

# **Introducción a Física de Partículas y Teoría de Cuerdas**

Gravedad y Mecánica Cuántica (1)

Angel M. Uranga

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid  
[angel.uranga@uam.es](mailto:angel.uranga@uam.es)

# Gravedad y Mecánica Cuántica

## Plan

### Parte 1:

(código de colores)

- Relatividad General
- Cosmología

} bien establecido

### Parte 2:

- El gravitón
- Agujeros negros
- ¿y el Big Bang?

} más especulativo

¿ALGUIEN ME RECIBE?



SANDRA  
BULLOCK

GEORGE  
CLOONEY

DEL DIRECTOR ALFONSO CUARÓN

GRAVITY

# Relatividad General y Gravitación

La gravedad es muy débil, pero acumulativa



No se detecta a nivel de partículas elementales, no se incluye en el Modelo Estándar de partículas

Pero es una fuerza que conocemos bien a nivel **clásico** (no **cuántico**) gracias a Newton y Einstein



# Cosmología antes del s. XX

- Antes s. XX: - Gravitación Newtoniana  
- Universo infinito en el espacio y eterno en el tiempo

Sin embargo, esto último es incompatible con un hecho familiar:  
**¡La noche es oscura!**

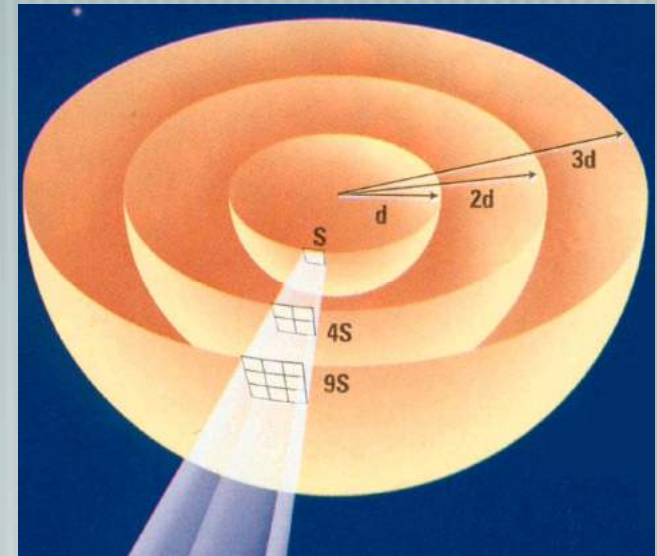
## La paradoja de Olbers (1823)

Supongamos el Universo infinito, eterno, y uniformemente poblado de estrellas. Entonces se obtiene un cielo infinitamente iluminado.

### Demostración:

- Divídase el espacio en un número infinito de "capas de cebolla"
- Una estrella en la capa a distancia  $r$  tiene luminosidad  $\sim 1/r^2$ , pero el número de estrellas crece como  $\sim r^2$
- Cada una de las infinitas capas contribuye con la misma cantidad

**Resolución: Universo finito en el tiempo**

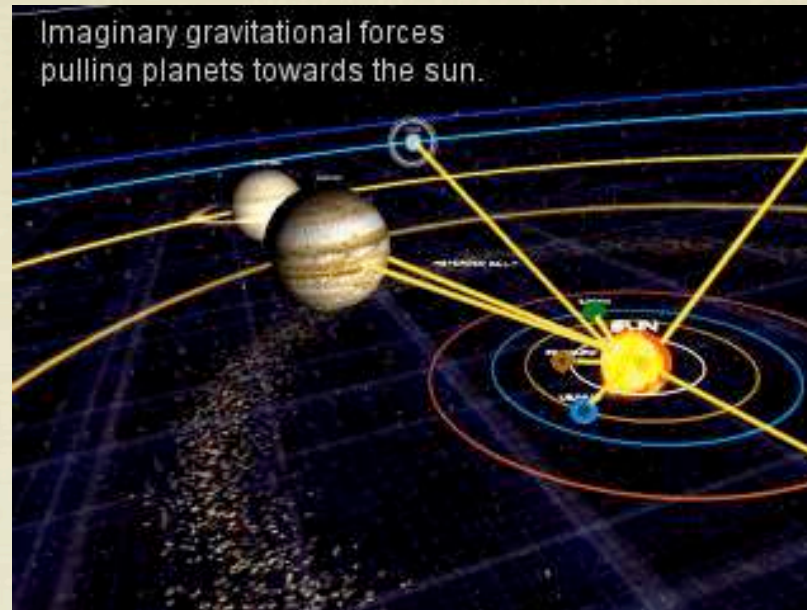


**Requirió cambio radical en la concepción del espacio-tiempo y la gravedad**

**Teoría de la Relatividad General**

# Relatividad General y Gravitación

La gravitación Newtoniana es una acción instantánea a distancia



Pero la Relatividad prohíbe que nada se propague más rápidamente que la velocidad de la luz

La gravedad de Newton es incompatible con la teoría de la relatividad

# Relatividad General y Gravitación

1907

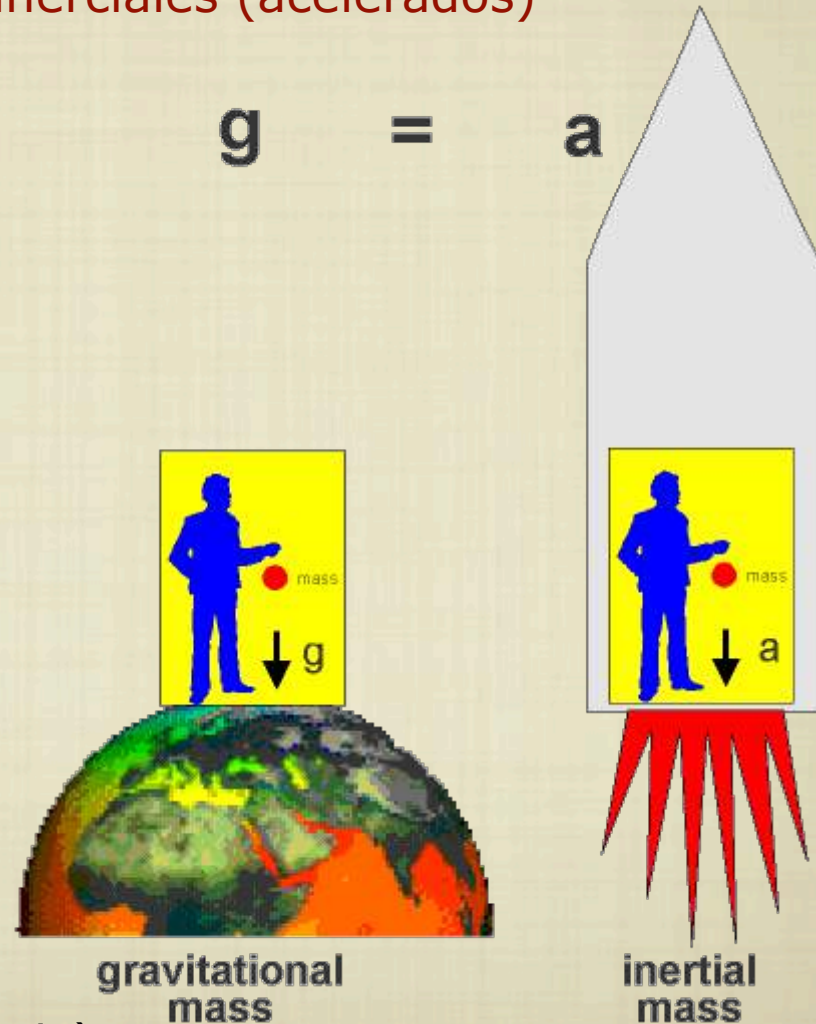


**Relatividad General**(Einstein): leyes físicas para observadores en sistemas de referencia no inerciales (acelerados)

⇒ **Principio de equivalencia**

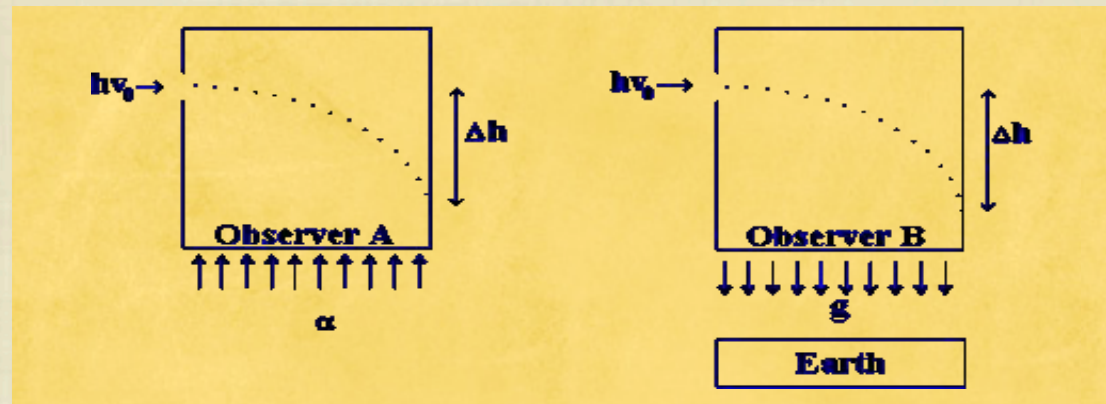
Una aceleración es indistinguible de un campo gravitacional (equivalencia de masa inercial y masa gravitatoria)

$$g = a$$



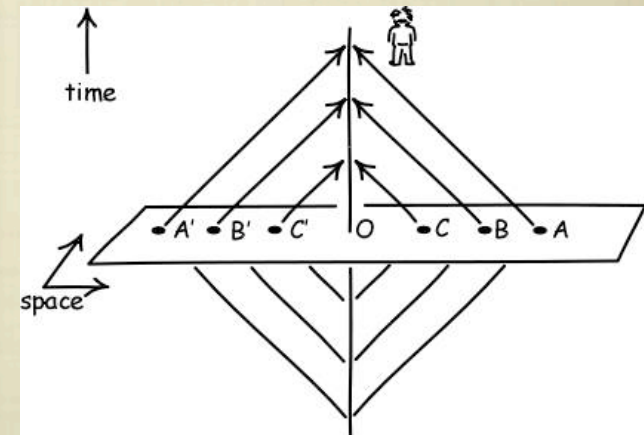
"El pensamiento más feliz de mi vida"  
"The happiest thought of my life" (A. Einstein)

⇒ Las trayectorias de la luz se curvan en campos gravitatorios



Recordemos que en Relatividad, los rayos de luz son un ingrediente crucial en la definición operativa del espacio-tiempo

**¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!**



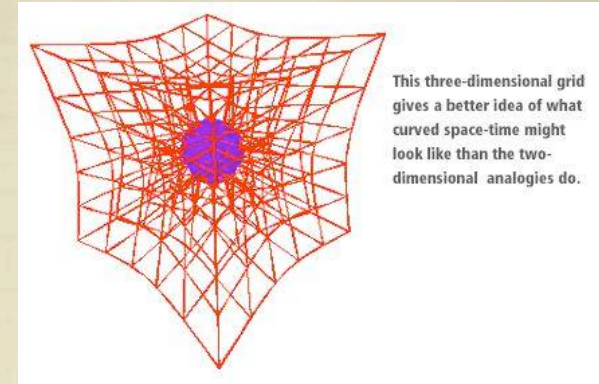


## Relatividad General y Gravitación

Los rayos de luz definen el camino más corto en el espacio

- Ascensor acelerado: la luz sigue trayectorias parabólicas
- Campo gravitatorio: los rayos de luz deben curvarse!

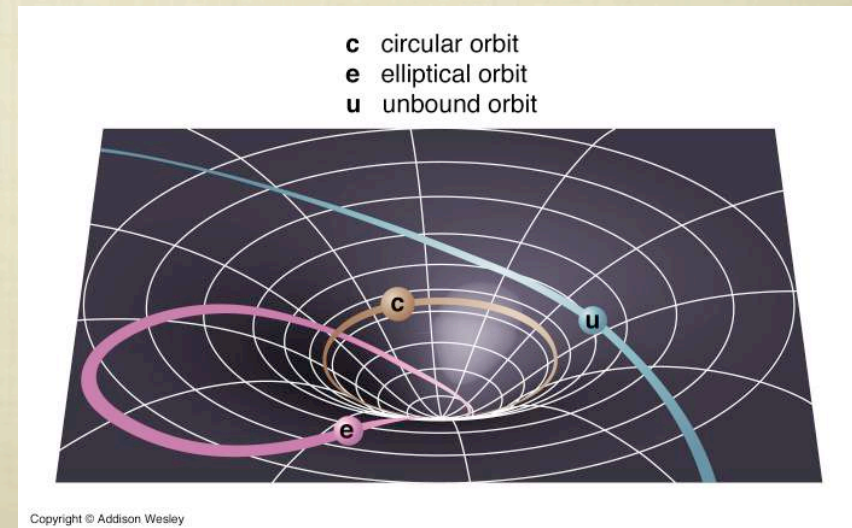
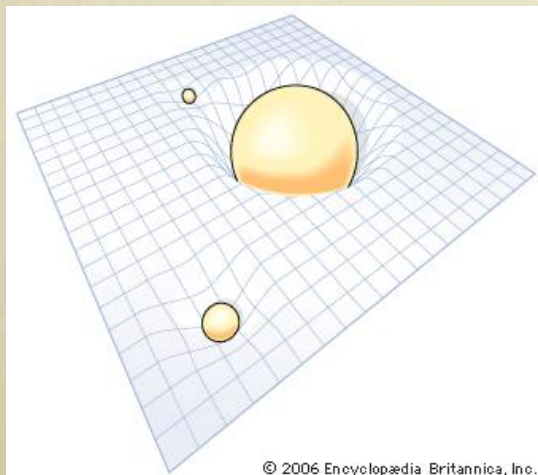
**¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!**



## Ecuaciones de Einstein:

- La Materia dicta al Espacio cómo curvarse

- El Espacio dicta a la Materia cómo moverse



# Relatividad General y Gravitación

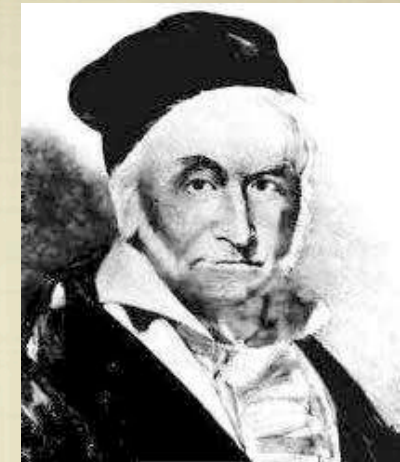
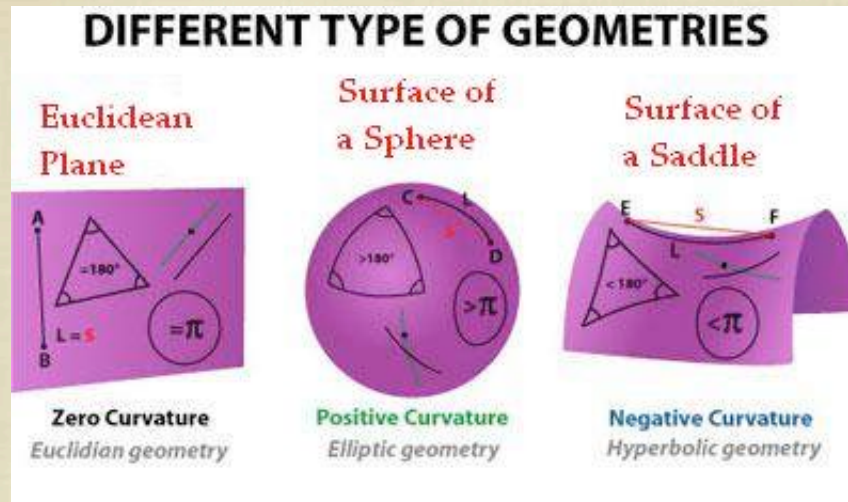


**i Nos lanzamos al estudio  
de espacios curvos !**

# Gravedad y Mecánica Cuántica

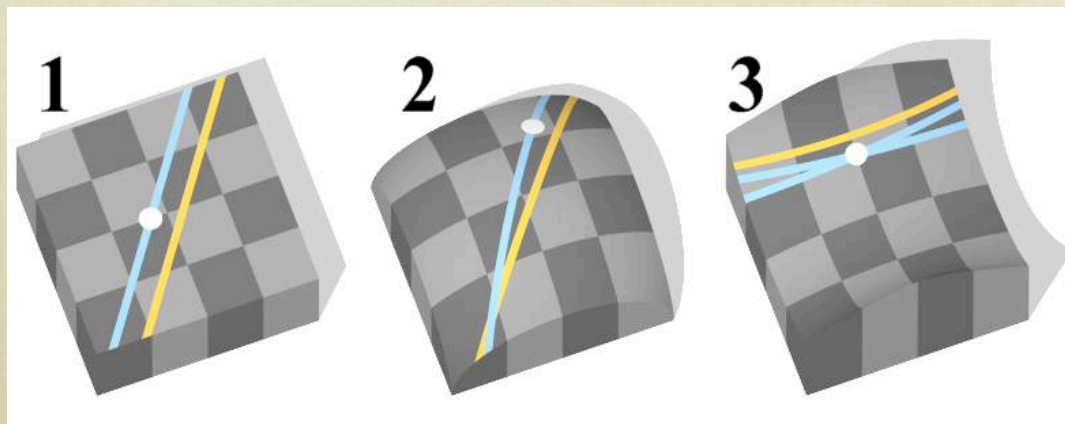
## Geometrías curvas

Plana, curvatura positiva o curvatura negativa



Carl Friedrich Gauss  
s.XIX

Suma de los ángulos de un triángulo igual que, o mayor o menor a 180 grados

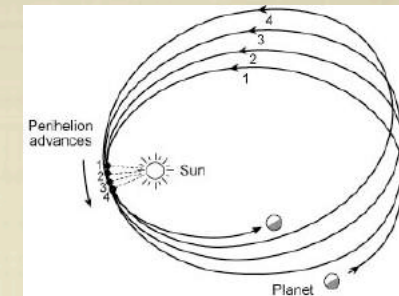
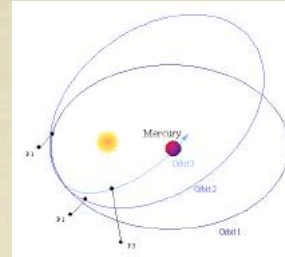


Líneas paralelas permanecen paralelas, o convergen, o divergen

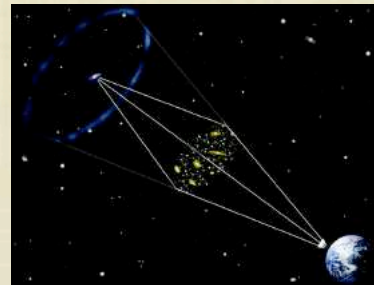
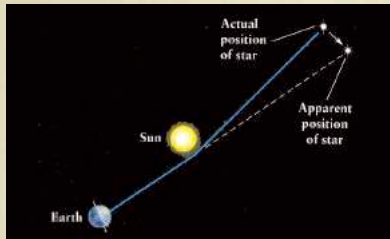
# Relatividad General y Gravitación

## Tests clásicos

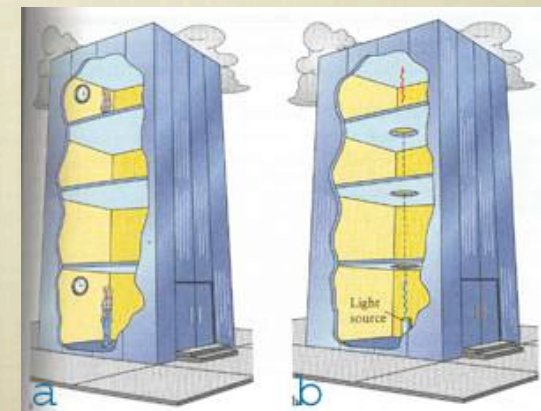
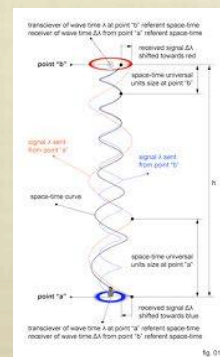
- Precesión anómala del perihelio de Mercurio



- Lentes gravitacionales: Eddington 1919, telescopio Hubble



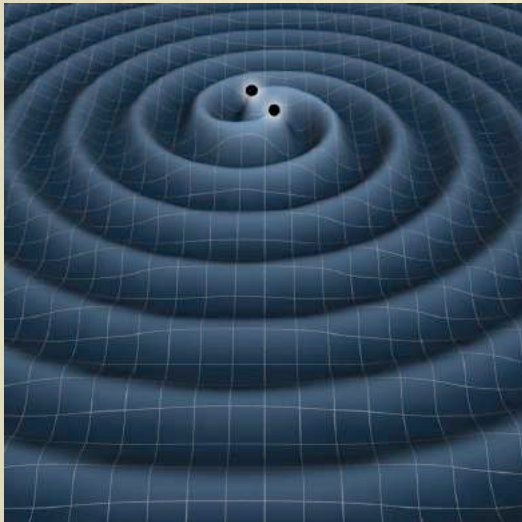
- Corrimiento al rojo en campos gravitatorios  
Pound-Rebka 1959



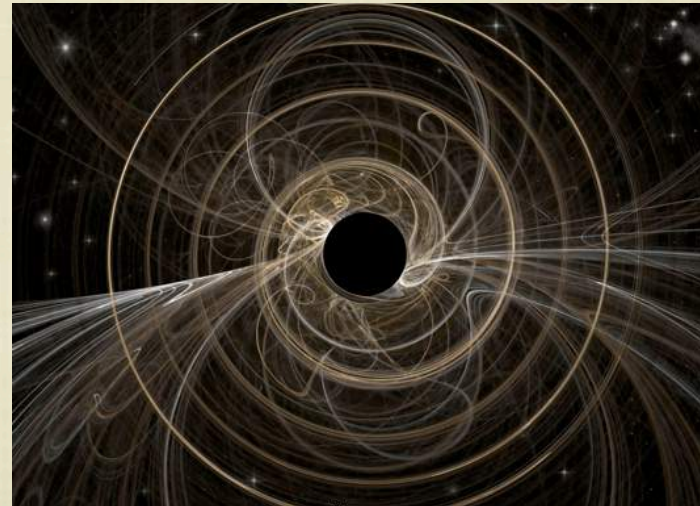
# Relatividad General y Gravitación

Dos fenómenos espectaculares, que jugarán un papel importante en la siguiente charla:

## Ondas gravitacionales



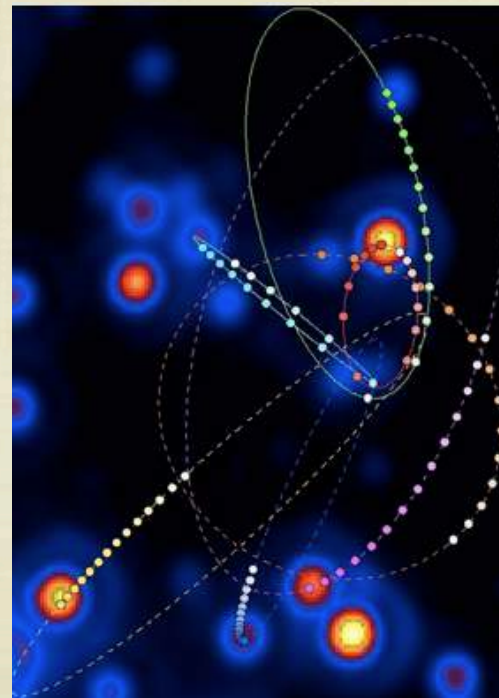
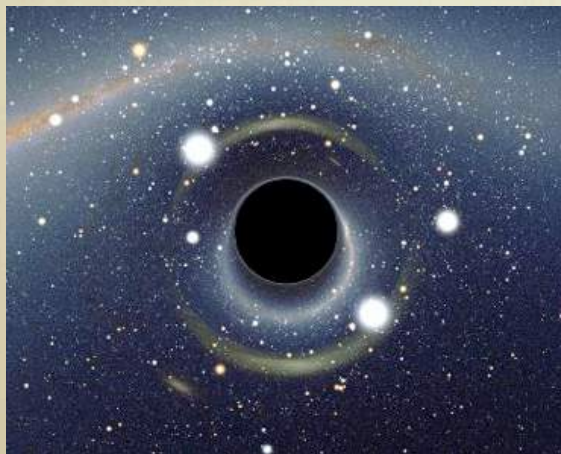
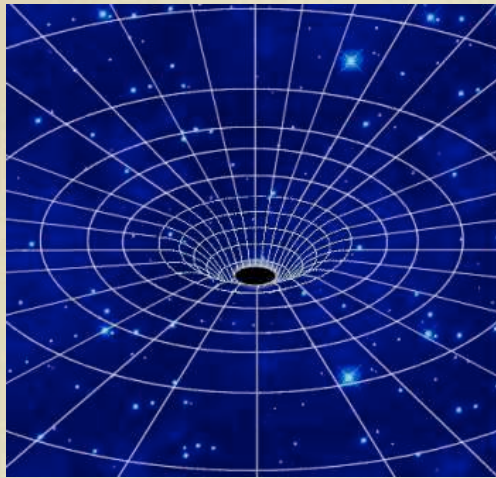
## Agujeros negros



## Agujeros negros

K. Schwarzschild

Campo gravitatorio tan intenso  
que ni la luz puede escapar

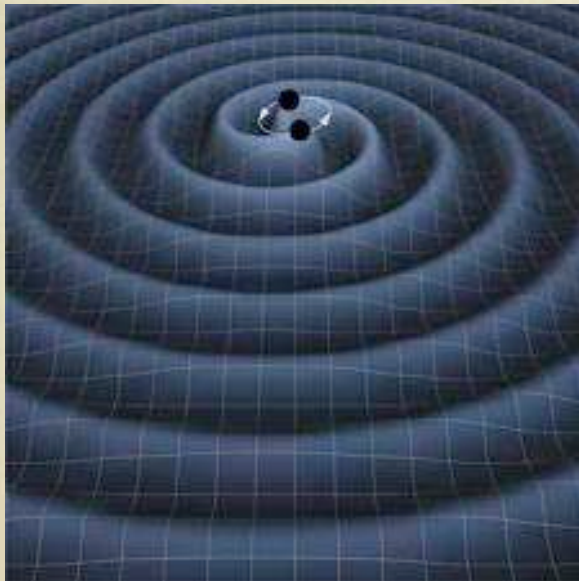


$$c^2 d\tau^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

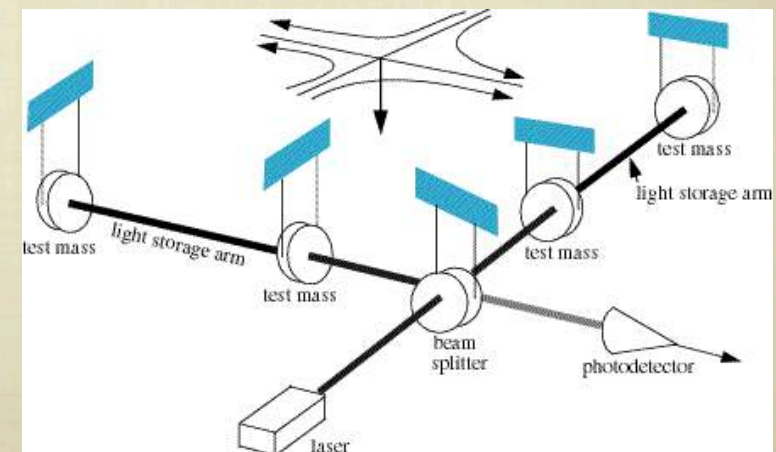
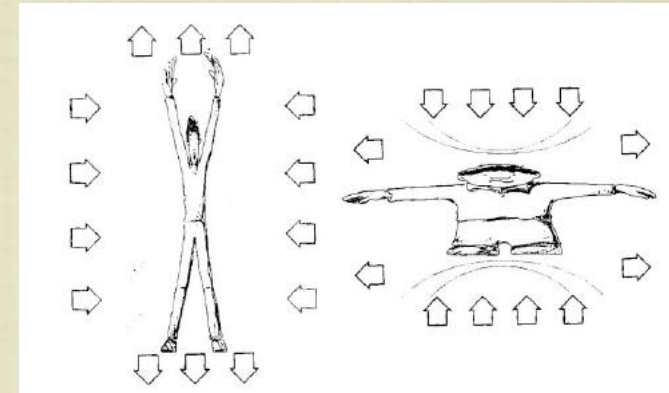
## Ondas gravitacionales

Distorsiones del espacio-tiempo que se propagan como ondas análogas a las electromagnéticas

Se busca su detección directa con interferómetros (LIGO, LISA)



Medidas indirectamente como pérdida de energía en púlsares binarios



# Gravitación y Cosmología

1922

**Pero antes... la más fascinante:  
Aplicación a Universo dinámico y en evolución**

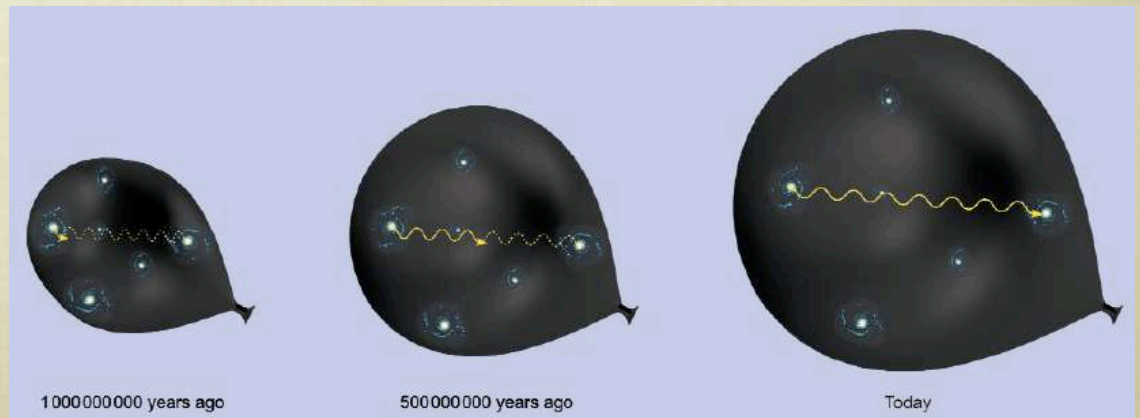
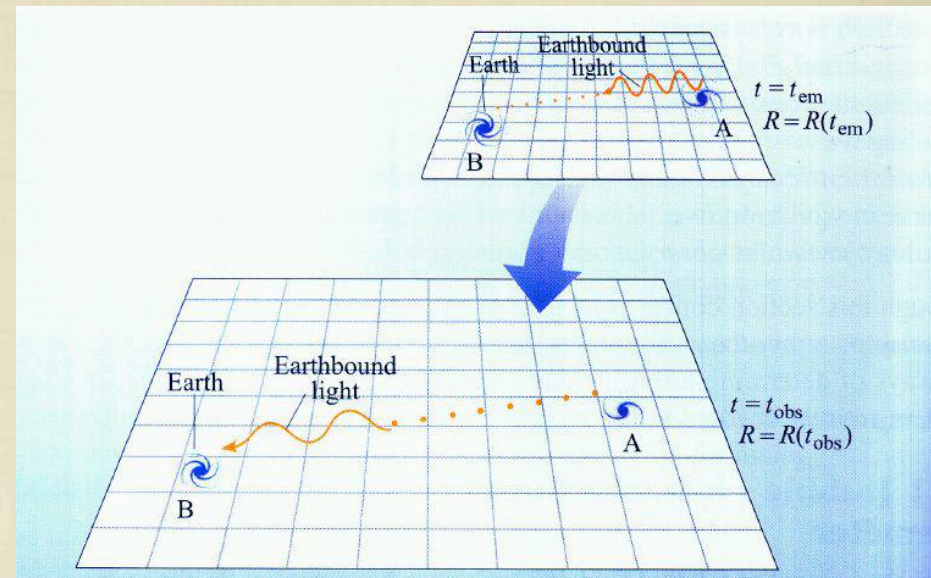
A. Friedmann (1922),  
G. Lemaitre (1927)

Universo aproximadamente homogéneo.  
Su evolución se describe mediante  
el **factor de escala  $a(t)$**

$$r_{AB}(t) = a(t) x_{AB}$$

Ritmo de expansión determinado por  
la densidad promedio " $\rho$ "  
y el factor de curvatura espacial " $K$ "

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2}$$





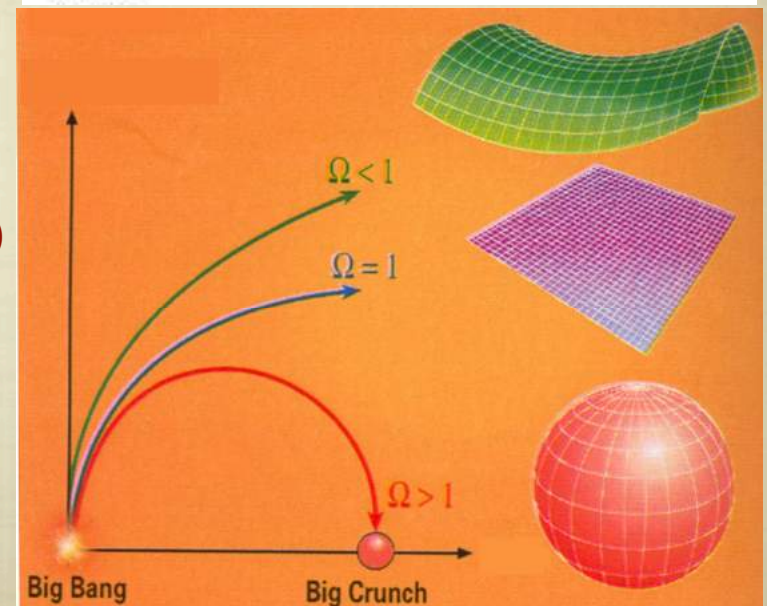
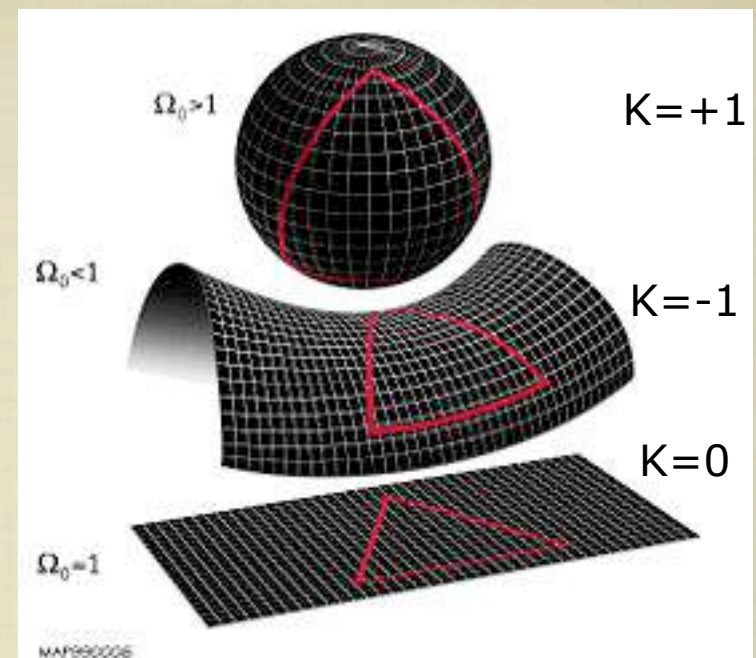
## Densidad crítica

La densidad  $\rho$  determina la geometría del Universo  
La densidad crítica corresponde al valor en el que  
la geometría del espacio es plana

## Densidad crítica y evolución del Universo

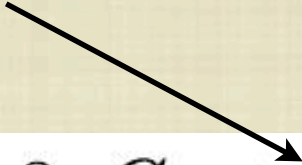
- \* En ausencia de energía oscura:
  - Densidad sub-crítica:  
Universo cerrado que colapsa
  - Densidad super-crítica:  
Universo abierto en eterna expansión (decelerada)
  - Densidad crítica:  
Universo plano en eterna expansión

(\* Advertencia: esta conclusión se modifica  
en presencia de energía oscura)



## Constante cosmológica

Modificación de Relatividad General, introducida por el propio Einstein


$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho + \Lambda}{3} - \frac{Kc^2}{a^2}$$

### Interpretación:

- Densidad de energía del vacío
- Constante en el espacio y el tiempo
- Genera una repulsión que se opone a la atracción gravitacional

(hoy sabemos que la constante cosmológica podría explicar la energía oscura, ver más adelante)

**La determinación del modelo teórico correcto para la estructura del Universo es una cuestión observacional**

## ★ ★ Expansión cosmológica

Hubble observó que la velocidad de las galaxias aumenta linealmente con la distancia



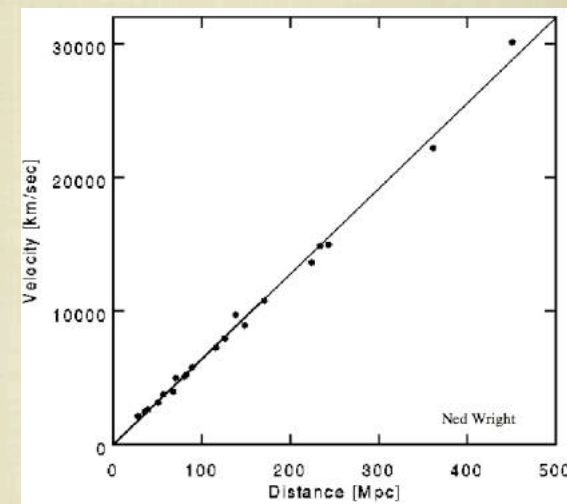
E, Hubble en el telescopio de Mt. Palomar

Explicable en el modelo de expansión de Friedmann

El Universo es como un globo que se infla, de modo que la velocidad de separación entre dos puntos cualesquiera aumenta con la distancia entre ellos



Corrimiento Doppler al rojo en el espectro de galaxias lejanas



La velocidad de recesión de las galaxias aumenta con la distancia

**¡El Universo está en expansión!**

## Modelo del Big Bang:

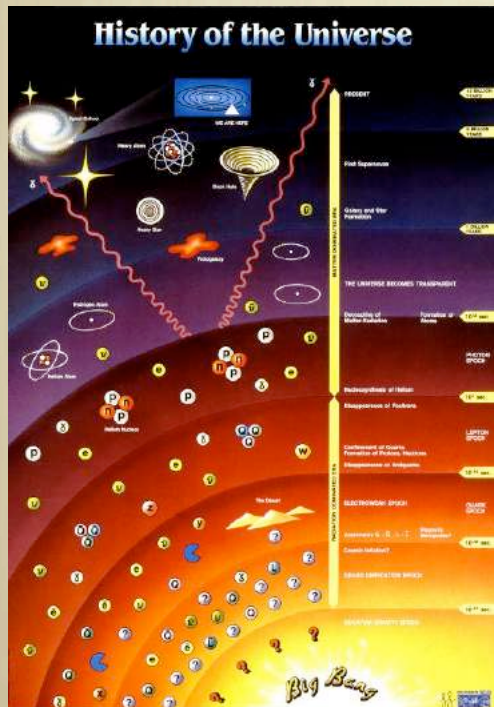


G. Gamov

- El Universo comenzó comprimido y a altísima temperatura hace unos 13.000.000.000 de años ("huevo primigenio", Lemaitre 1930)
- A partir de ese estado, empezó a expandirse y enfriarse

## Historia

- Época de la radiación (fotones).
- Época de la materia:  
Aparecen las partículas (protones, neutrones, electrones, más adelante núcleos, átomos,
- Formación de estructura (estrellas, galaxias, cúmulos)
- Época acelerada:  
La energía oscura empieza a dominar



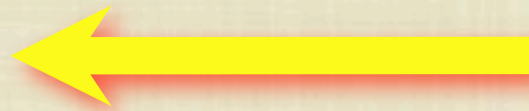
**¡Fascinante nueva visión del Universo!**

# Cosmología

## Física de Partículas y Cosmología

La Física de Partículas empuja las fronteras del conocimiento hacia etapas más y más tempranas en la evolución del Universo

Y la Cosmología sirve de banco de pruebas para la Física de Partículas



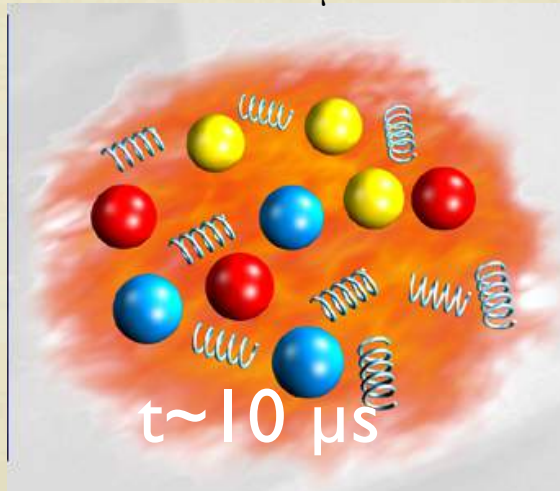
$t=0$



$t=0$

Big Bang

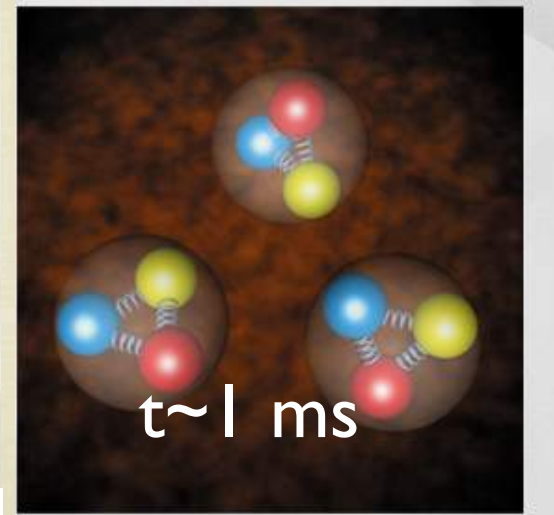
$t \approx 10 \mu\text{s}$



$t \sim 10 \mu\text{s}$

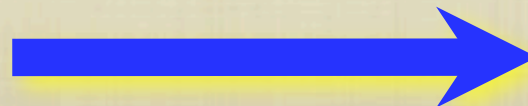
Plasma de partículas

$t \approx 1 \text{ms}$



$t \sim 1 \text{ms}$

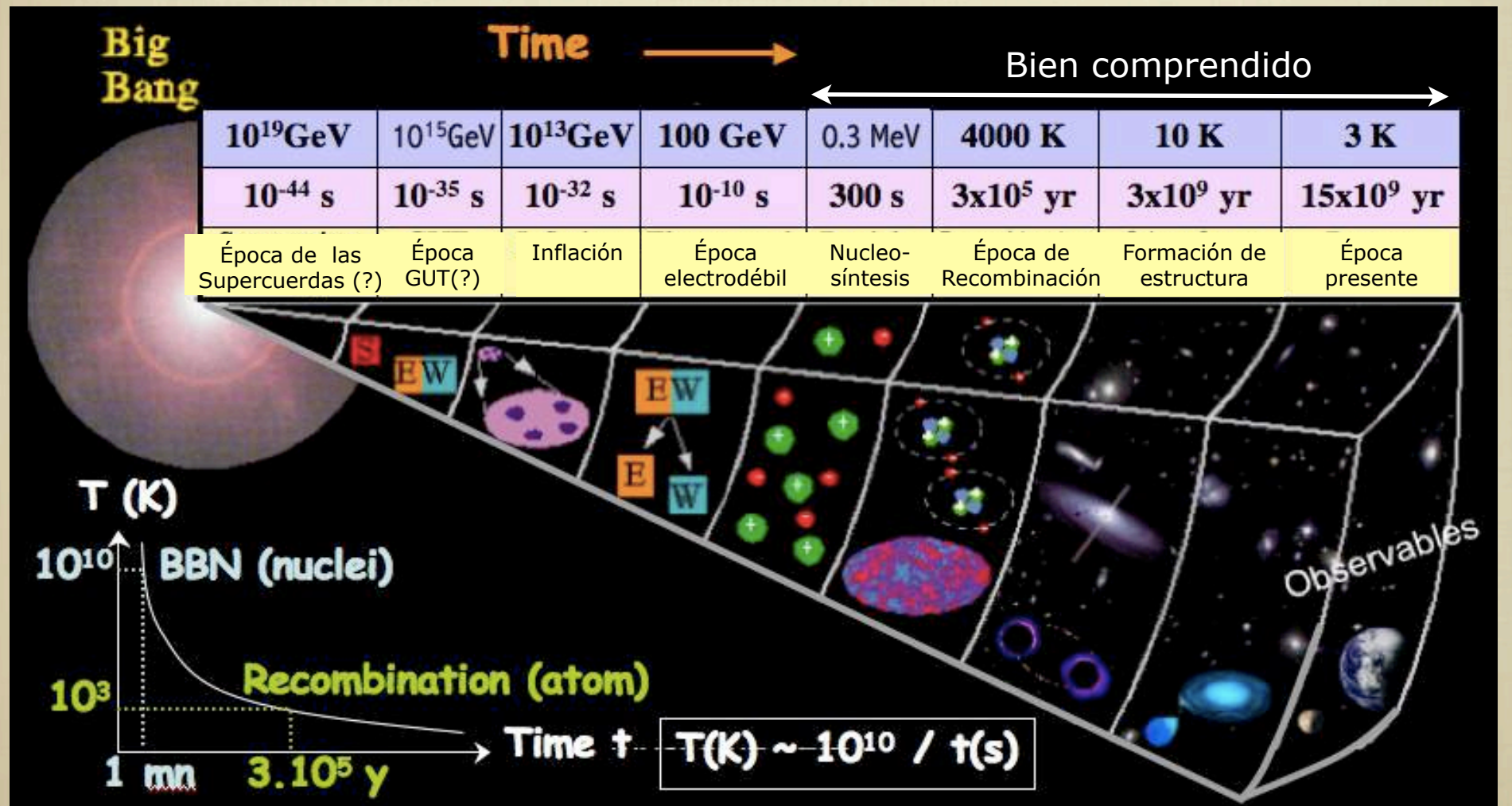
Nucleones



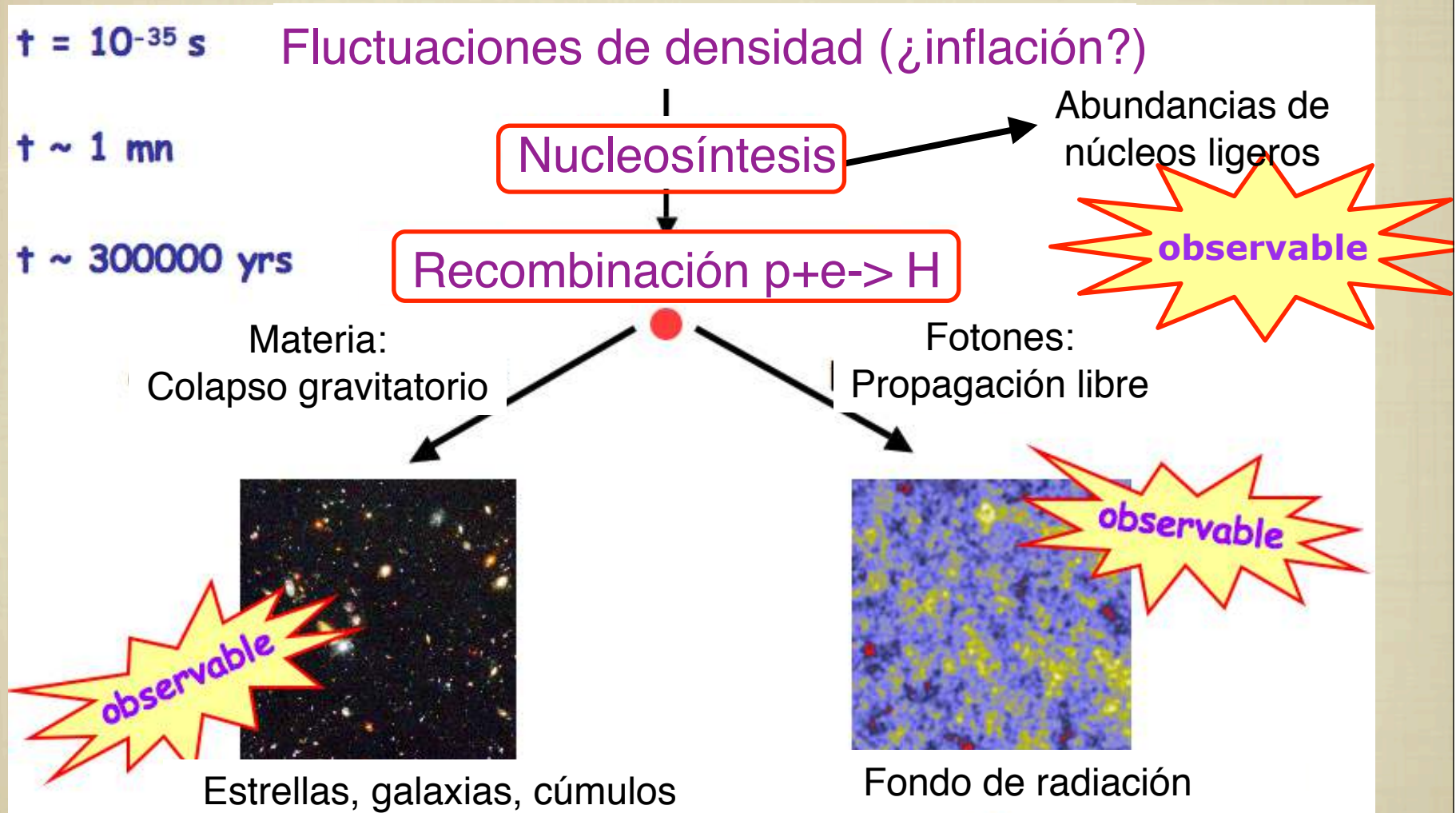
# Cosmología

Nuestro conocimiento incompleto de las leyes física a altas energías no nos permiten retroceder hasta el "instante cero"

Pero nos proporcionan una imagen bastante detallada de la evolución del Universo a partir de las primeras fracciones de segundo



## Predicciones del Modelo del Big Bang



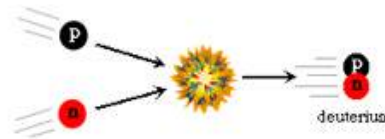
## Nucleosíntesis primordial ("Big Bang Nucleosynthesis")

En los primeros minutos, el Universo lleno de fotones, protones, neutrones, electrones, en equilibrio térmico  
 Temperatura tan alta que los núcleos están disociados por la agitación térmica  
 Al enfriarse hasta  $T \sim 0.3$  MeV, los protones y neutrones cristalizan en núcleos

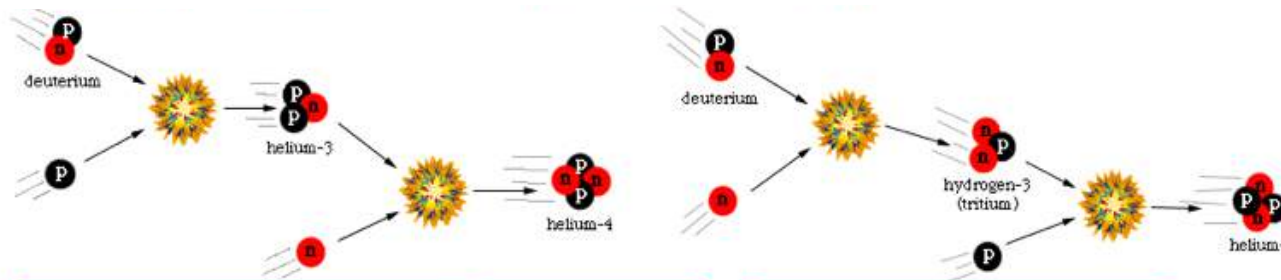
- Desintegración del neutrón



- Formación de Deuterio



- Formación de Helio-4



Fracción de masa en He =  $2/8 = 0.25$

Fracción en H = 0.75

El cociente  $n_{\nu}/n_b$  controla la rapidez del paso intermedio



Expansión tan rápida que sólo da tiempo a formar los núcleos ligeros

Los núcleos formados enseguida están demasiado alejados unos de otros para combinarse en otros más complejos

Sus abundancias han permanecido casi sin modificación hasta hoy

**Datos astronómicos:**

Distribución homogénea con

Hidrógeno ~ 75 %  
 Helio-4 ~ 25 %  
 Helio-3 ~ 0.003 %  
 Deuterio ~ 0.003 %  
 Litio-7 ~ 0.00000002 %

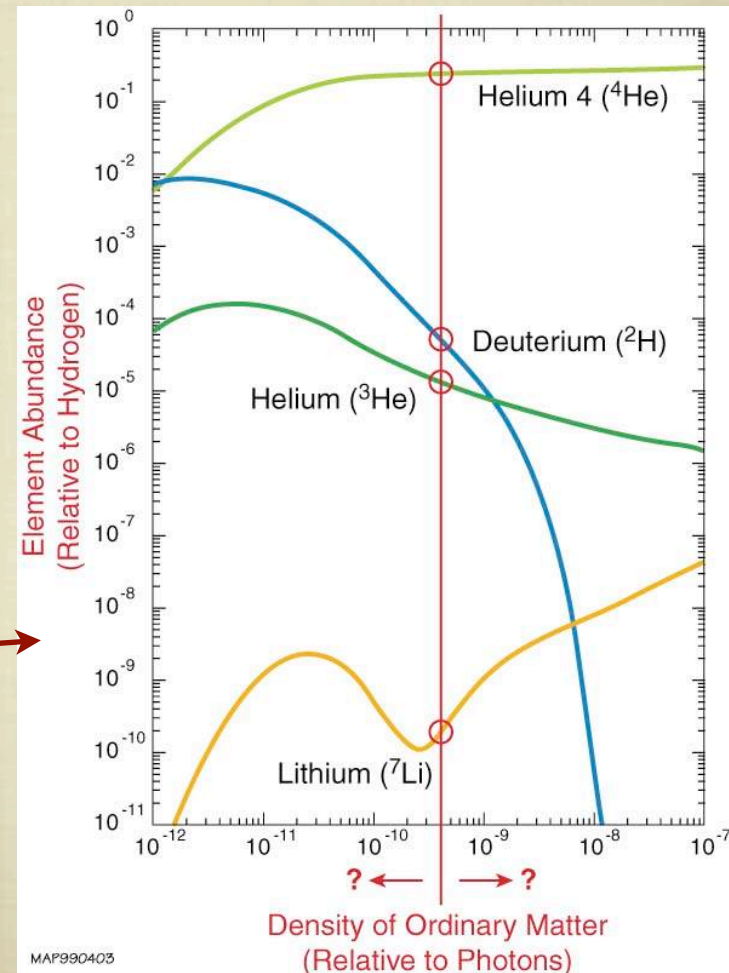
**Buen acuerdo con la teoría**

si hay un barión por cada mil millones de fotones

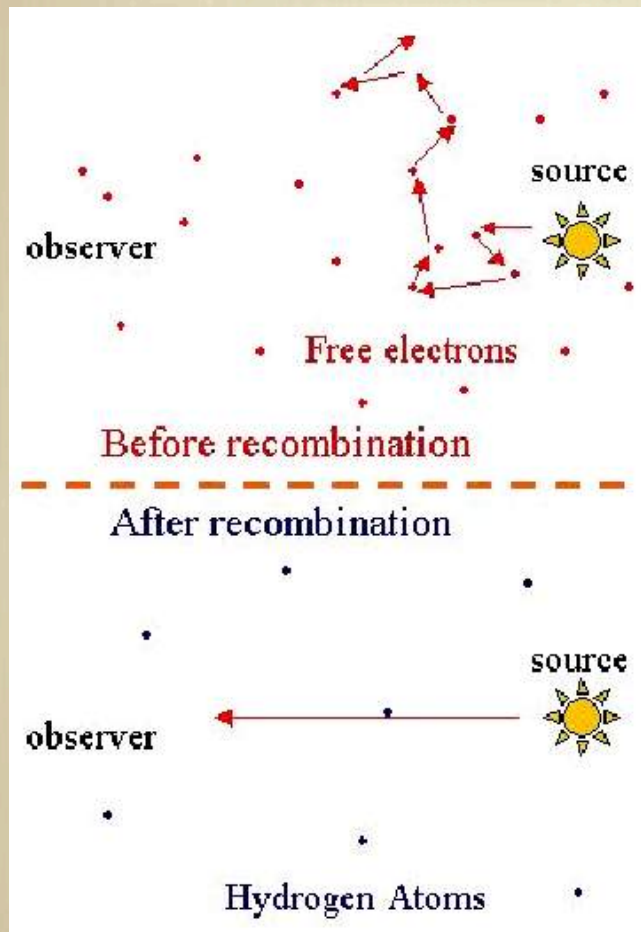
Pregunta para el s.XXI: **Bariogénesis**

¿Por qué hay materia y no antimateria?

¿Por qué un pequeño exceso bariónico?  $n_b/n_\gamma = 10^{-9}$



## Fondo de radiación de microondas ("Cosmic microwave background")



- Hasta los **~300.000 años**, el Universo lleno de fotones, núcleos y electrones, en equilibrio térmico

Temperatura tan alta que los átomos están disociados por la agitación térmica

- Al enfriarse hasta  $T \sim 0.4 \text{ eV} = 4000\text{K}$ , los núcleos y electrones cristalizan en átomos

- Los átomos son neutros  $\Rightarrow$  El Universo se convierte en transparente a los fotones.

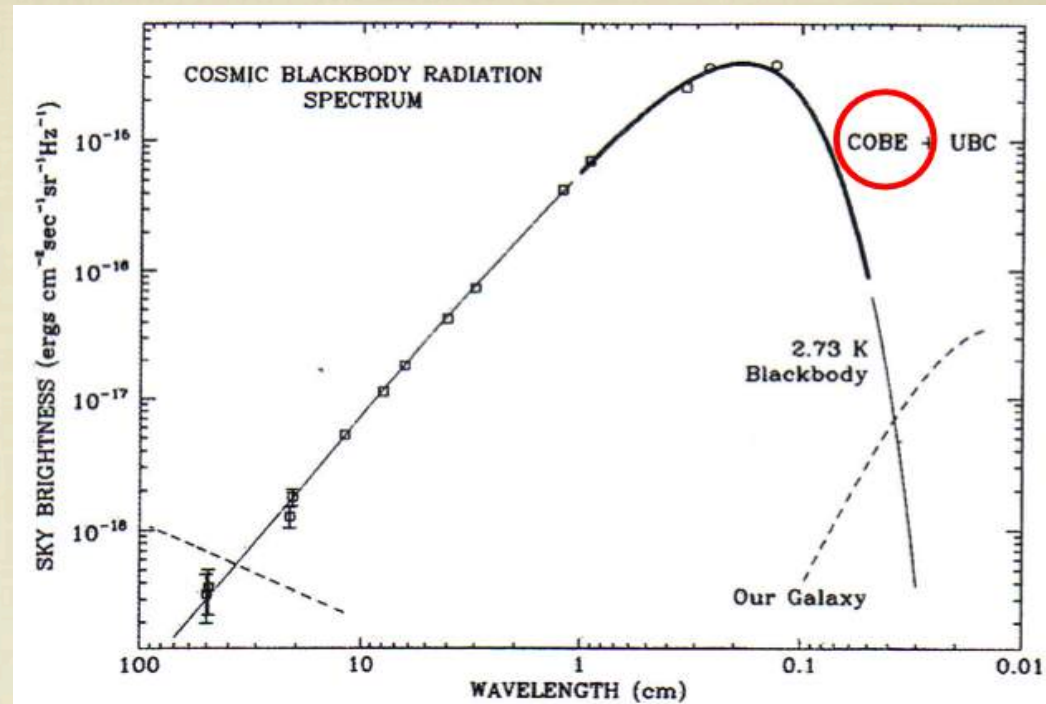
## Radiación reliquia llena el Universo desde entonces

Hoy el Universo es 1100 veces más viejo, la frecuencia y temperatura han corrido al rojo un factor  $\sim 1100$ , hasta  **$T = 2.7\text{K}$**  ( $\lambda \sim$  Microondas)

## Descubrimiento del fondo de radiación de microondas 'Cosmic Microwave Background' (CMB)



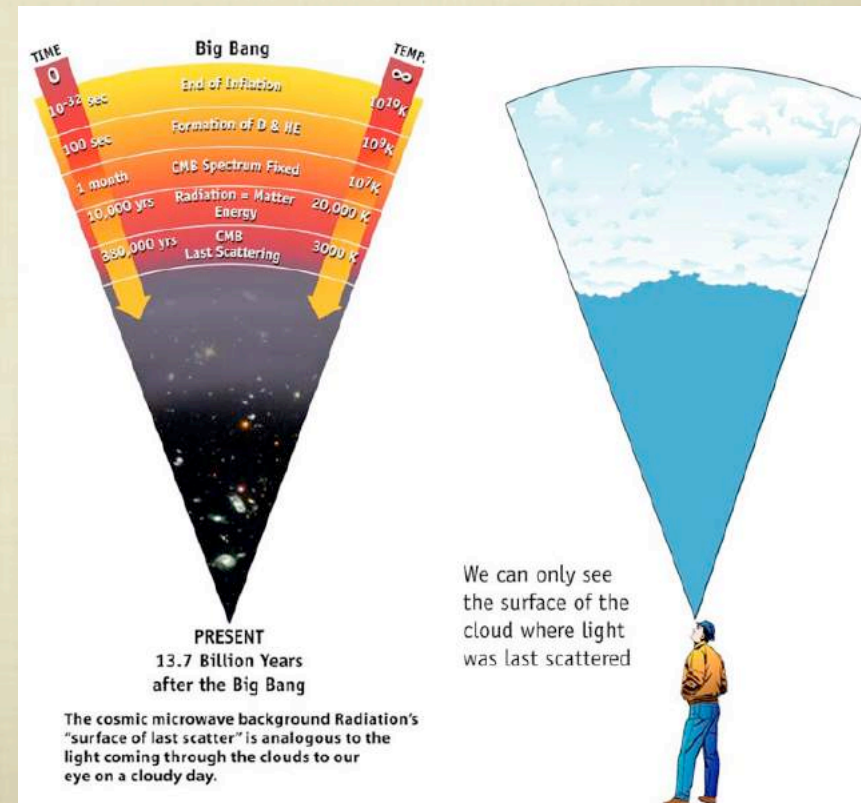
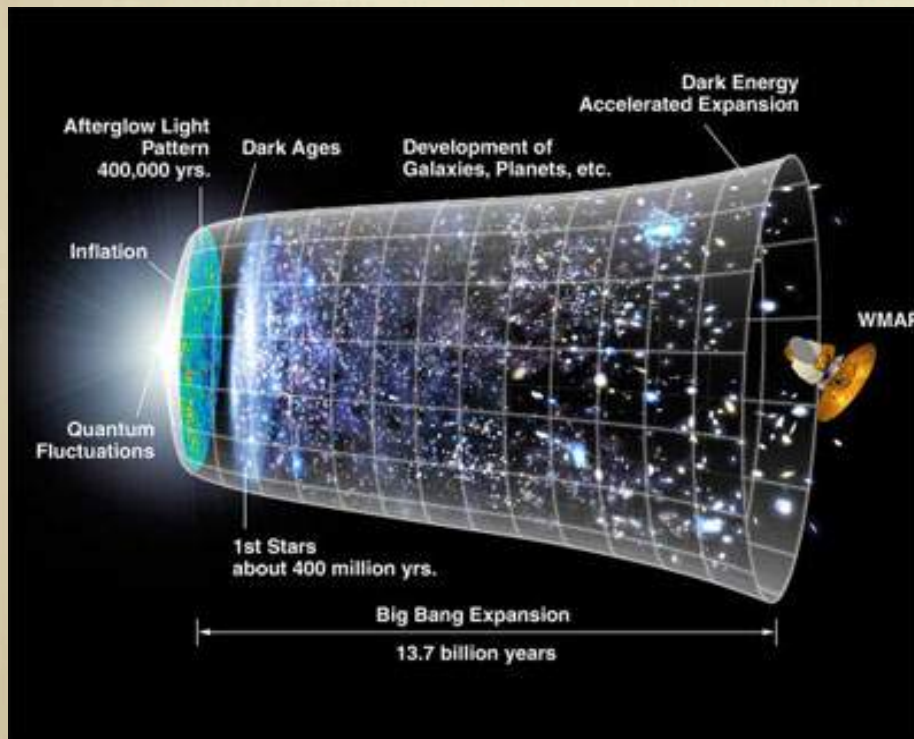
A. Penzias y R. Wilson

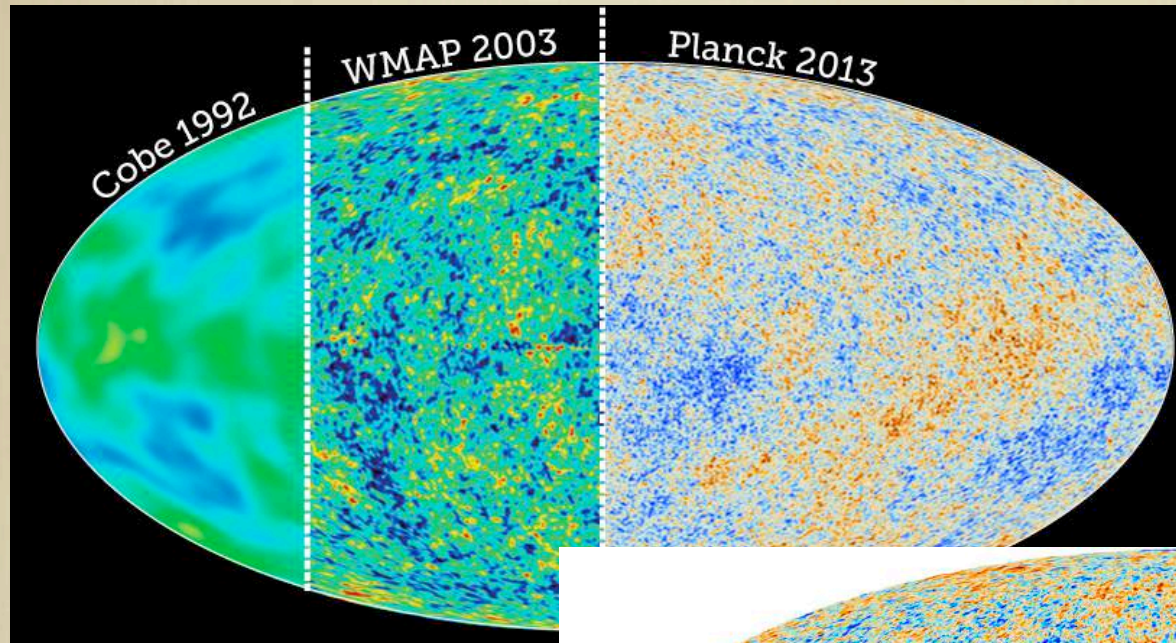


Radiación con espectro de cuerpo negro a temperatura de 3K

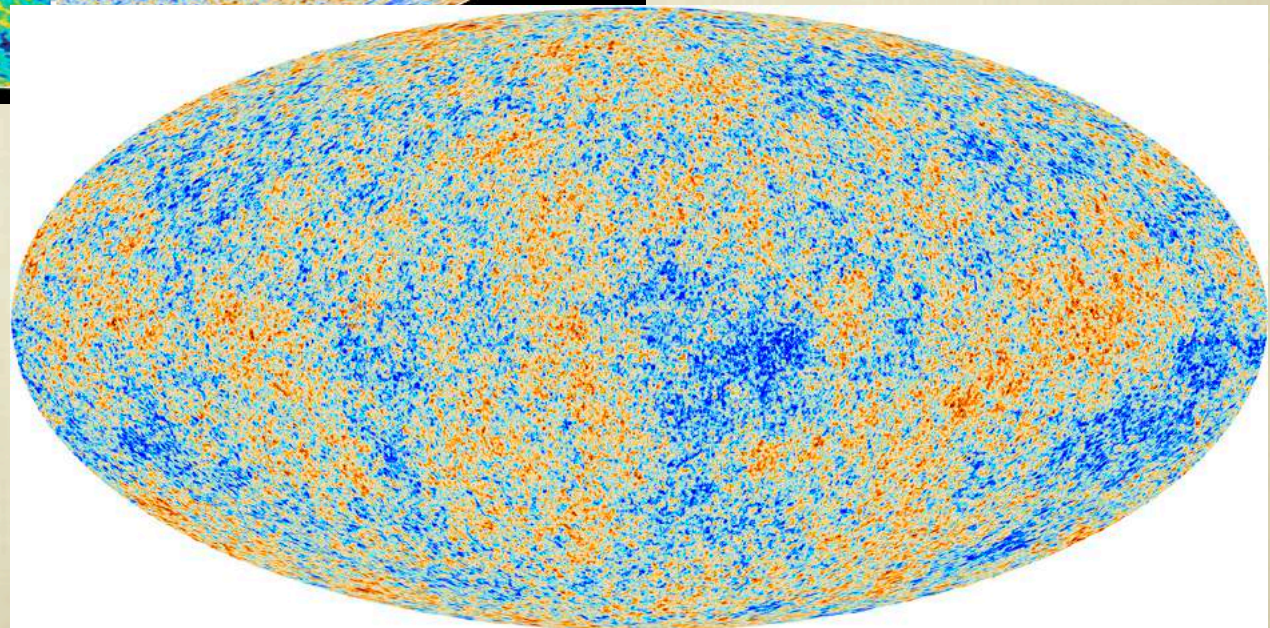
- Descubrimiento en 1965
- Medidas muy precisas en diversos experimentos, recientemente los satélites COBE (1992), WMAP (2003-08) y Planck (2009-13)

La medida de la temperatura del CMB en diferentes direcciones proporcionan una fotografía del Universo cuando tenía 300.000 años (hace 13.000.000.000 años)

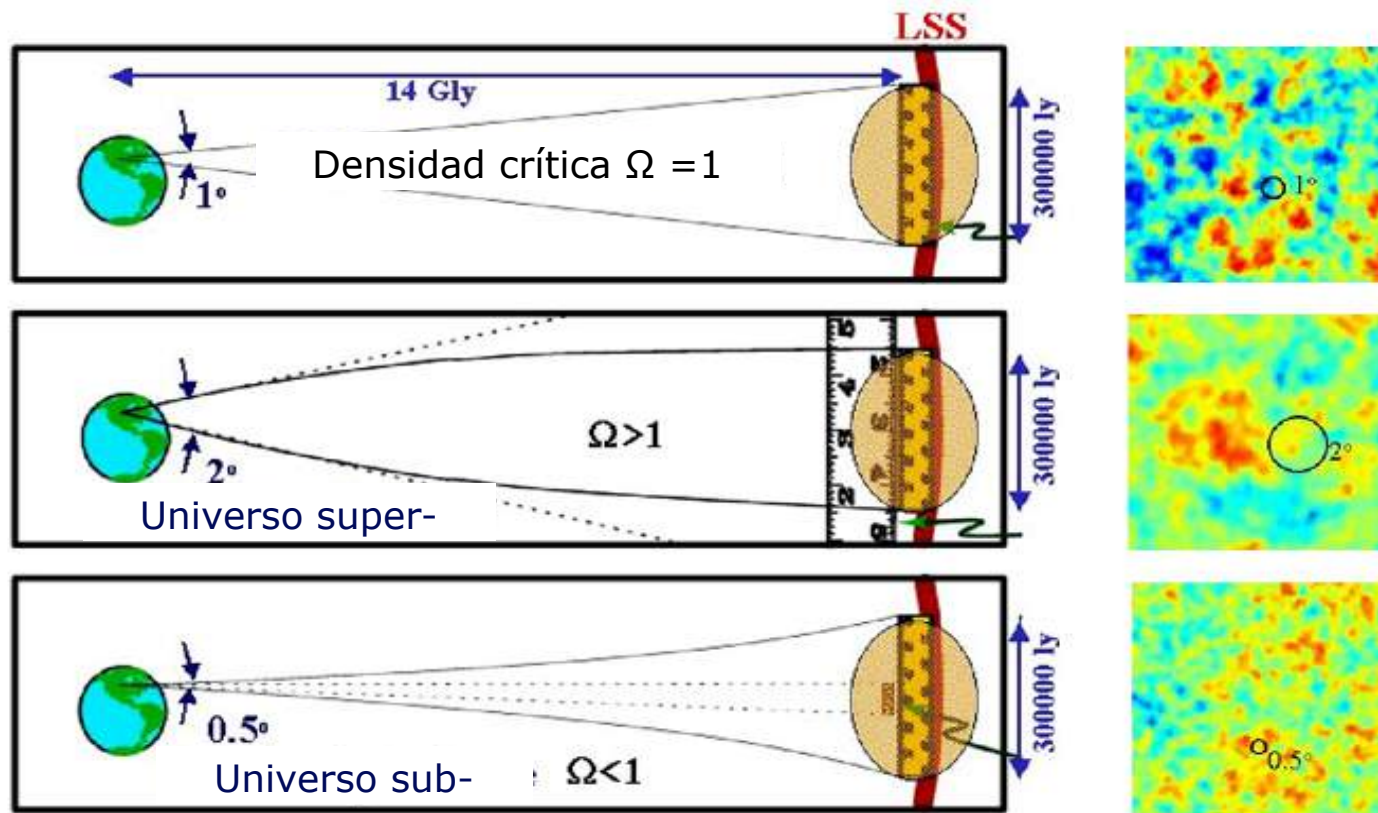




**“Foto del Universo”  
por el satélite Planck**



## El análisis de las inhomogeneidades revela la geometría, la historia y la composición del Universo



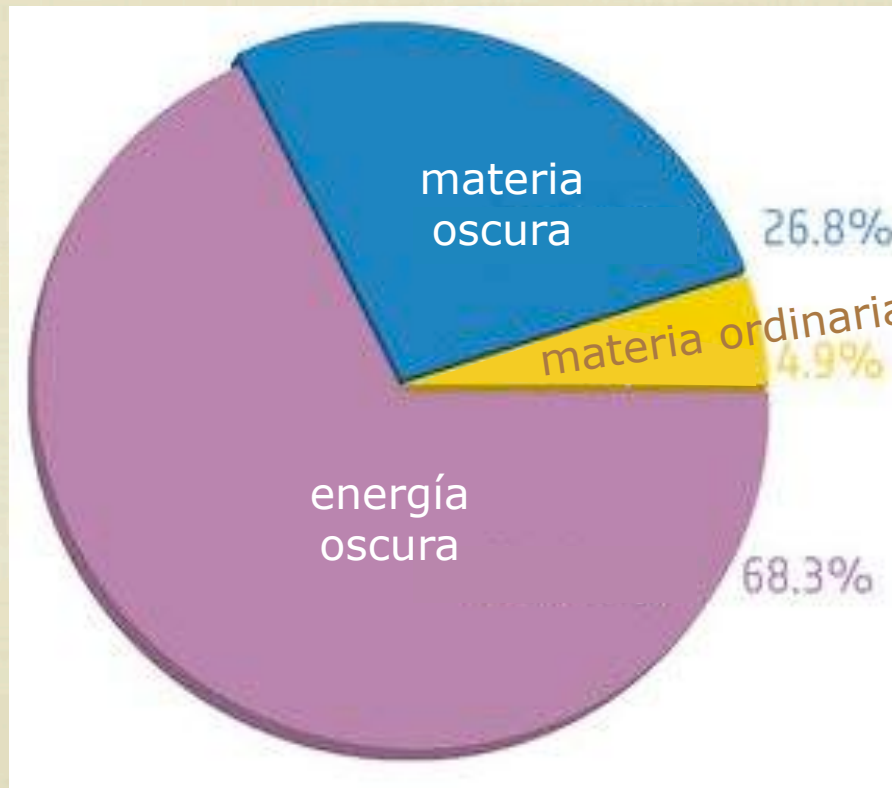
El tamaño aparente de la escala de anisotropía depende de  $\Omega_{\text{tot}}$

Los datos muestran que el Universo tiene la densidad crítica  $\Omega_{\text{tot}} = 1.02 \pm 0.02$  y su geometría es plana

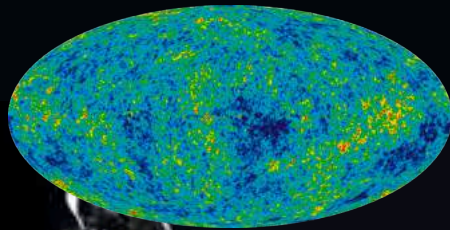


## La extraña composición del Universo

Los datos muestran que la materia de tipo conocido sólo contribuye una parte mínima de la densidad de energía del Universo



**Un Universo muy oscuro...**



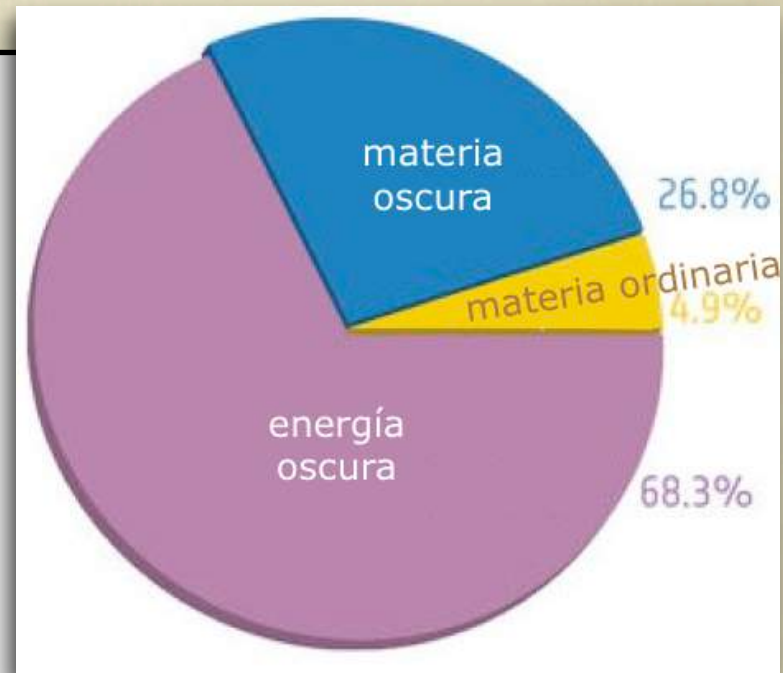
**Un Universo muy oscuro...**



# Cosmología

Multitud de observaciones confirman este modelo, y la composición actual del Universo

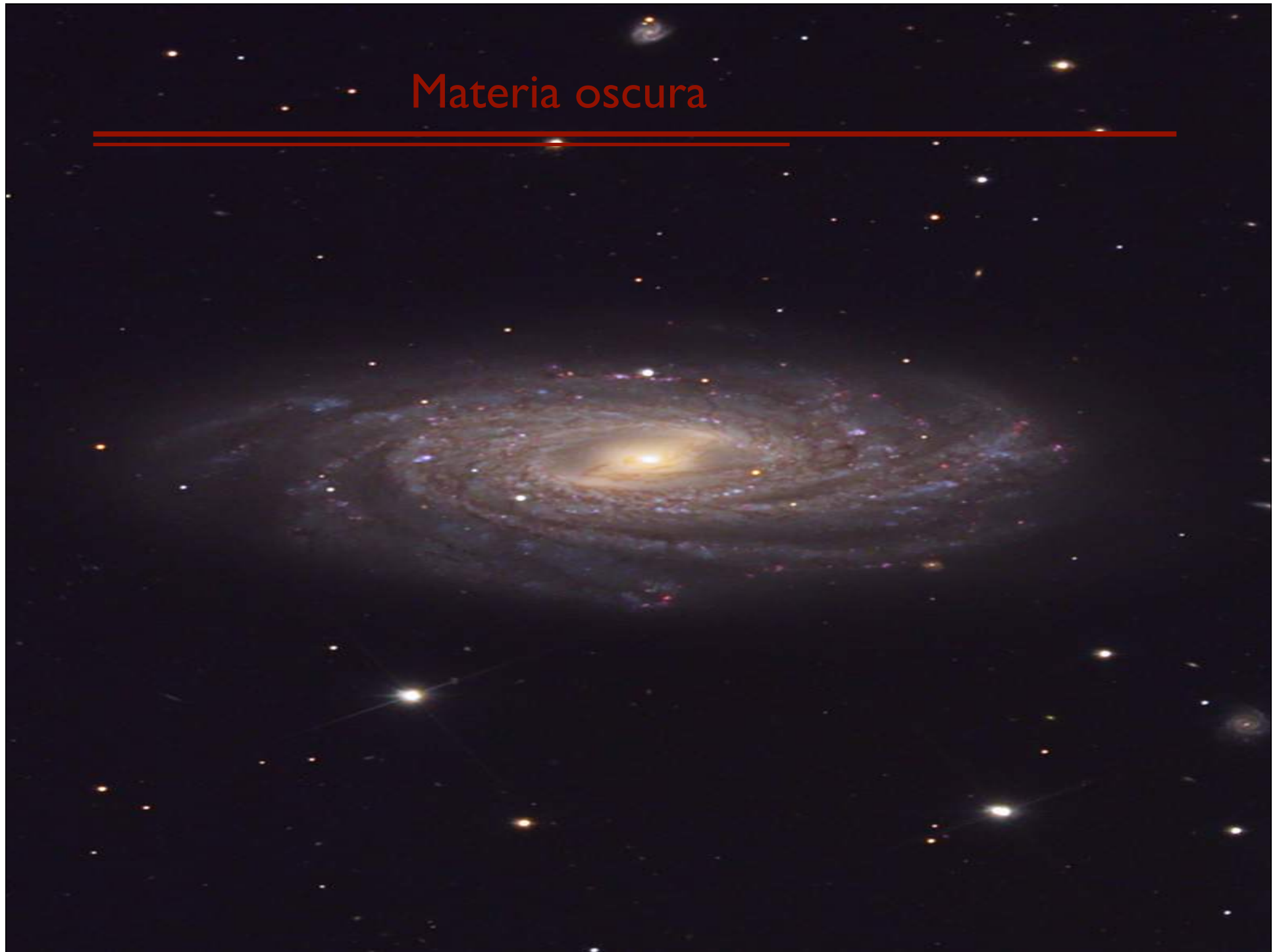
- **Materia bariónica, aprox. 5%**  
Materia conocida, átomos, etc
- **Materia oscura, aprox. 25%**  
Materia que no emite luz  
Se detecta su efecto gravitatorio  
Posiblemente partículas neutras muy pesadas ¿Supersimetría?
- **Energía oscura, aprox. 70%**  
Energía del vacío, NO de partículas  
Genera una expansión acelerada del Universo  
¿Constante cosmológica de Einstein?



⇒ ¡El 95% del contenido del Universo es un misterio!

# Materia oscura

---

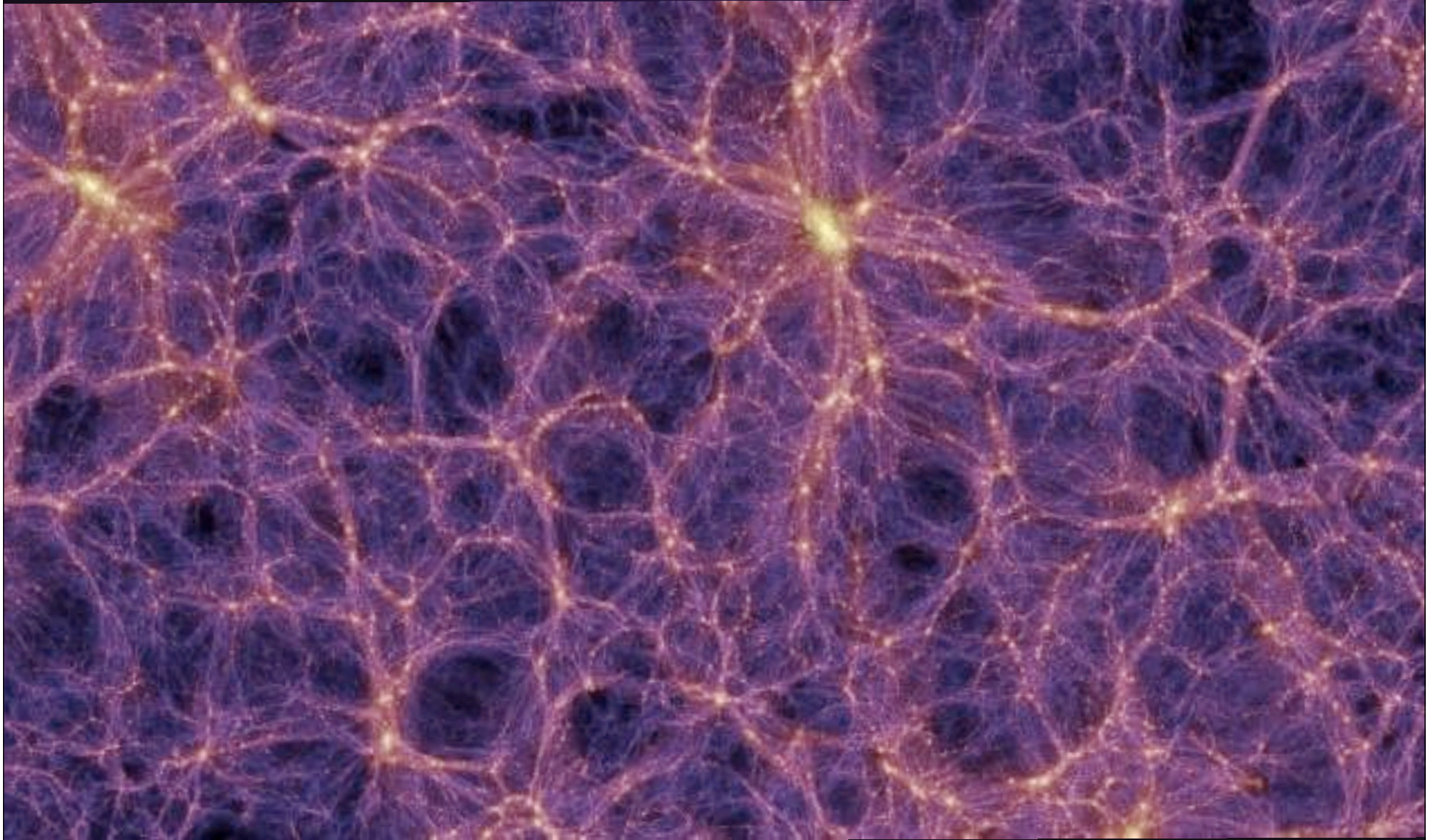


# Materia oscura



# Materia oscura

---



## Evidencia de "Energía Oscura"

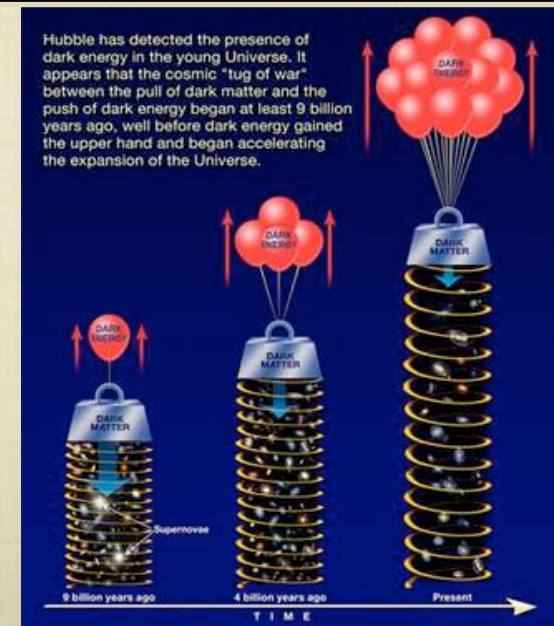
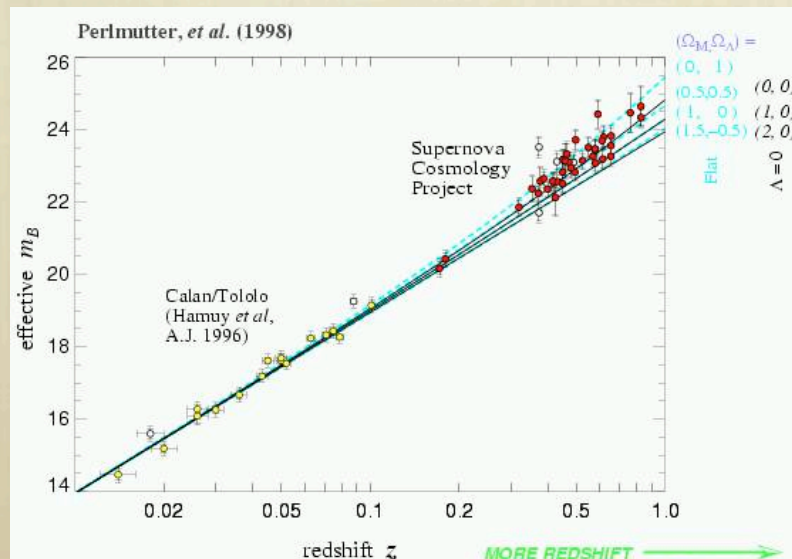
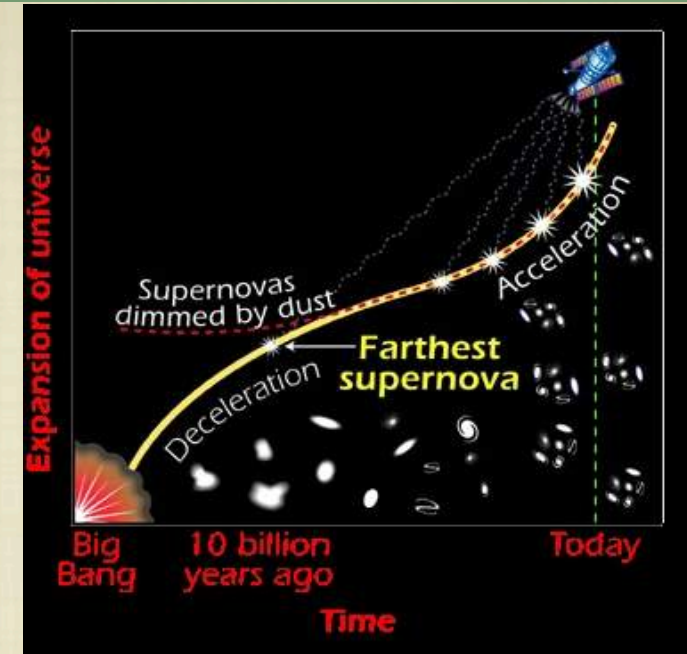
Medida de la expansión de Hubble

- El Universo ha pasado de una fase de deceleración a una fase de expansión acelerada

- Implica la existencia de una densidad de energía con repulsión gravitacional

### Energía oscura

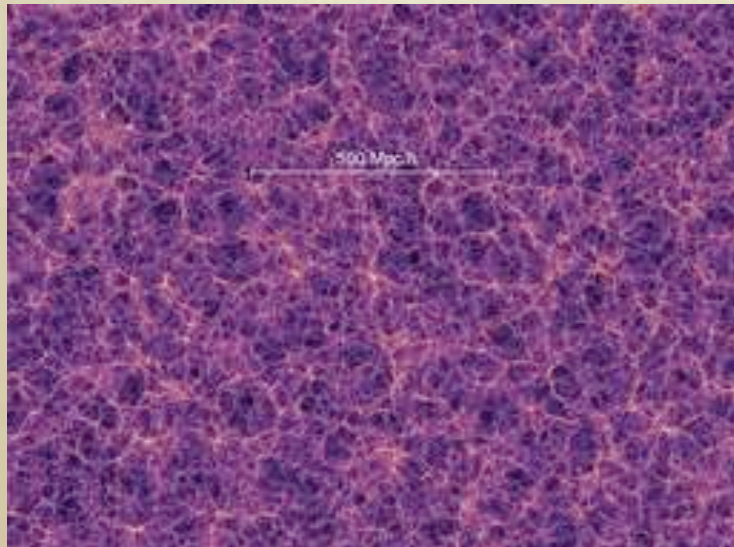
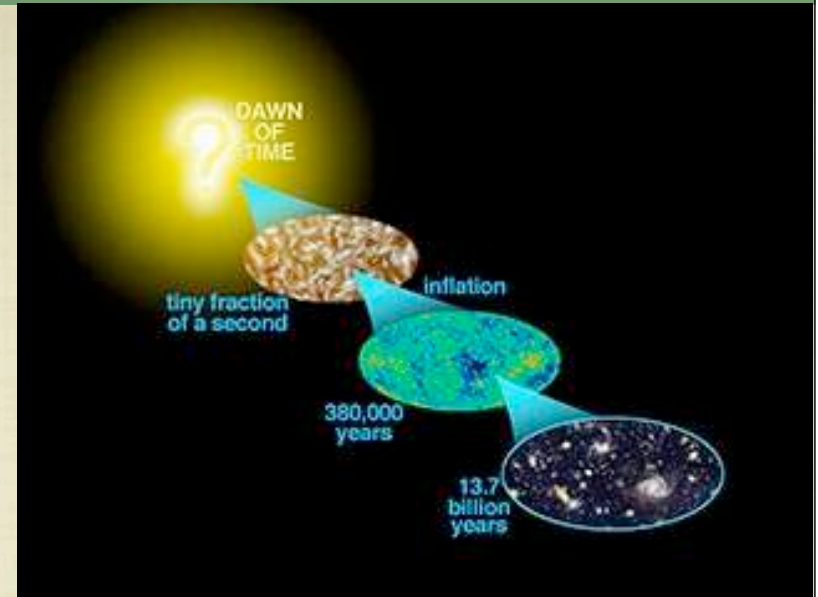
- La posibilidad más sencilla es una energía del vacío i una constante cosmológica! (Einstein):



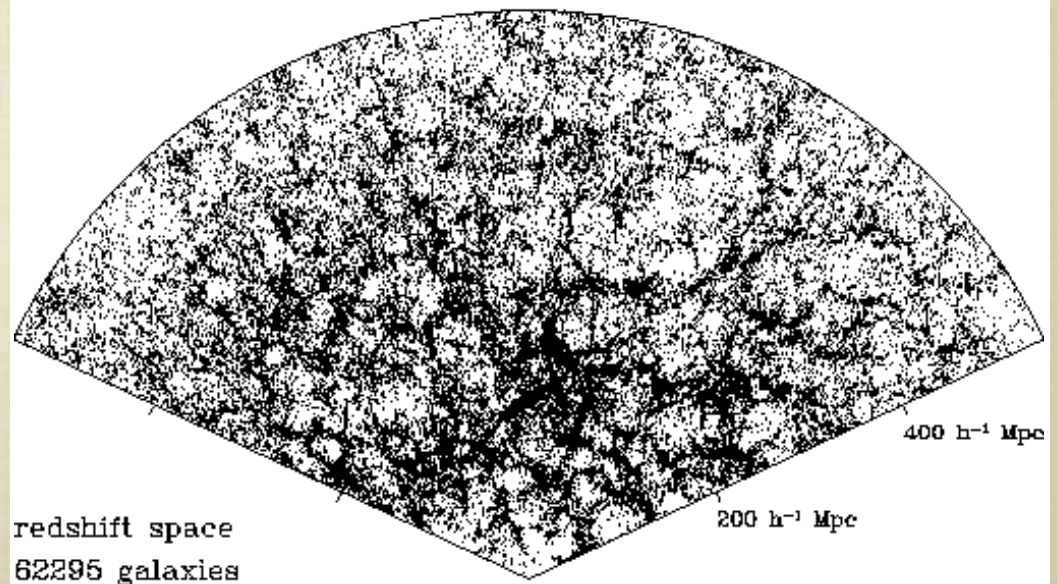


## Formación de estructura:

- Inhomogeneidades del CMB: fluctuaciones en la densidad del Universo para  $t=300.000$  años
- Crecen y crecen, y terminan formando nubes de gas, estrellas, galaxias... al cabo de  $10^9$  años
- Las simulaciones en superordenadores dan distribuciones de galaxias en buen acuerdo estadístico con los datos observacionales (!) (crucial incluir materia oscura y energía oscura)



**Millenium Simulation,  $10^{10}$  partículas**

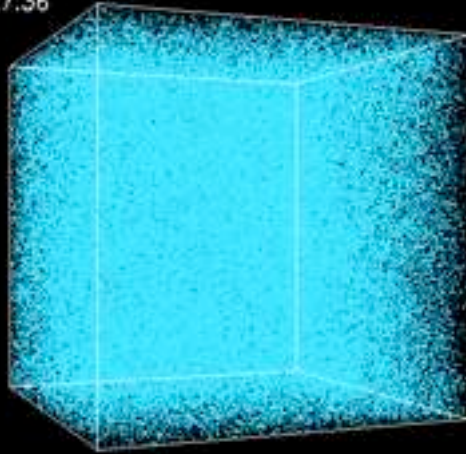


**Sloan Digital Sky Survey, 2000**

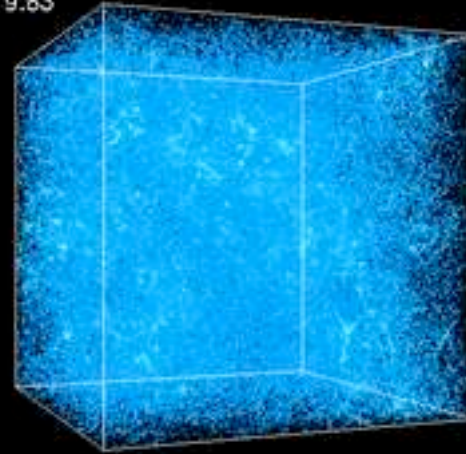
Formación de  
estructura

# Cosmología

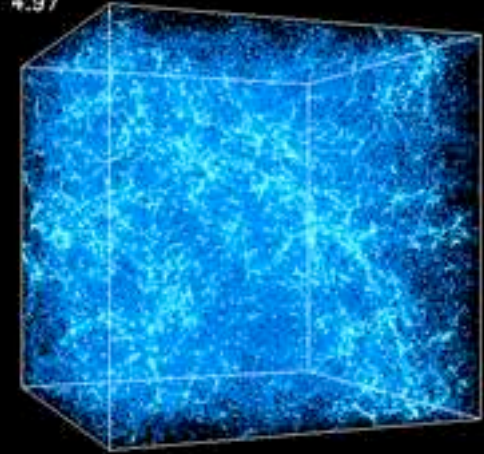
$Z=27.36$



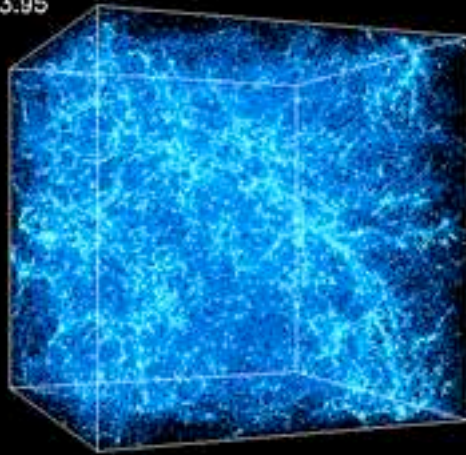
$Z= 9.83$



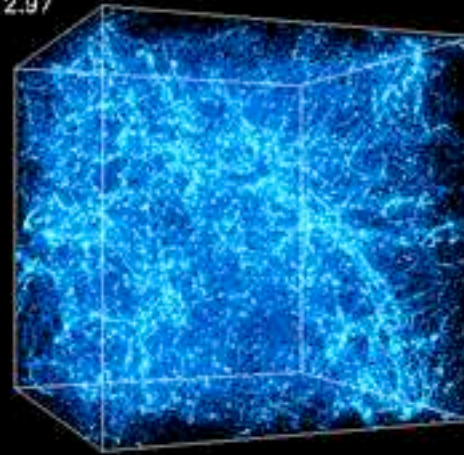
$Z= 4.97$



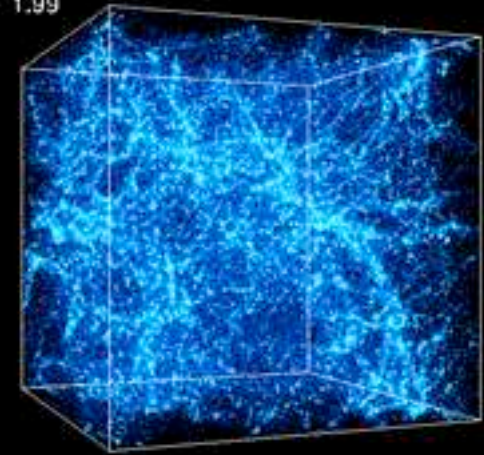
$Z= 3.95$



$Z= 2.97$



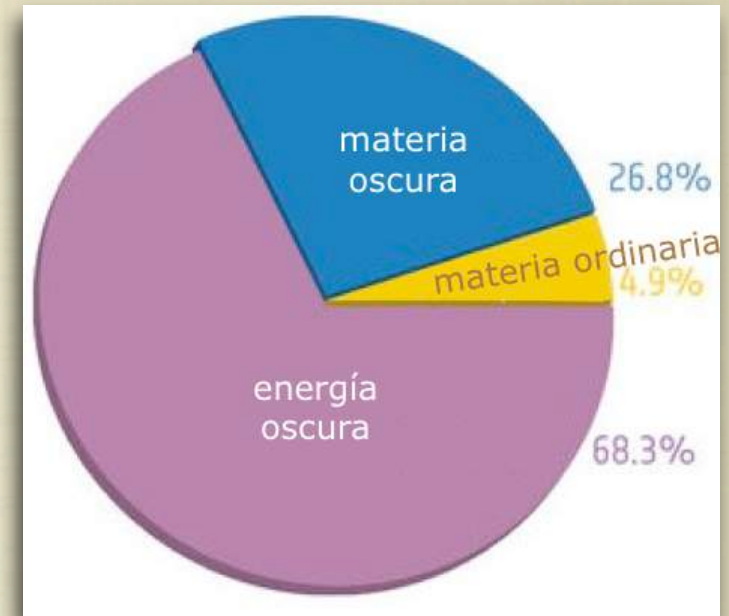
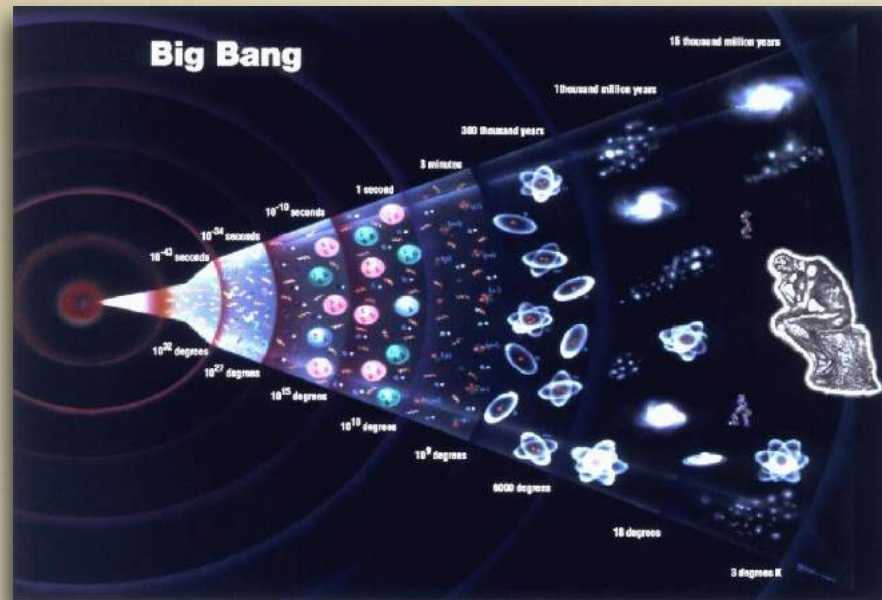
$Z= 1.99$



Simulación por A. Kravtsov, A. Klypin, National Center for Supercomputer Applications

# Cosmología

## El modelo estándar de la Cosmología ( $\Lambda$ CDM, "concordance model")



**Una proeza del intelecto humano**

**Describe la estructura y evolución del Universo conocido en escalas de espacio y tiempo que abarcan 10 órdenes de magnitud**

**Intrincada mezcla de lo infinitamente grande y lo infinitamente pequeño**



¿El “final de la Física”?

¿O nuevos comienzos?  
 (“nubes en el horizonte”)

# Gravitación y Cosmología

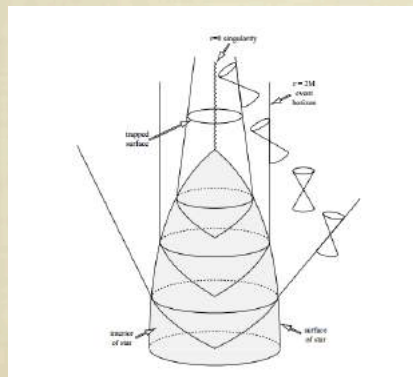
La Relatividad General contiene su propio fin.  
Produce situaciones en las que deja de ser válida.

**Singularidades: curvatura infinita**

Intuición: colapso gravitatorio

**Inevitables: Teoremas de singularidad**

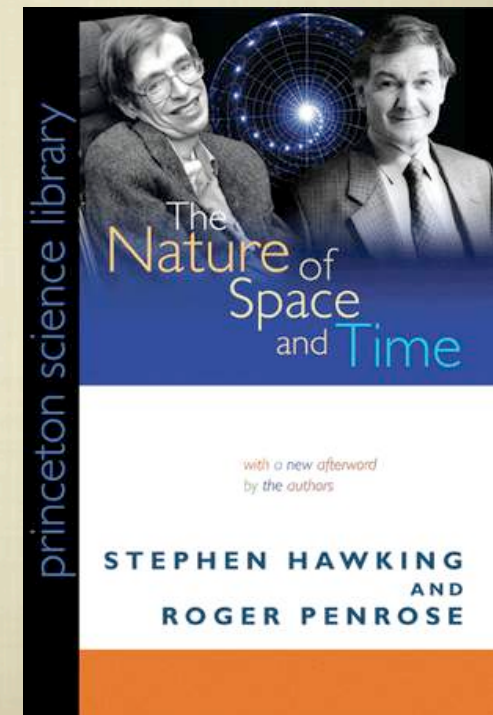
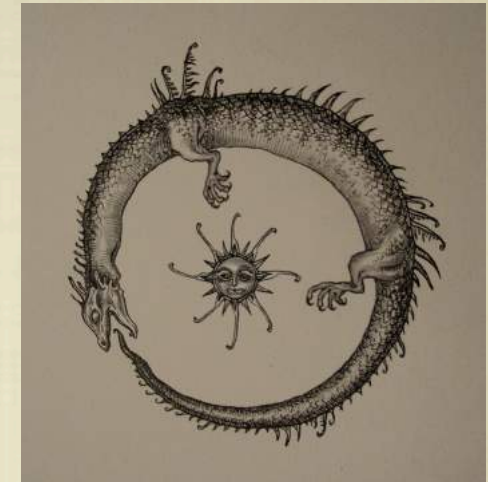
(condiciones: positividad de energía y superficies tipo luz atrapadas, "trapped null surface")



**Hipótesis de censura cósmica:**

las singularidades (excepto las de tipo Big Bang) están siempre escondidas tras horizontes.

¿no peligrosas? ¿no físicas?

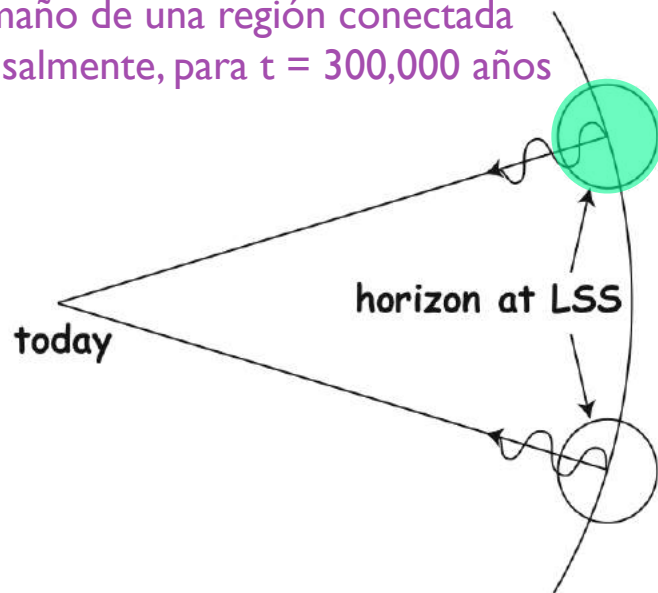


# Big Bang

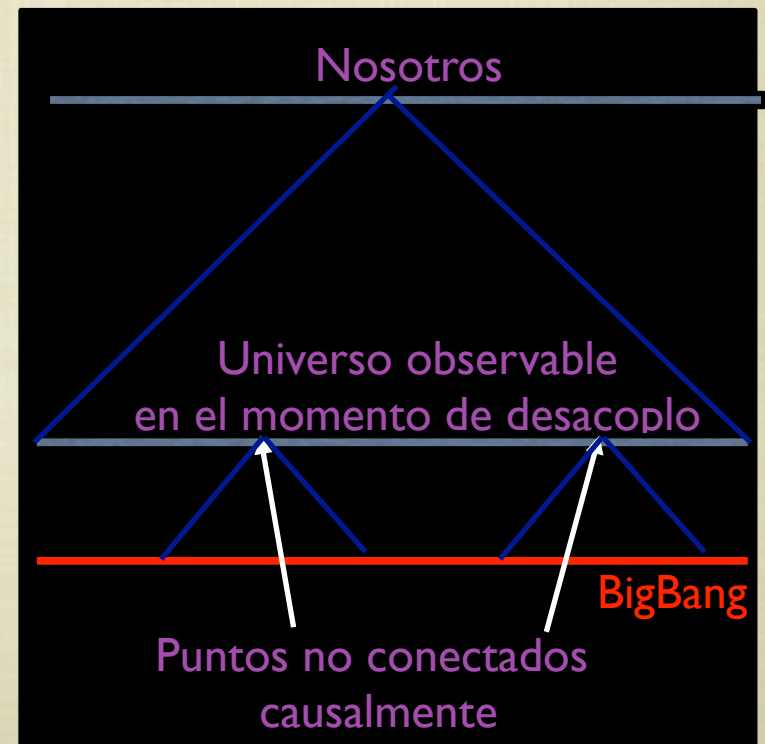
## ¿Cómo fueron los primeros instantes del Universo?

- ¿Por qué el Universo es tan plano ( $\Omega=1$  con gran precisión)
- **Problema del horizonte:** ¿Por qué el Universo es tan homogéneo (p.ej. CMB), incluso en regiones que no han estado conectadas causalmente?

Tamaño de una región conectada causalmente, para  $t = 300,000$  años



$$\text{Ángulo} \sim \frac{10^3 \times 3 \cdot 10^5}{14 \cdot 10^9} \text{ rad} \sim 1^\circ$$



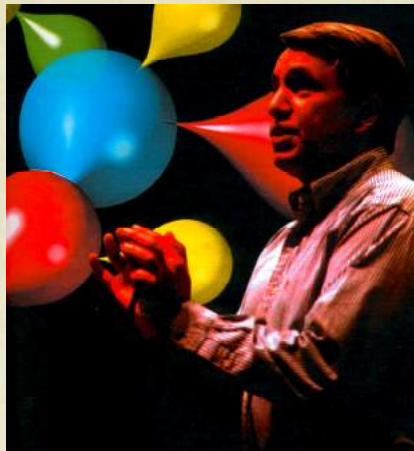
# Inflación

**Inflación:** Guth, Linde, 1980

El Universo tuvo una fase de expansión superluminal, inducida por un campo denominado "inflatón"



**Alan Guth**

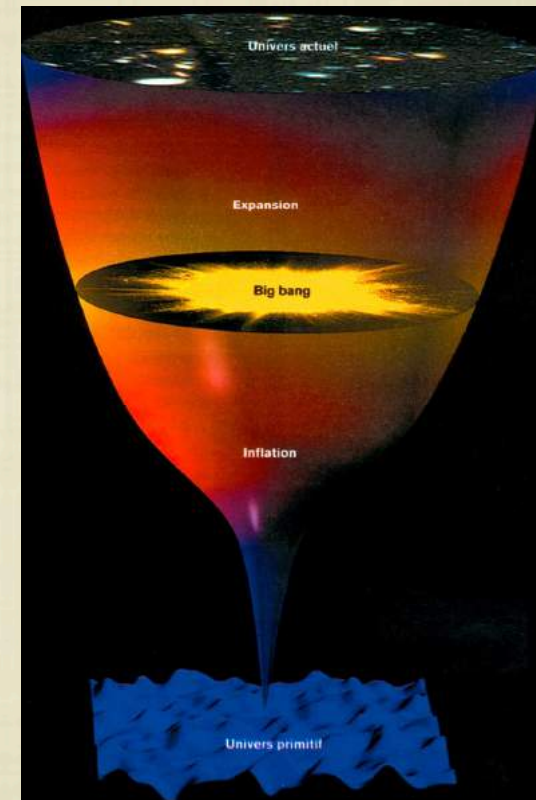


**Andrei Linde**

Explica un Universo plano y conectado causalmente

Además predice correctamente el espectro de fluctuaciones del CMB

**¿Quién es el inflatón y cuál es su física?**

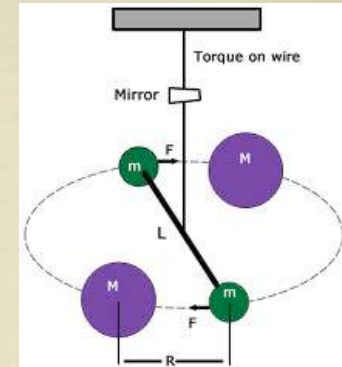


# Relatividad General y Gravitación

## Conclusiones y preguntas abiertas

La Relatividad General proporciona una descripción clásica muy precisa (y por cierto, muy bella) de las interacciones gravitacionales

- desde 0,1 mm (experimentos de Cavendish modernos)
- hasta 13.700.000.000 años-luz (Cosmología)



¿Cómo combinarla con la Mecánica Cuántica?

Las ideas fallan estrepitosamente

## Singularidades

Situaciones en las que la teoría deja de ser válida

¿agujeros negros?

¿cómo fue el origen del Universo?

