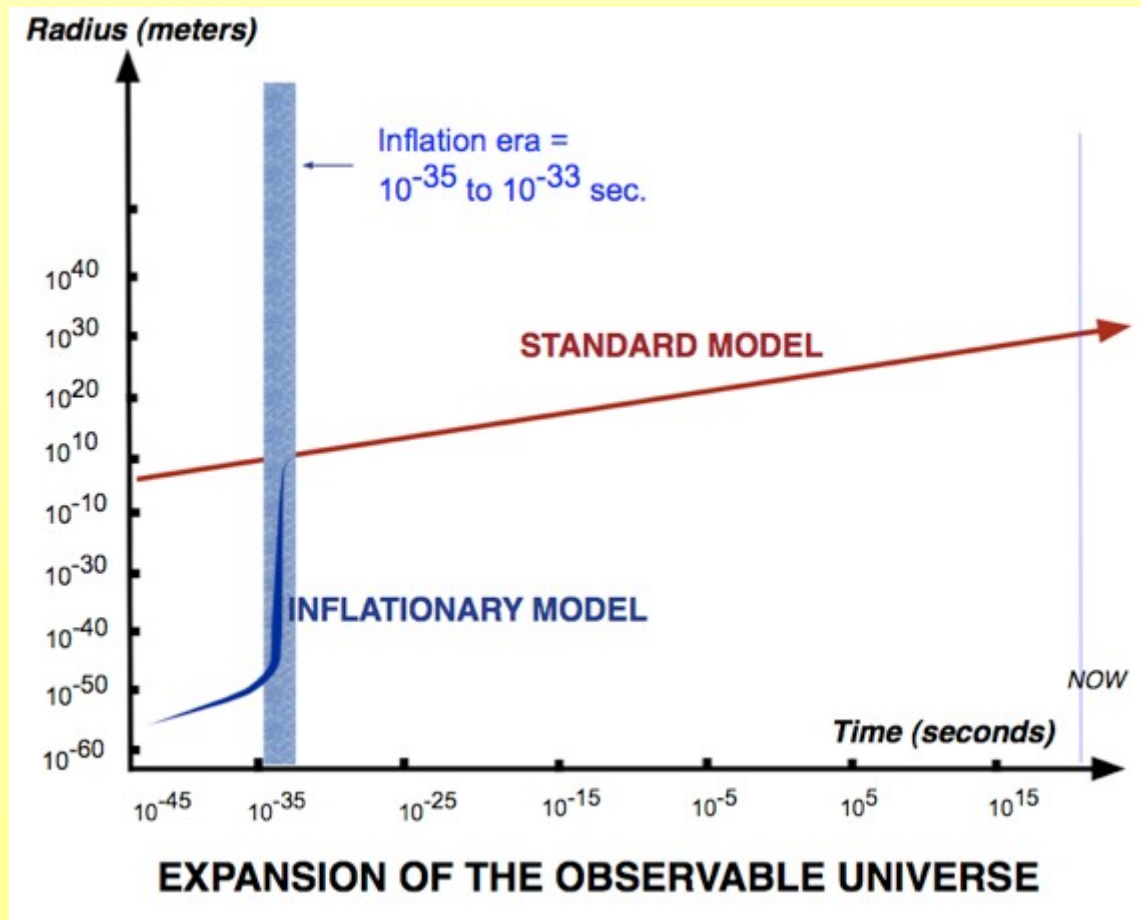
$$a(t) = a(t_0) \text{Exp} \left[\int_{t_0}^t H dt \right] \sim a(t_0) e^{Ht}$$

Inflación

Para resolver los problemas anteriores, inflación debe durar

$N = 50 - 60$ *e-foldings*

$$N(t) = \ln[a(t_{end})/a(t_{start})]$$



Inflación

Parametros de Rodamiento Lento

$$\epsilon_s \equiv m_{pl}^2 \frac{(\partial_\phi V)^2}{2V^2}, \quad \eta_s \equiv m_{pl}^2 \frac{\partial_\phi^2 V}{V}$$

Deben de ser <0.01 para que inflación ocurra.

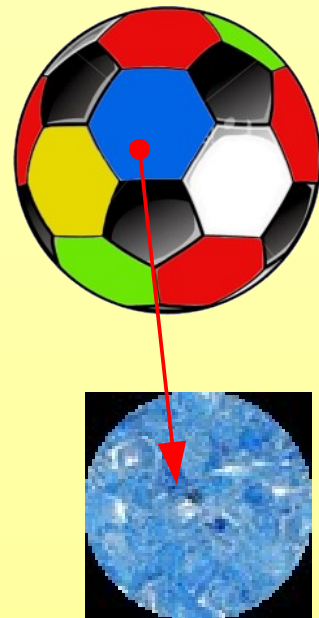
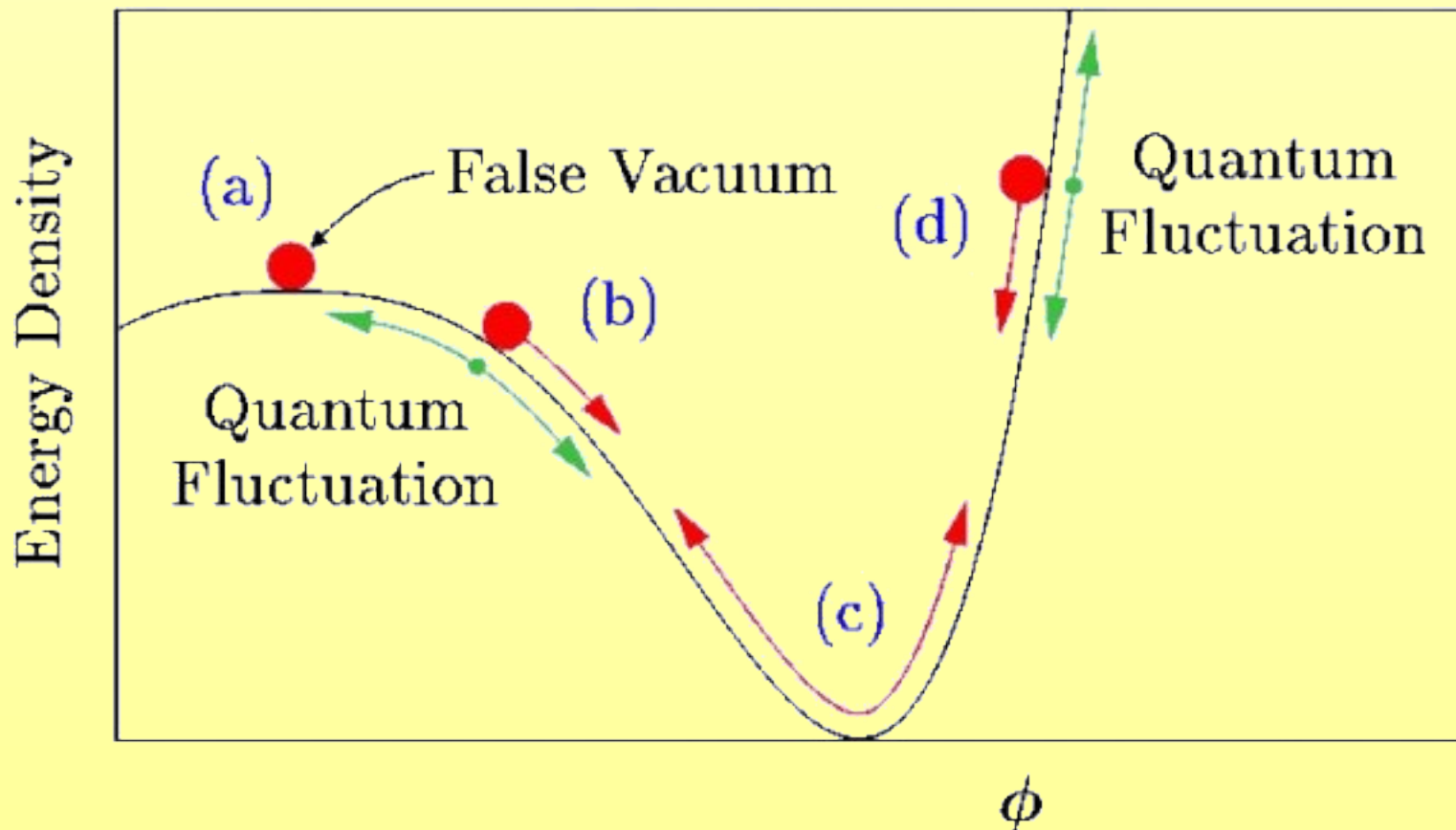
Miden cuando inflación termina.

Después, es necesario **recalentar** el Universo



Inflación

El gran bonus: las fluctuaciones cuánticas son las anisotropías de la radiación cósmica de fondo!



Inflación

Matemáticamente

Perturbaciones escalares

$$ds^2 = a^2(\tau) \left[-(1 + 2\Gamma)d\tau^2 + (1 - 2\Psi)\delta_{ij}dx^i dx^j \right]$$

$$\phi = \phi_0(\tau) + \delta\phi$$

Cambiando Variables

$$z = \frac{a\phi'_0}{\mathcal{H}}, \quad u = a \left[\delta\phi + \frac{\phi'_0}{\mathcal{H}} \Psi \right]$$

Inflación

$$u'' - \nabla_i \nabla^i u - \mathcal{H}^2 u = 0$$

Es un oscilador armónico!

Puede realizarse un tratamiento cuántico

La función de correlación de pares es

$$\langle \mathcal{R}_{\mathbf{k}} \mathcal{R}_{\mathbf{k}'} \rangle = \frac{2\pi^2}{k^3} \mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) \delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \quad \mathcal{R} = -\frac{u}{z}$$

Inflación

Uno obtiene

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = A_s \left(\frac{k}{k_*} \right)^{-1+n_s+\alpha_s \log(k/k_*)}$$

En completo acuerdo con la radiación cósmica de fondo.

Planck (2013)

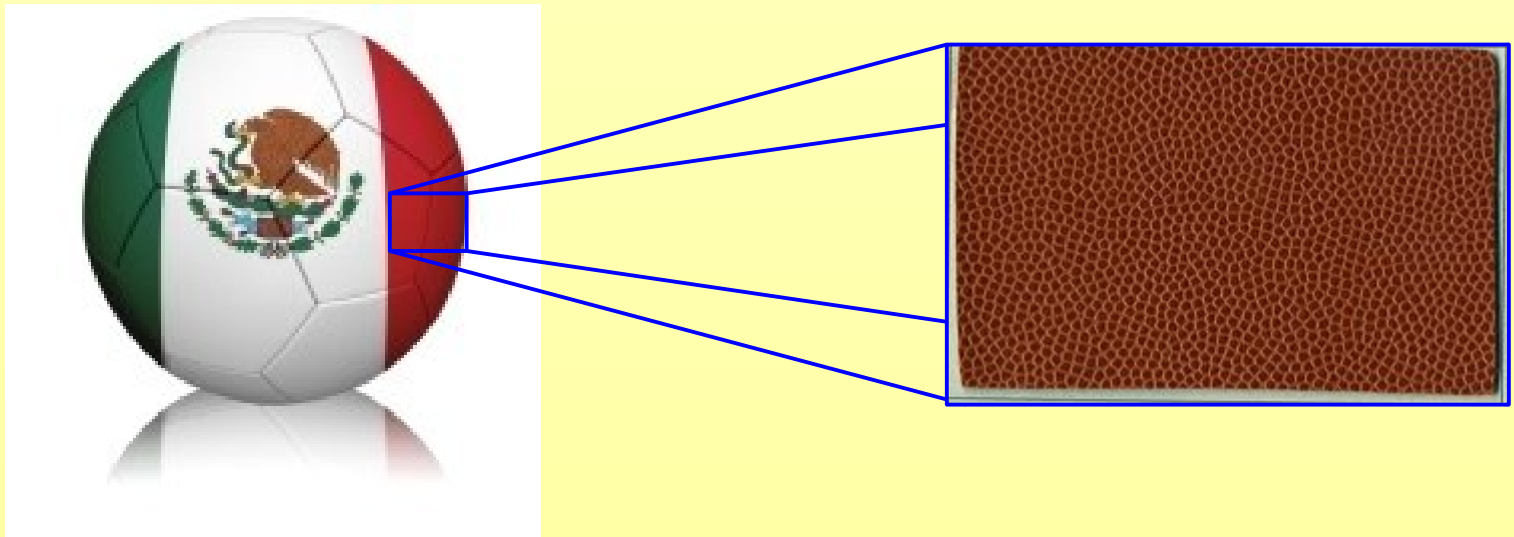
$$n_s = 0.96 \quad (\alpha_s \sim 0.01)$$

$$A_s = 2.4 \times 10^{-9}$$

Los modos escalares sólo producen polarización en el modo E (Zaldarriaga y Seljak, 1997)

Inflación

Perturbaciones tensoriales = ondas gravitacionales



Inflación

Perturbaciones tensoriales = ondas gravitacionales

También obtenemos un oscilador armónico para los tensores, y su espectro de potencias está dado por

$$\mathcal{P}_T(k) = A_T \left(\frac{k}{k_*} \right)^{n_T}$$

Y podemos definir

$$r = \frac{A_s}{A_T}$$

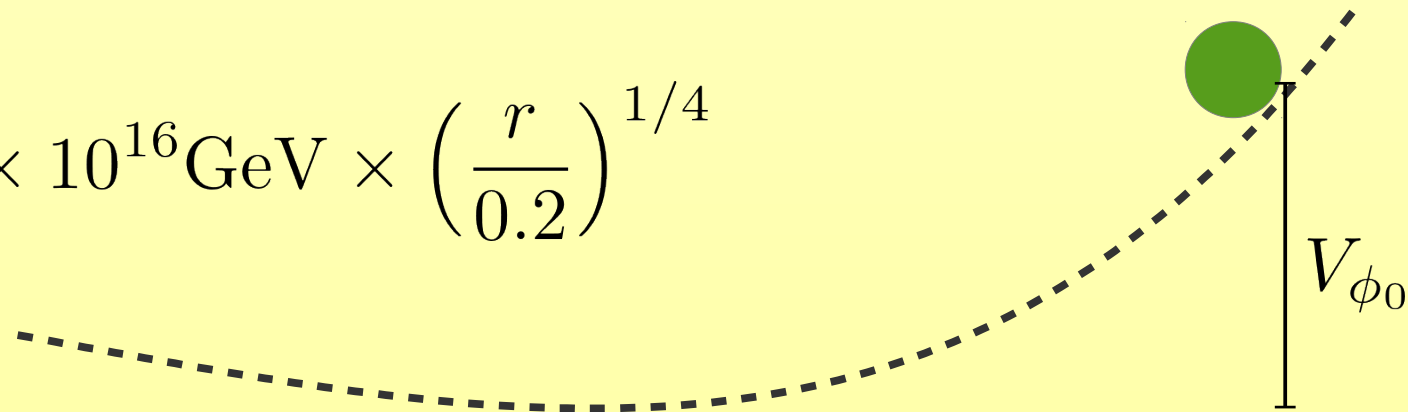
Los modos tensoriales producen polarización tanto de modos E como B (Zaldarriaga y Seljak, 1997)

Inflación

Perturbaciones tensoriales = ondas gravitacionales

Otra manera de escribirlo es

$$V_{\phi_0}^{1/4} = 2.2 \times 10^{16} \text{GeV} \times \left(\frac{r}{0.2} \right)^{1/4}$$



$r=0.2$ corresponde a la escala de GUT, o bien, casi a la escala de Planck (gravedad cuántica?).

12 órdenes de magnitud más que en el LHC!!

Inflación

Perturbaciones tensoriales = ondas gravitacionales

Genericamente, se encuentra la desigualdad (Lyth)

$$\frac{\Delta\phi}{M_{pl}} \geq 1.5 \left(\frac{r}{0.2} \right)^{1/2}$$

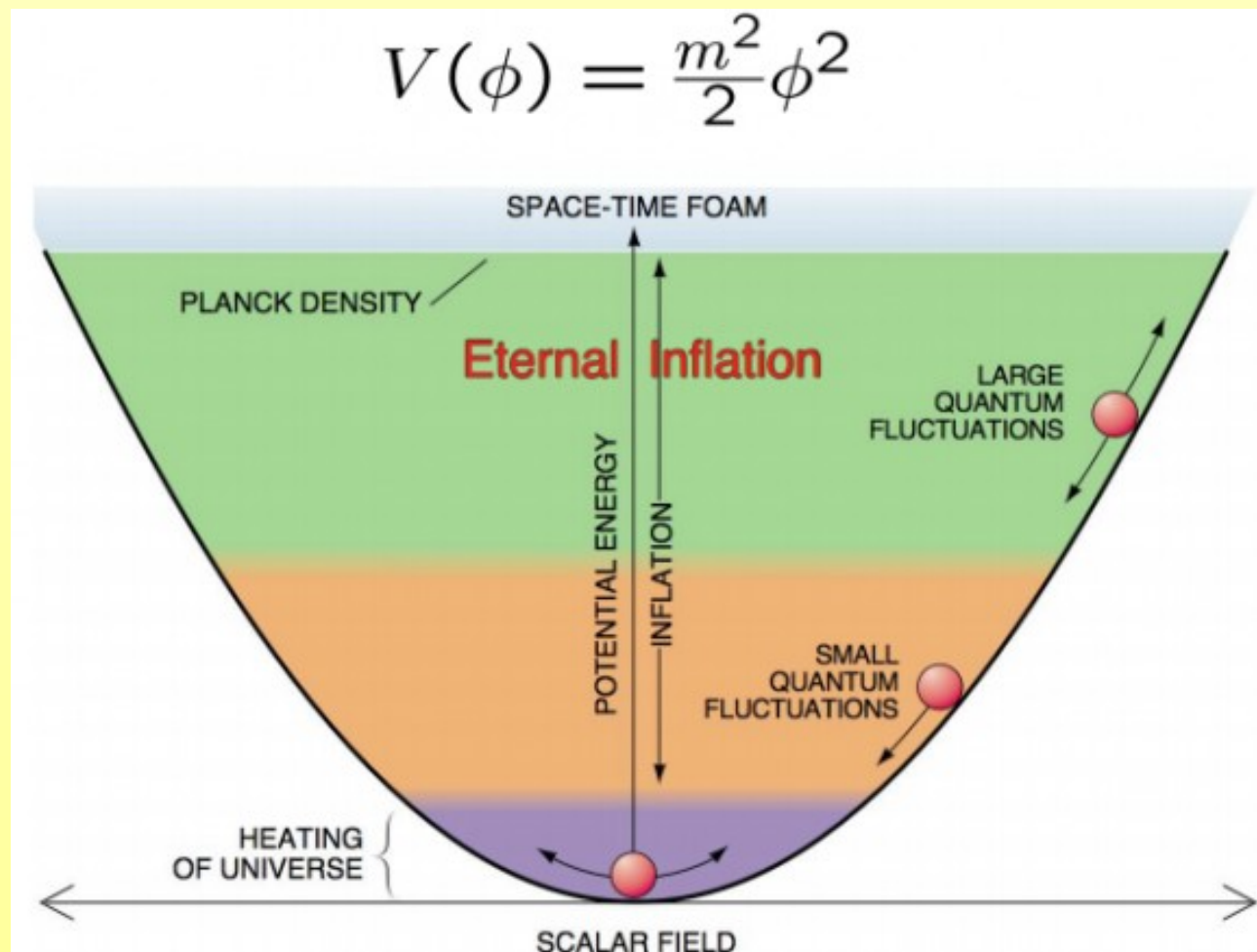
Si $r \sim 0.2$ el campo se desplaza más de una unidad en masas de Planck (**modelos de campo grande**)

Teoría de perturbaciones deja de ser válida

Se necesita entender gravedad cuántica!

Inflación

Perturbaciones tensoriales = ondas gravitacionales



Inflación

Antes de BICEP, Planck puso en duda inflación

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = A_s \left(\frac{k}{k_*} \right)^{-1+n_s+\alpha_s \log(k/k_*)}$$

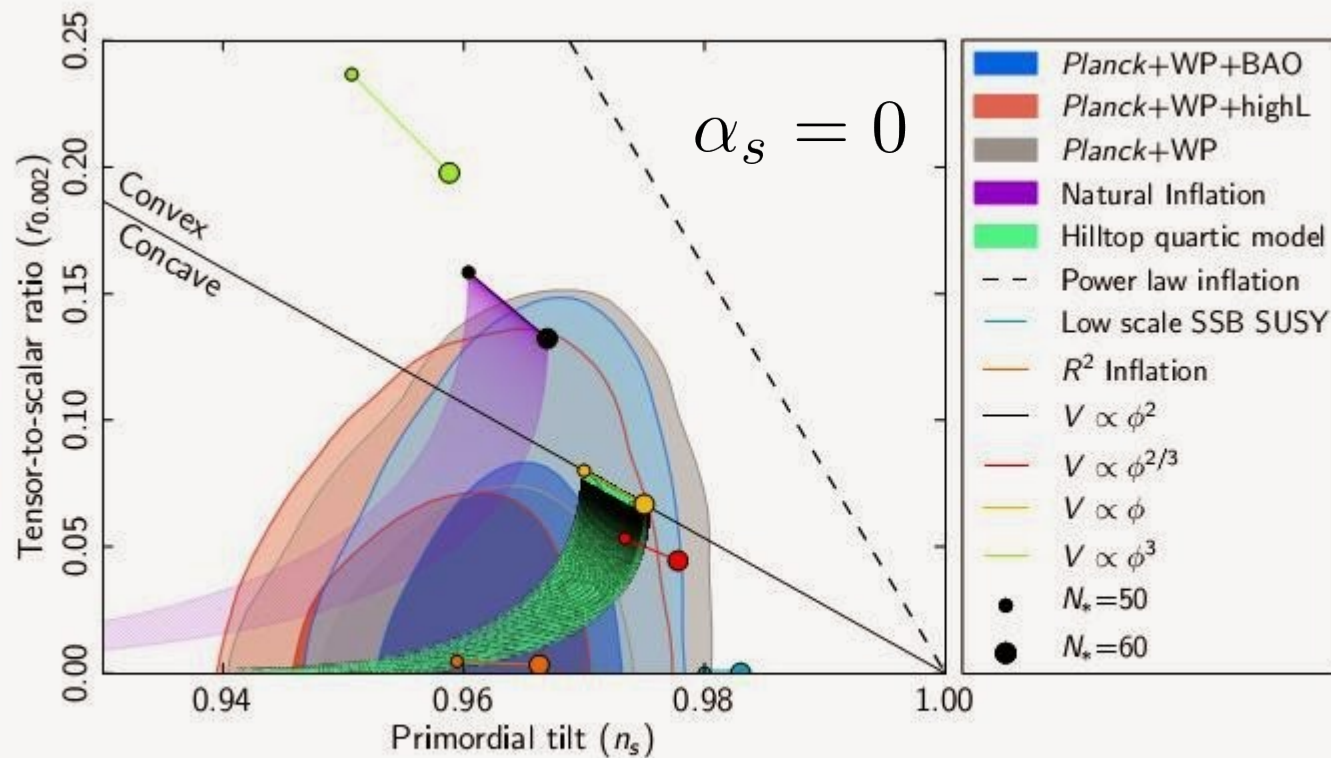


Fig. 1. Marginalized joint 68% and 95% CL regions for n_s and $r_{0.002}$ from *Planck* in combination with other data sets compared to the theoretical predictions of selected inflationary models.

Inflación

*Ahora BICEP está
en conflicto con Planck*

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = A_s \left(\frac{k}{k_*} \right)^{-1+n_s+\alpha_s \log(k/k_*)}$$

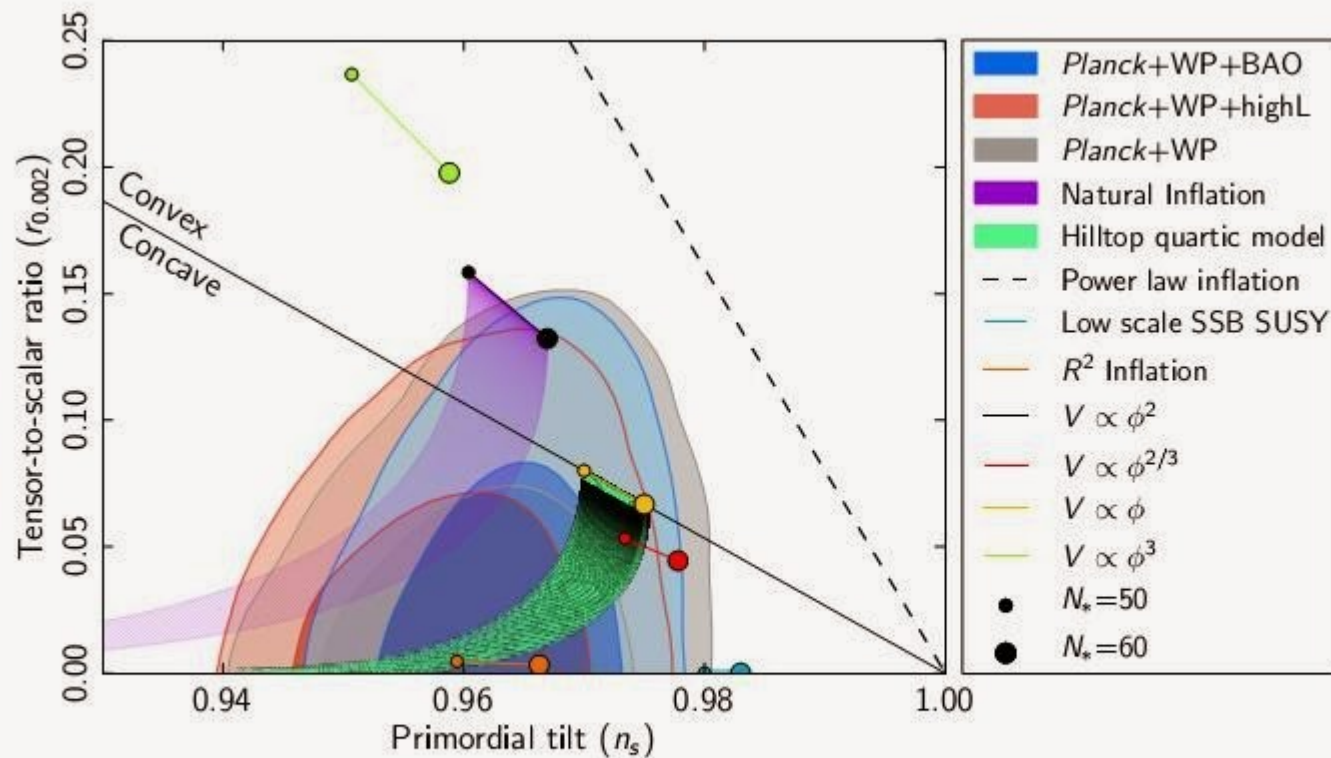
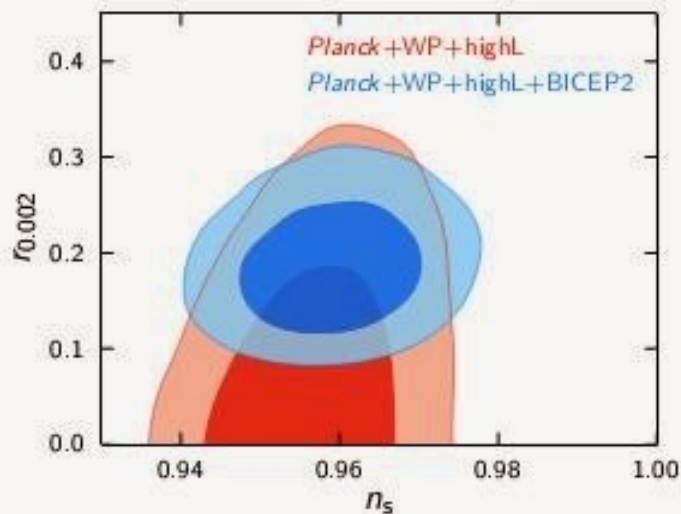


Fig. 1. Marginalized joint 68% and 95% CL regions for n_s and $r_{0.002}$ from *Planck* in combination with other data sets compared to the theoretical predictions of selected inflationary models.

A menos que el
índice espectral
corra (ie $\alpha_s \neq 0$)

Inflación

Introduce nuevos / tiene problemas

No explica la amplitud de las perturbaciones

¿Qué es el inflatón?

¿Por qué empieza arriba en el potencial?

¿Condiciones iniciales
(singularidad)?

¿Multiversos?



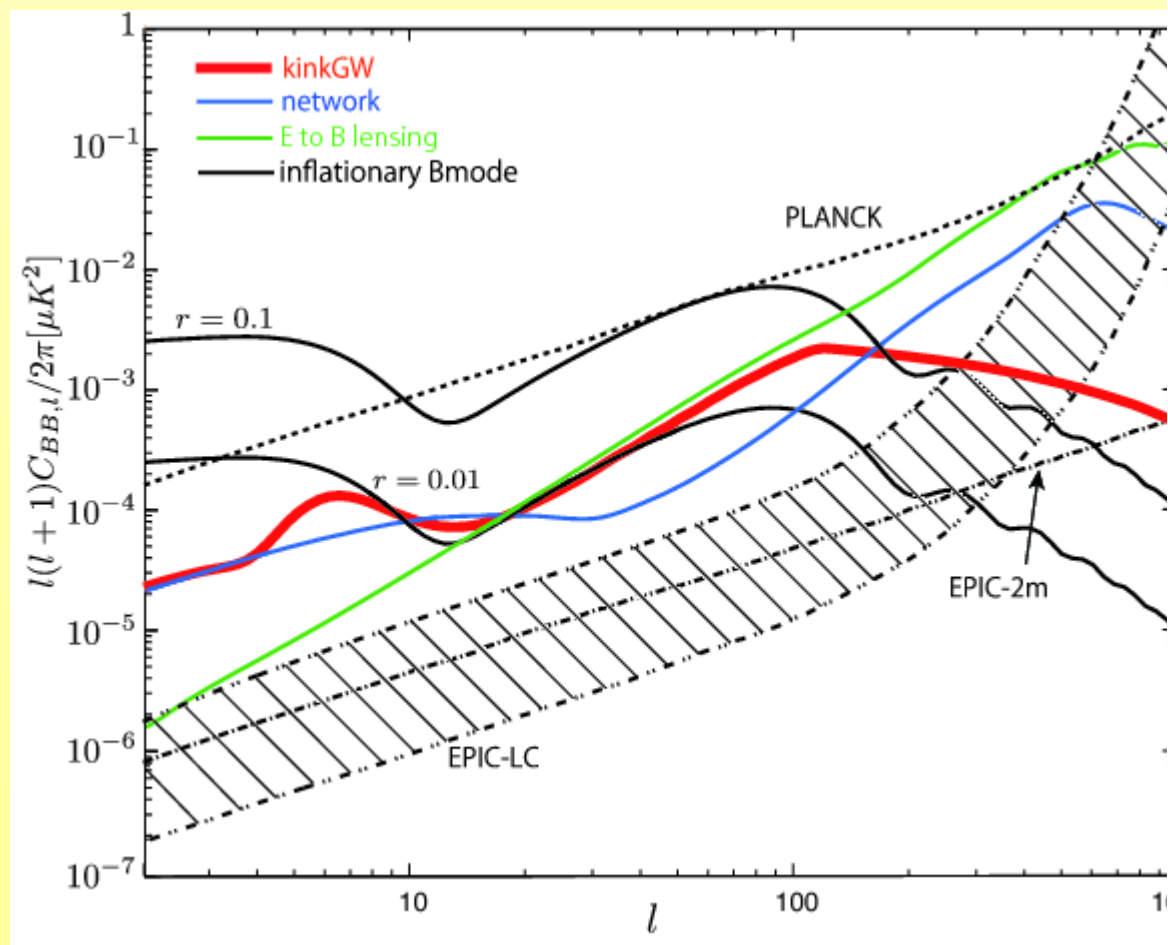
Otros problemas con BICEP

¿Es real la señal?

¿Es realmente producida por inflación?

(c.f. Cuerdas cósmicas)

arXiv:1003.3701



■ ■ ■ ■

Si todo es verdad, entonces seguro el siguiente
premio Nobel en el área será para A. Guth y A. Linde
(aunque hay debate sobre otros!)



GRACIAS