

4

El Universo

Antes s. XX, el Universo era un lugar tranquilo,
en el que no parecía suceder gran cosa

Casi todos los físicos suponían que el Universo era
infinito en el espacio y eterno en el tiempo

Sin embargo, existía un hecho inquietante:

¡La noche es oscura!

¡Esto es inexplicable si el Universo es infinito y eterno!

La paradoja de Olbers

Heinrich Wilhelm Olbers (1823)

Si el Universo es infinito y eterno, y está uniformemente poblado de estrellas, entonces toda línea de visión debe terminar en una estrella

Cuantitativamente:

Divídase el espacio en un número infinito de “capas de cebolla”

Cada capa contribuye $\sim r^2$

La luminosidad decrece como $\sim 1/r^2$

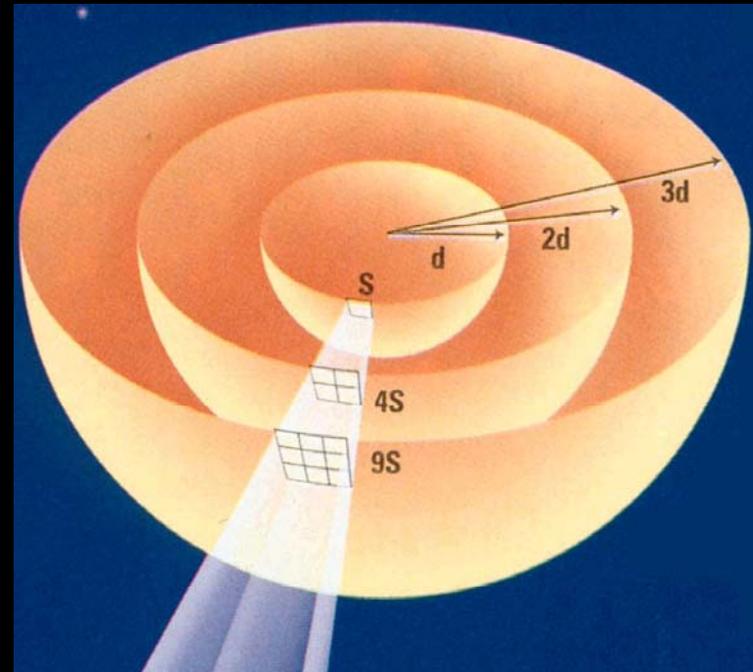
La contribución luminosa de cada capa es constante

Consecuencia:

El Universe no es eterno o ...

El Universe tiene un tamaño finito o ...

Ambos

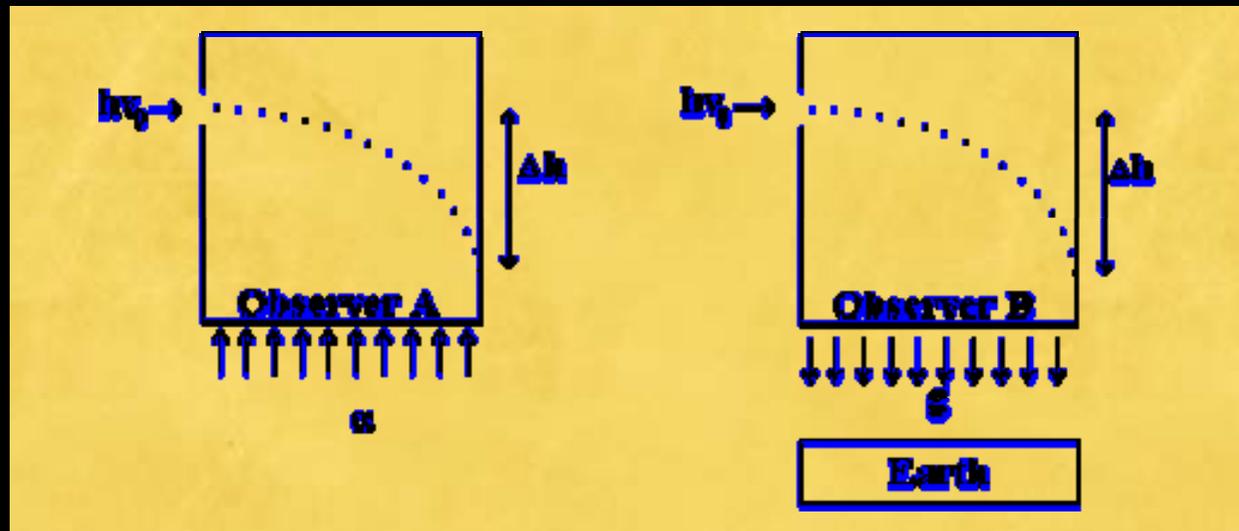


Universo

Relatividad general y gravitación 1907

Principio de equivalencia

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



"El pensamiento más feliz de mi vida"

"The happiest thought of my life" (Albert Einstein)

Universo

Relatividad general y gravitación 1915

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

Ascensor acelerado: la luz sigue trayectorias parabólicas

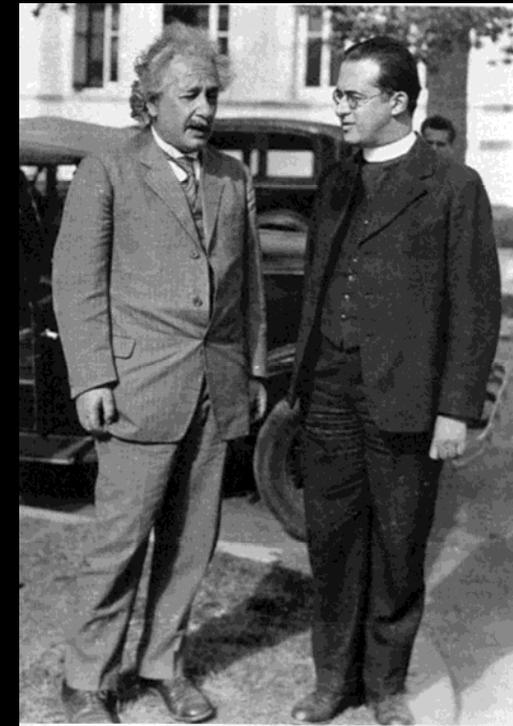
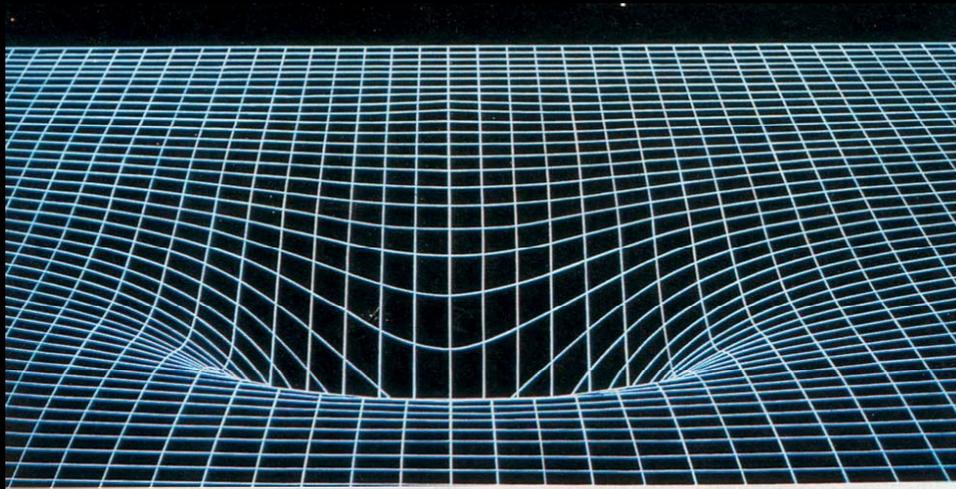
Campo gravitatorio: los rayos de luz deben curvarse!

¡El espacio y el tiempo son curvos!

Albert Einstein (1912-15) : Relatividad General

La Materia dicta al Espacio cómo curvarse

El Espacio dicta a la Materia cómo moverse



George Lemaitre (1927)

Propone modelos de un Universo en expansión

Universo

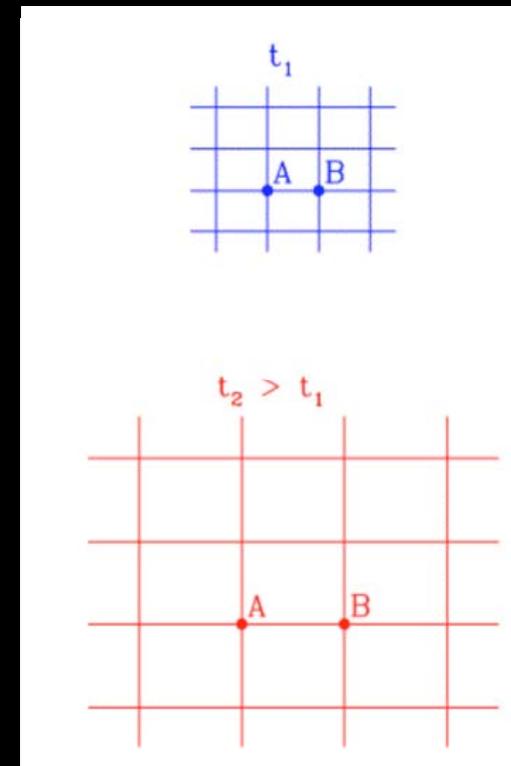
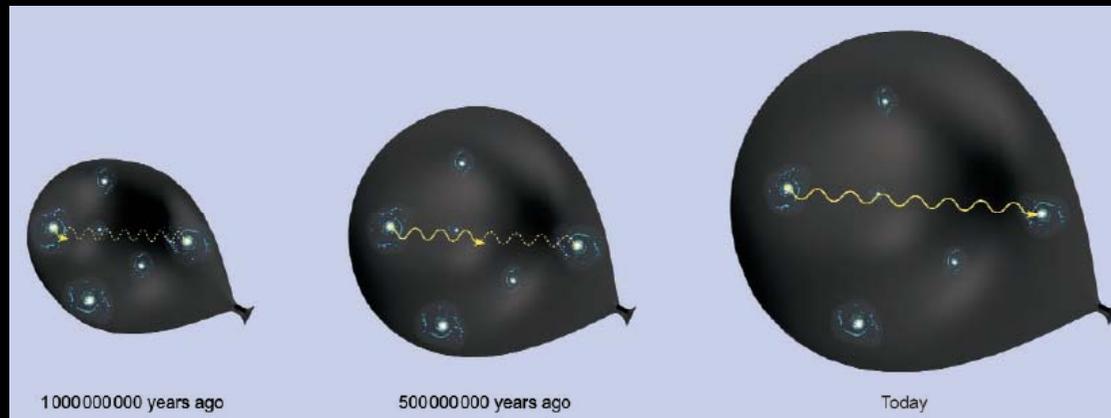
Cosmología, 1915

Friedmann describió la expansión del Universo mediante un factor de escala $a(t)$

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

Sus ecuaciones relacionan la densidad promedio " ρ " y el factor de curvatura espacial " K " con el ritmo de expansión

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



Universo

Densidad crítica

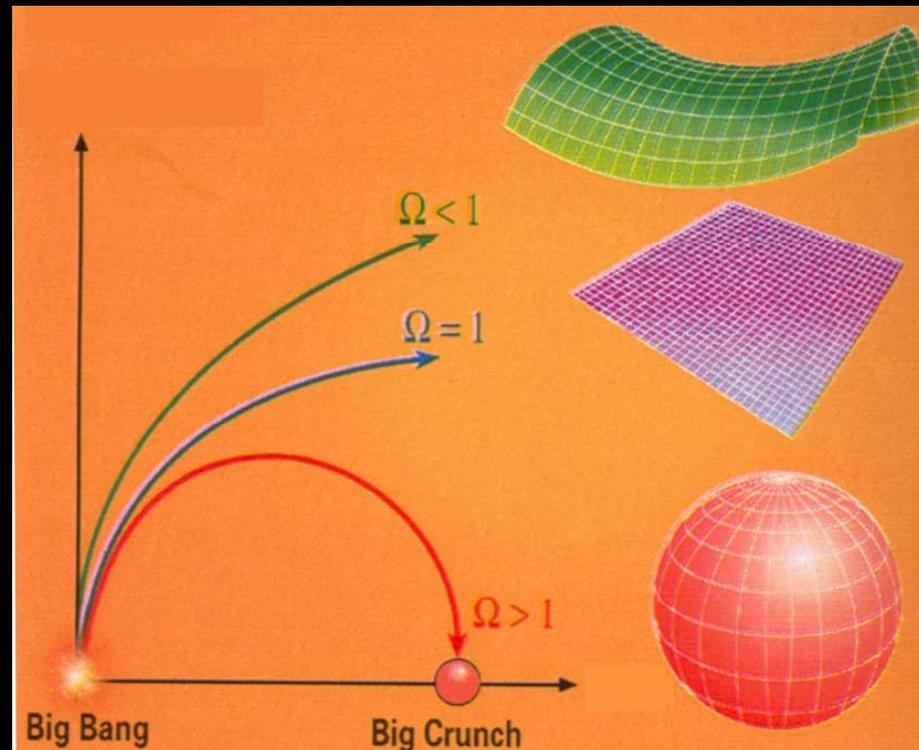
La densidad de energía determina la geometría del Universo

La densidad crítica corresponde al valor en el que la geometría del espacio es plana

En ausencia de lo que hoy se conoce como 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:
Las conclusiones
se modifican
en presencia de
energía oscura)



$K = -1$

$K = 0$

$K = +1$

Universo

Einstein no aceptaba la idea de un Universo dinámico

Creía en un Universo estático y eterno

Pero sus propias ecuaciones predecían diferente

Así que propuso una modificación de las ecuaciones,

añadiendo un término denominado

'constante cosmológica'



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

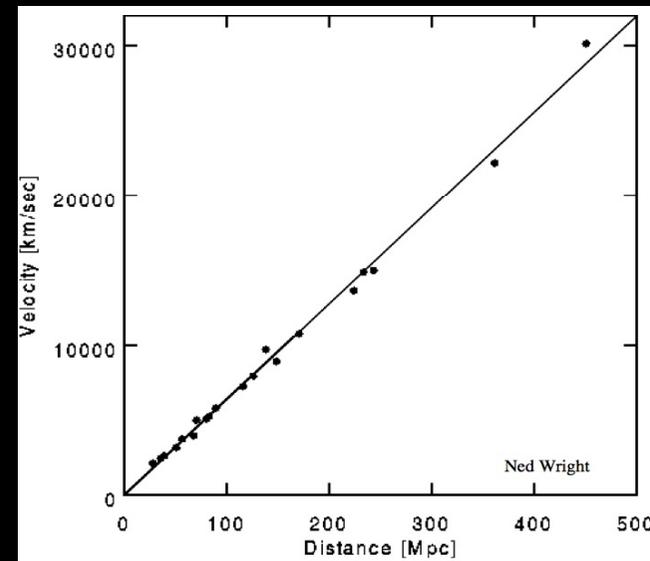
Interpretación: densidad de energía del vacío, constante en el espacio y el tiempo, genera una repulsión que se opone a la atracción gravitacional

Universo

Observación de que la velocidad de las galaxias aumenta linealmente con la distancia (el Universo es un globo que se infla, de modo que la distancia entre dos puntos cualesquiera aumenta con el tiempo)



Edwin Hubble (1929) en el telescopio de Mt. Palomar



Einstein considera la constante cosmológica como el mayor error de su vida científica
(hoy la constante cosmológica puede explicar la energía oscura, consistente con expansión)

Universo

A través de la observación de muchas estrellas y galaxias, se llegó a una **asombrosa conclusión**:

A grandes escalas, el Universo es muy similar en cualquier dirección, en cualquier punto (isótropo y homogéneo)

Por ejemplo, en la distribución de núcleos ligeros

Hidrógeno ~ 75 %

Helio-4 ~ 25 %

Helio-3 ~ 0.003 %

Deuterio ~ 0.003 %

Litio-7 ~ 0.00000002 %

Expansión + homogeneidad-isotropía
Hechos extraordinarios que llevan a una conclusión ...
... extraordinaria

1948: El modelo* 'Big Bang' del principio del Universo



George Gamov

- El Universo comenzó hace \sim 12-13 mil millones de años en un estado de altísima temperatura
- Entonces comenzó a expandirse y enfriarse
- En las primeras fases, contenía principalmente radiación
En fases posteriores la radiación dio lugar a las partículas (protones, neutrones, electrones)

Dos predicciones:

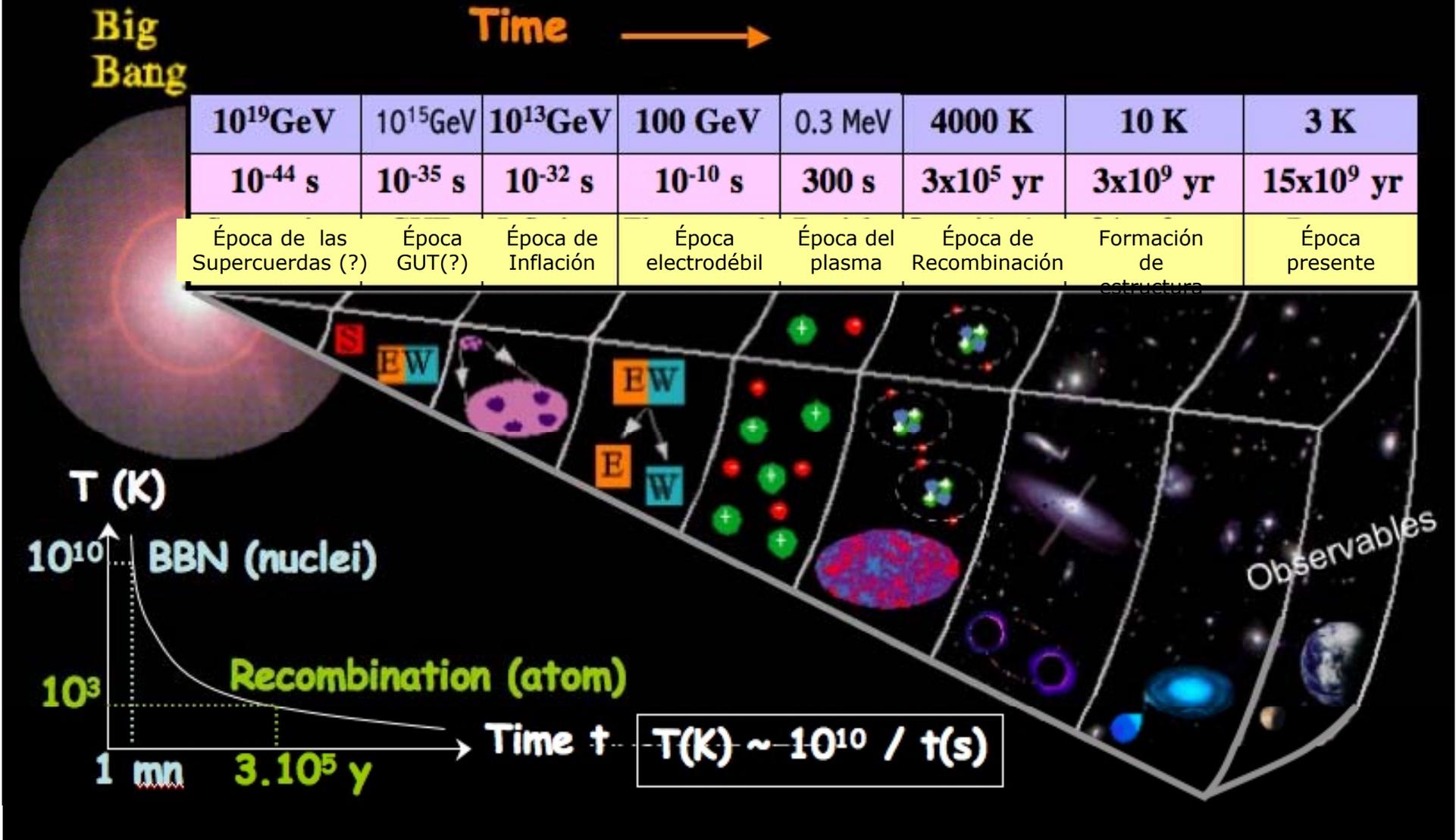
- Los núcleos se formaron en los primeros minutos. La rápida expansión y enfriamiento sólo permitió la formación de los núcleos ligeros
- Debería existir un "eco" en forma de radiación de cuerpo negro ($T \sim 5$ K) uniforme en el Universo (CMB, ver luego)

*El nombre de 'Big Bang' fue acuñado por Fred Hoyle para ridiculizar la idea de Gamow; más tarde, fue Hoyle el ridiculizado



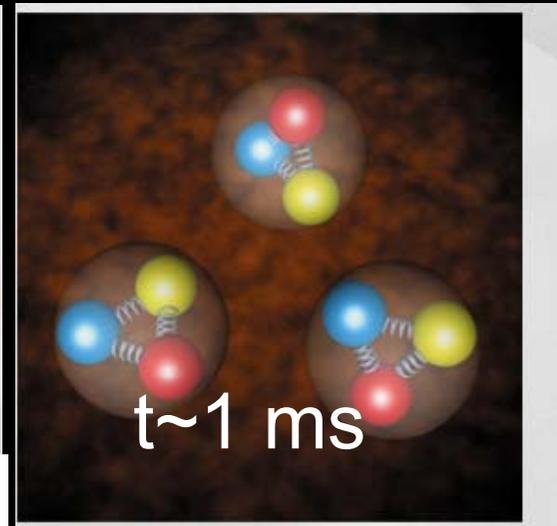
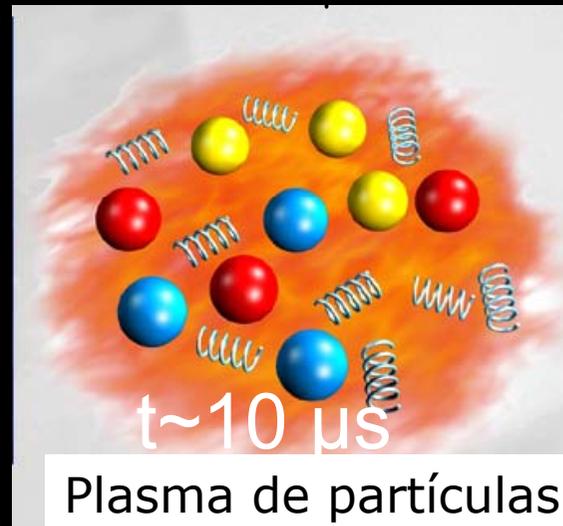
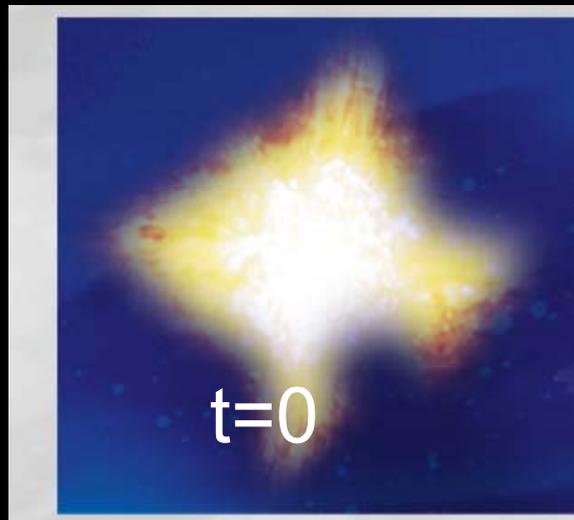
Universo

Reconstrucción de la historia del Universo



Universo

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



Universo

Evolución a partir del Big Bang

Time (sec)	Temperature (eV/K)	Phase
10^{-43} s	10^{19} GeV	¿Supercuerdas? ¿Gravedad Cuántica? ¿Gran Unificación?
10^{-35} s	10^{15} GeV	Inflación (?)
10^{-10} s	10^2 GeV	Ruptura de la simetría electrodébil (masa del W/Z)
10^{-5} s	300 MeV	Los quarks forman hadrones (neutrones, protones, etc)
1-3 min	0.3 MeV	Nucleosíntesis primordial (H, He, Li)
10^5 yrs	0.4 eV = 4000 K	Recombinación de núcleos y electrones (transparencia)
10^9 yrs	10 K	Estrellas, Galaxias; Las supernovas producen los elementos pesados
10^{10} yrs	3 K	Hoy

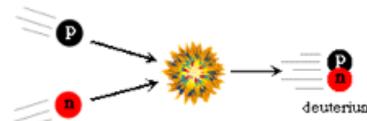
Universo

Nucleosíntesis primordial ("Big Bang Nucleosynthesis")

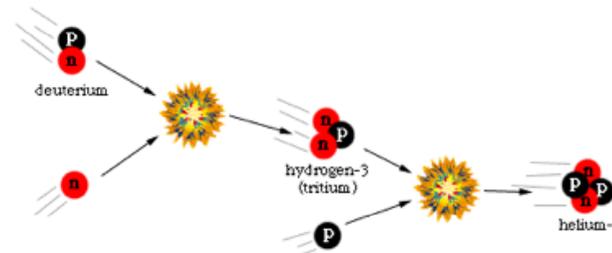
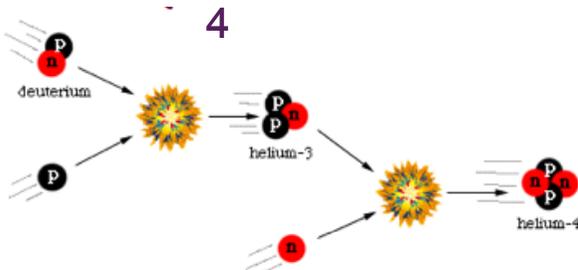
$t=1-3$ mn, $T=0.3-0.1$ MeV



- Formación de Deuterio



- Formación de Helio-



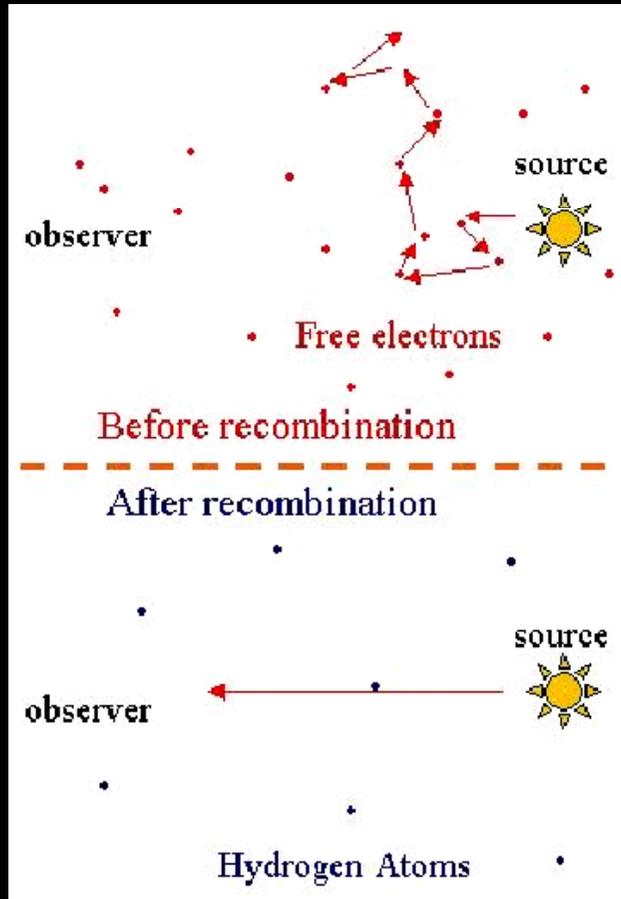
Fracción de masa en He=2/8=0.25

Fracción en H=0.75

Cociente n_{ν}/n_b controla la rapidez del paso intermedio

Universo

¿Cómo se produjo el fondo de radiación de microondas?



Los fotones se convierten en partículas libres cuando se produce la recombinación de los electrones y núcleos

(esto sucede cuando el Universo se enfría a una temperatura tal que la energía promedio de los fotones es menor que la energía de ligadura de los electrones en el átomo)

$t \sim 300000$ años

Esa radiación caliente liberada ha ido enfriándose y se observa como una radiación uniforme en el Universo, a 2.7K

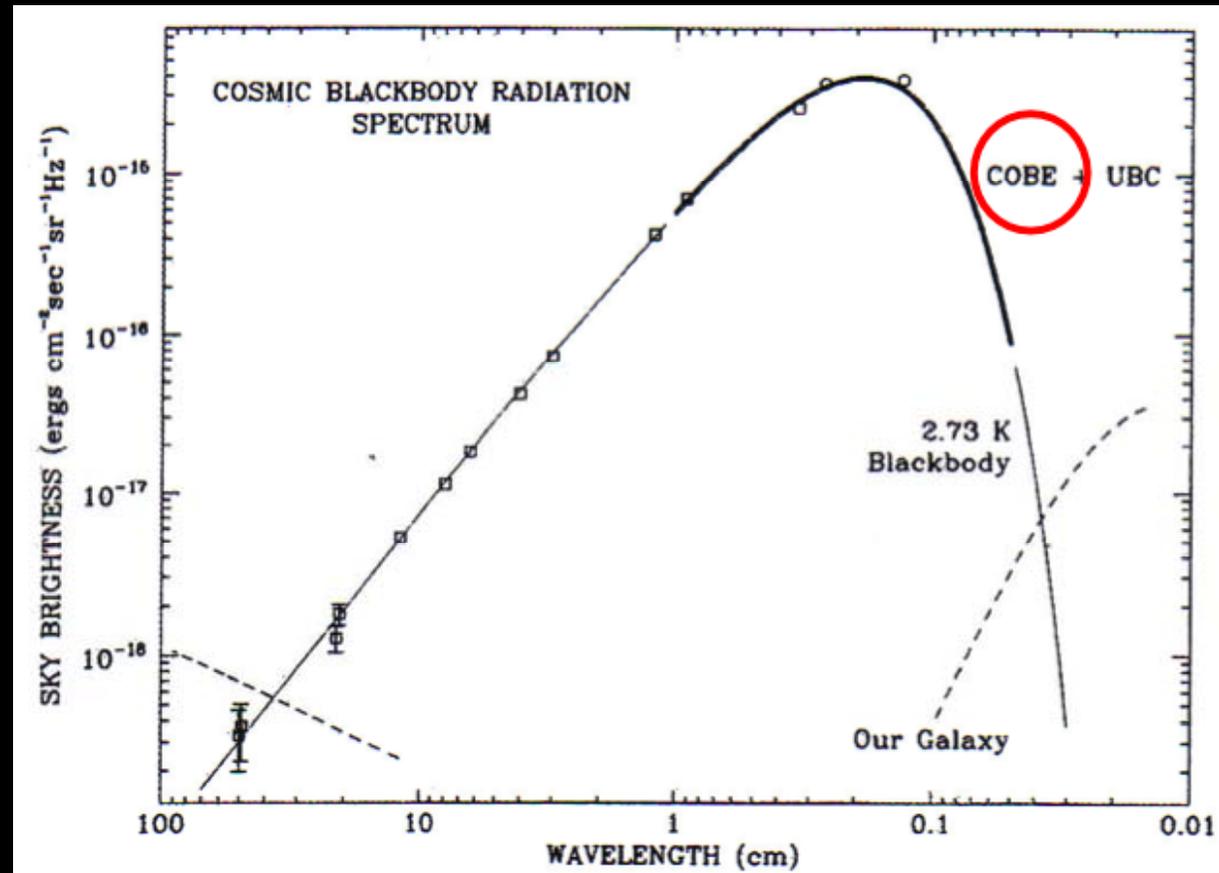
Universo

1963

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



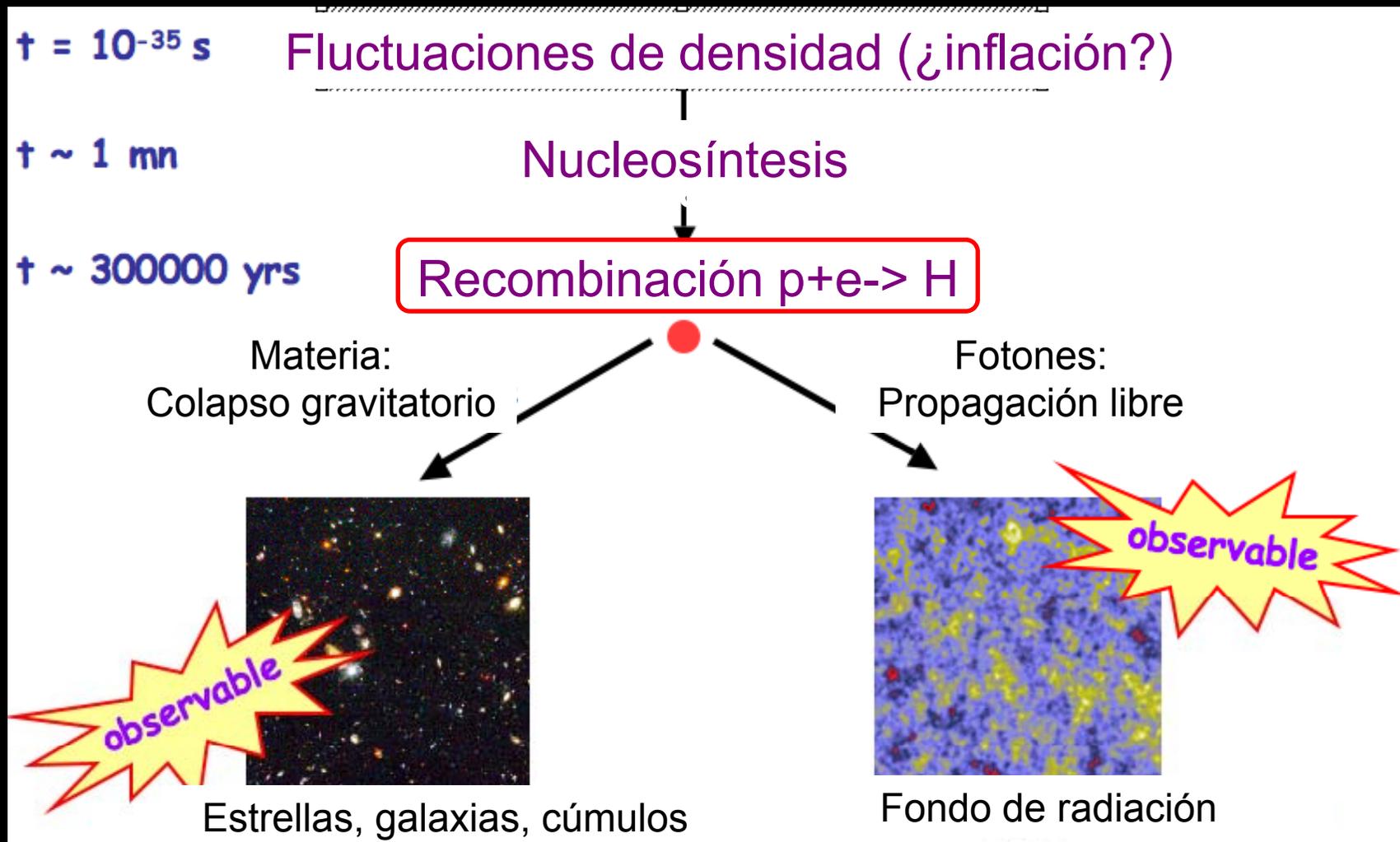
Penzias y Wilson



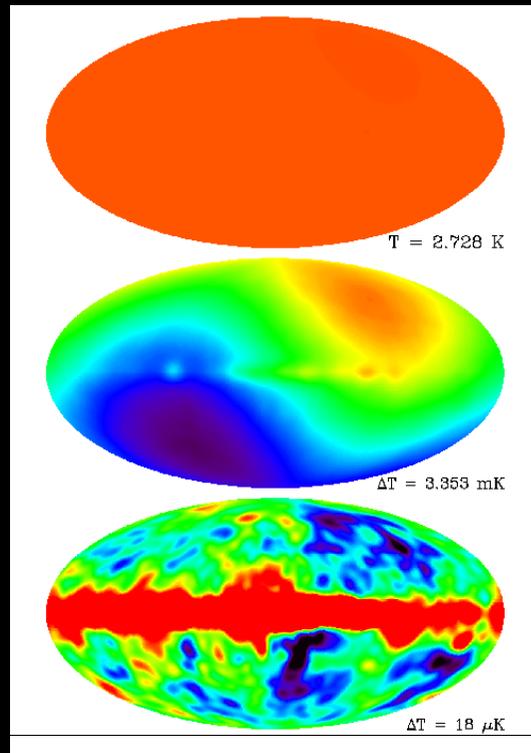
El Universo se comporta como un "cuerpo negro" perfecto,
con una temperatura $T = 2.73 \text{ K}$

Universo

Retrocedamos al comienzo del Universo



Estudio del fondo de radiación de microondas por el satélite COBE
(premio Nobel 2006)



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

$$\delta T = 3.3 \text{ mK}$$

(anisotropía tras eliminar
el modo constante)

$$\delta T = 18 \mu\text{K}$$

(anisotropía después de eliminar
el modo dipolar debido al
movimiento de la Tierra - efecto Doppler -)

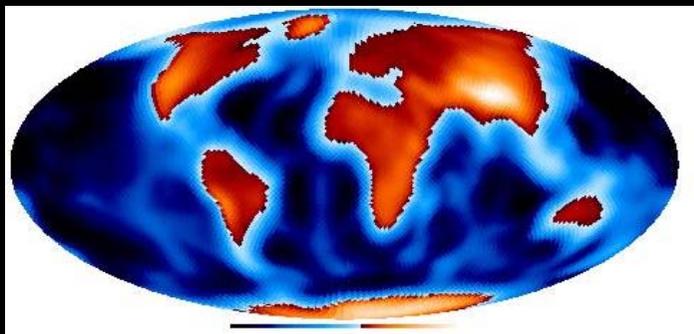
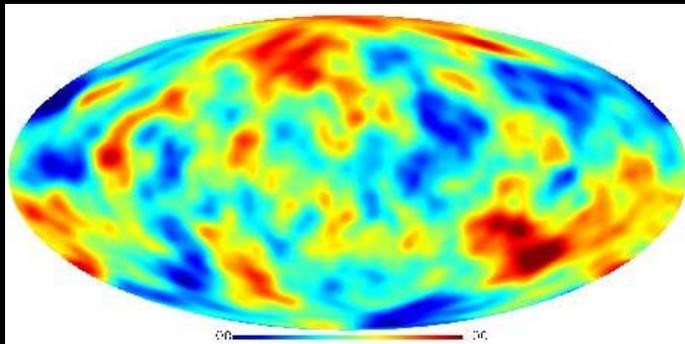
Las anisotropías en la temperatura se originan por el corrimiento al rojo debido a fluctuaciones primordiales en la densidad

La escala característica en el mapa es 300.000 años luz,
el tamaño del Universo observable en la época de desacoplamiento

Las observaciones más precisas hasta la fecha (WMAP)

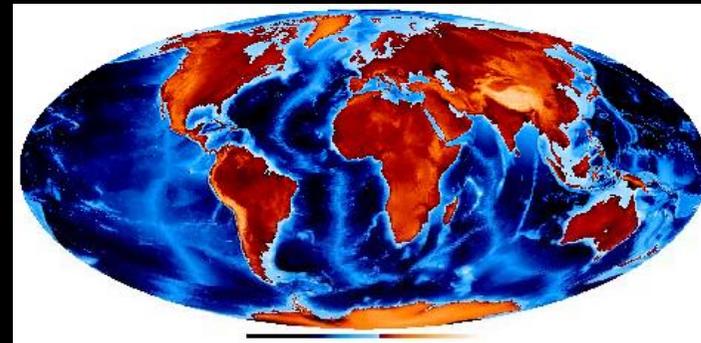
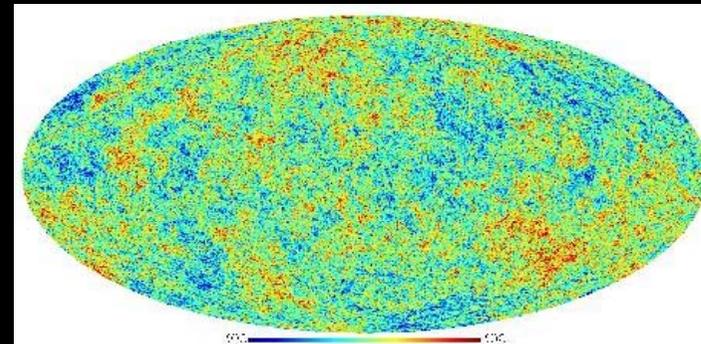
COBE

(resolución de 7 grados)



WMAP

(resolución de .25 grados)



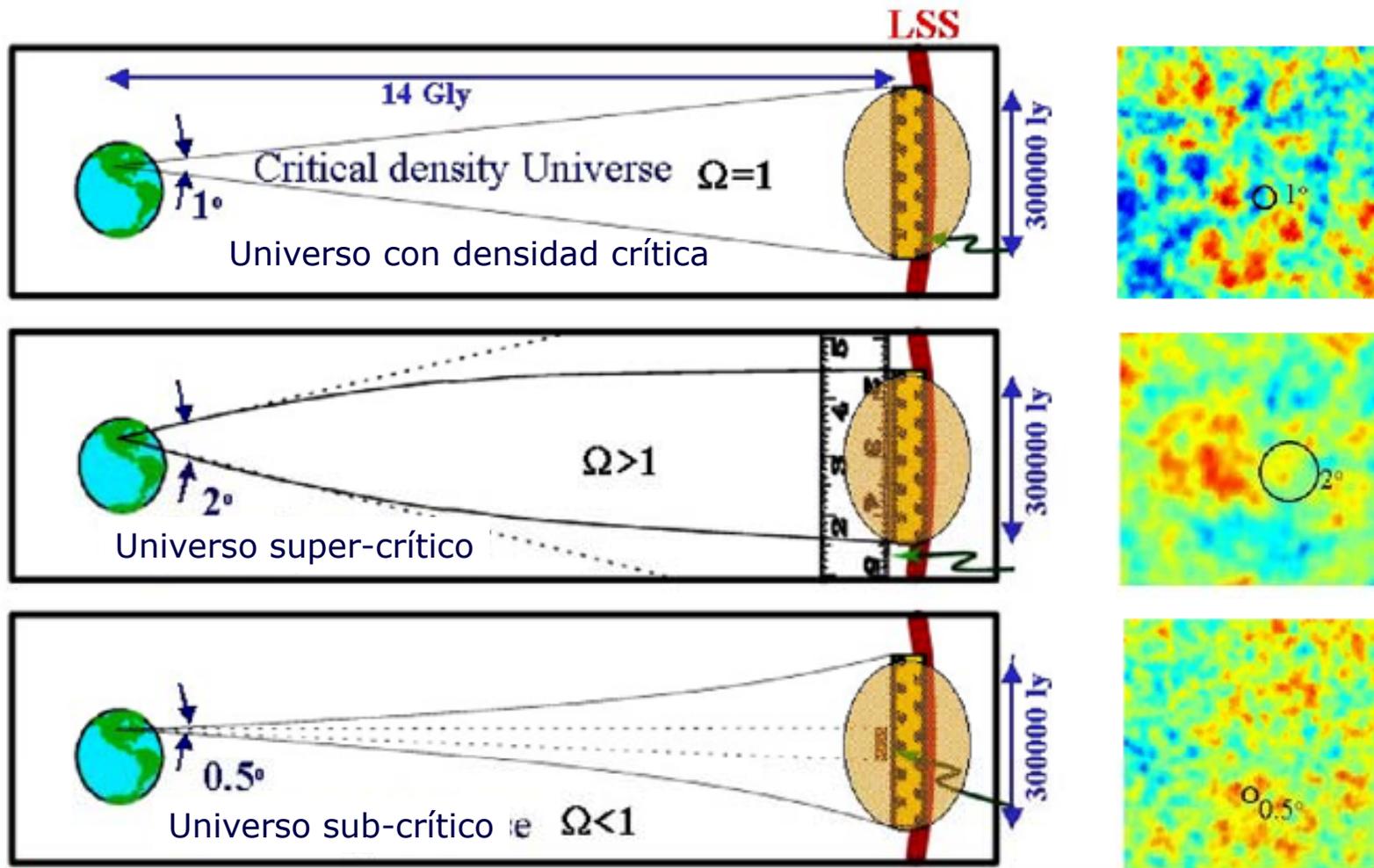
(analogía con resolución en mapas terrestres)

Universo

CMB: Las observaciones del experimento WMAP

Para ver esta película, debe
disponer de QuickTime™ y de
un descompresor TIFF (sin comprimir).

El análisis de las inhomogeneidades revela la composición del Universo



El tamaño aparente de la escala de anisotropía depende de

Ω_{tot}

Universo

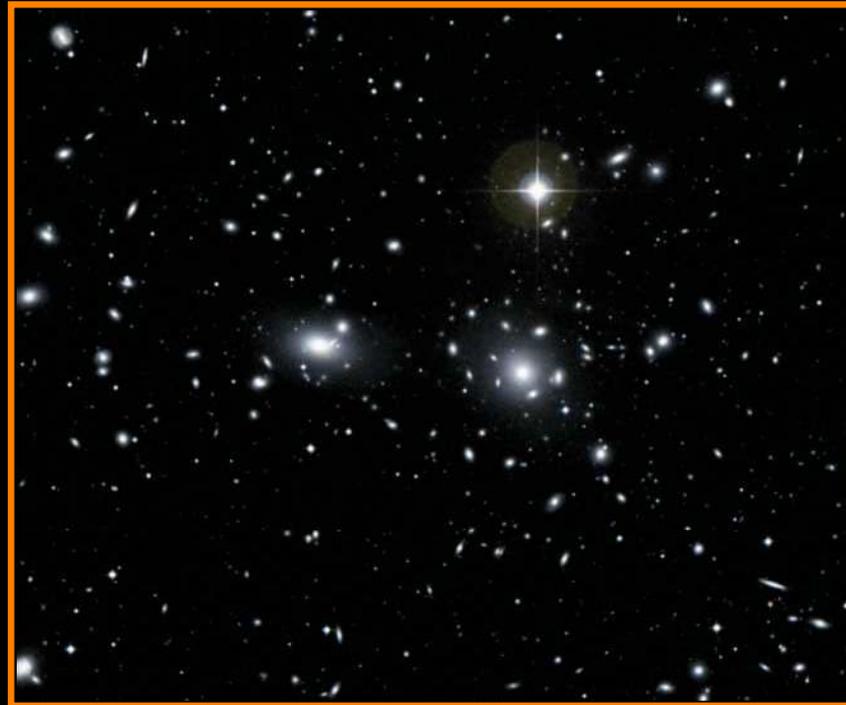
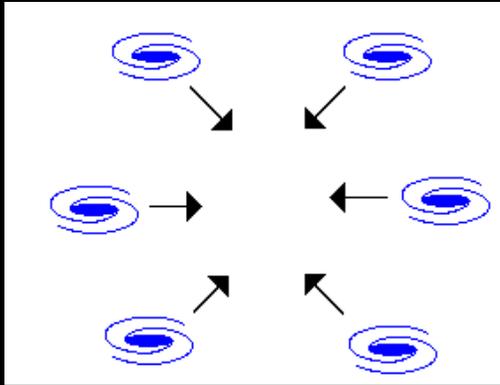
2003

La extraña composición del Universo



Universo

Indicios de la existencia de **Materia oscura** (1933)



Zwicky

Fritz Zwicky

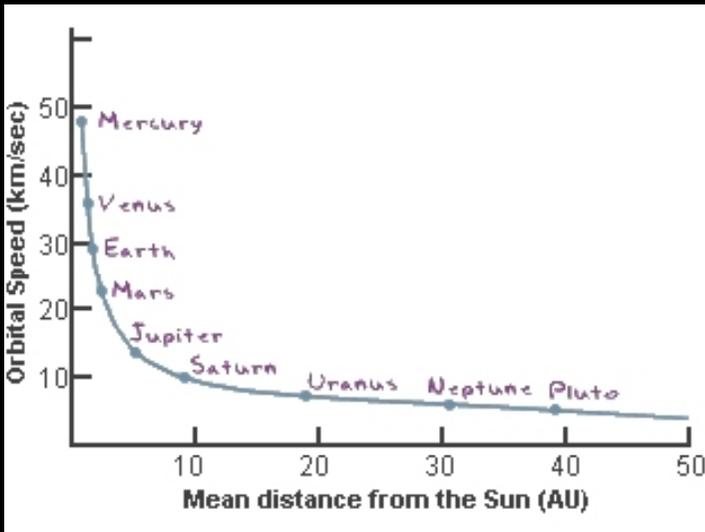
Masa de la materia visible =
10% masa gravitatoria total

Universo

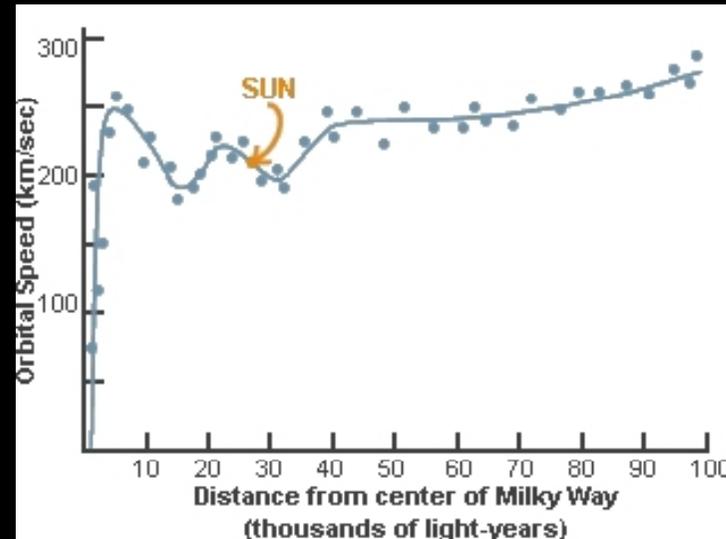
MÁS EVIDENCIA A FAVOR DE LA “MATERIA OSCURA”



Curvas de rotación: Velocidad orbital vs. distancia radial
(Usando la masa visible se predice una dependencia $r^{-1/2}$)



Sistema Solar (una masa central)



Galaxia (Vía Láctea)

AÚN MÁS EVIDENCIA DE “MATERIA OSCURA”

LENTES GRAVITACIONALES (“GRAVITATIONAL LENSING”)

La imagen de objetos luminosos se distorsiona por efecto gravitacional de materia oscura en la trayectoria de la luz

Para ver esta película, debe disponer de QuickTime™ y de un descompresor TIFF (sin comprimir).

Para ver esta película, debe disponer de QuickTime™ y de un descompresor TIFF (sin comprimir).

¡AÚN HAY MÁS!

Para ver esta película, debe
disponer de QuickTime™ y de
un descompresor TIFF (sin comprimir).

Colisión de galaxias:

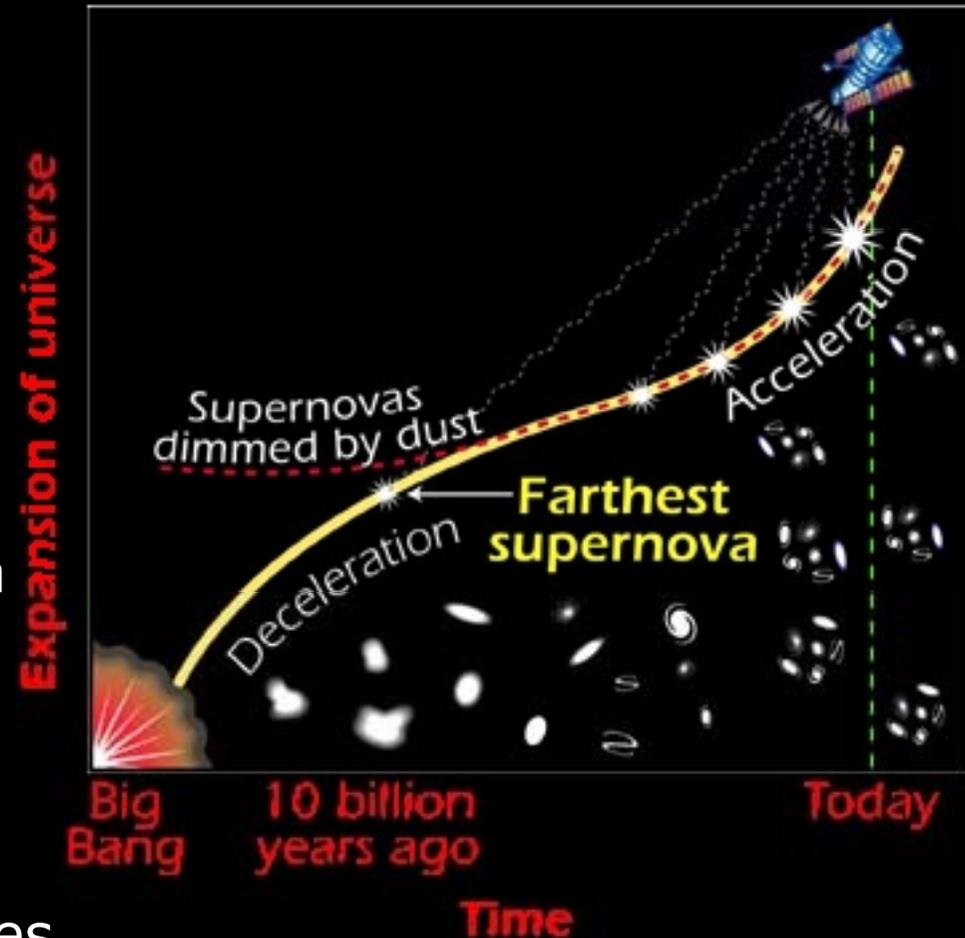
Las regiones rojas corresponden a materia visible en colisión violenta,
(emisión de rayos X, detectados por el satélite Chandra)

Las regiones azules corresponden a materia con efecto gravitacional
(detectada por “lensing”) que no siente la colisión -> materia oscura

Evidencia de "Energía Oscura"

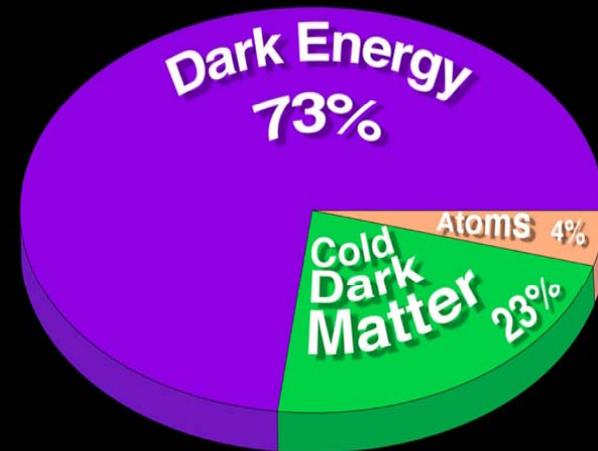
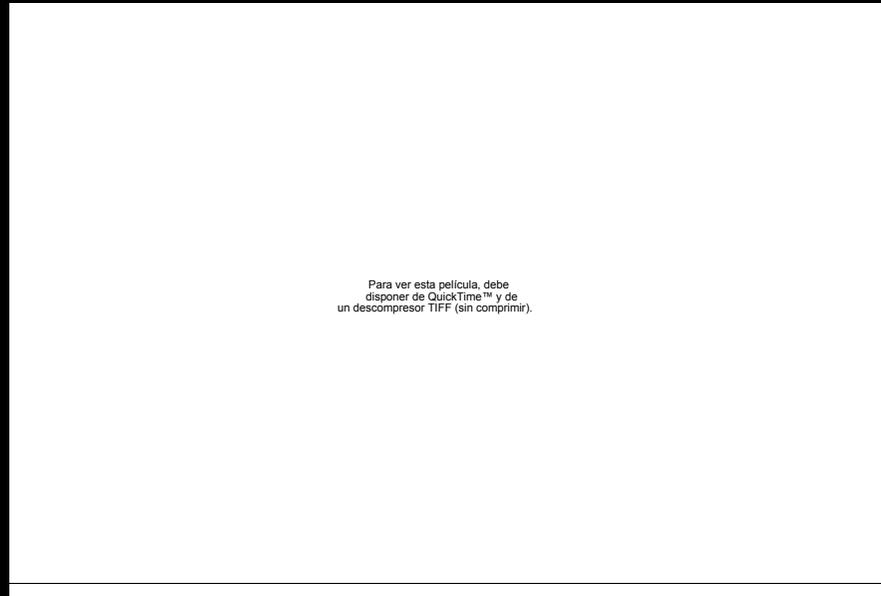
Medida de la expansión de Hubble

- 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 constante cosmológica! (Einstein): energía del vacío



Universo (2007)

El modelo estándar de la Cosmología
(Λ 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”)

Materia oscura y energía oscura

Las primeras etapas del Universo

Asimetría materia-antimateria

...

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

1) ¿Cómo adquieren masa las partículas? El campo de Higgs

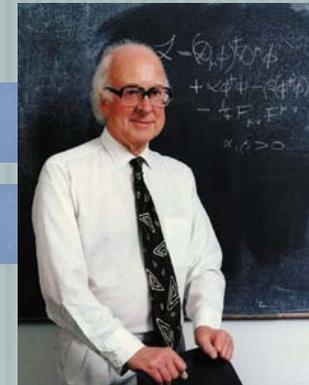
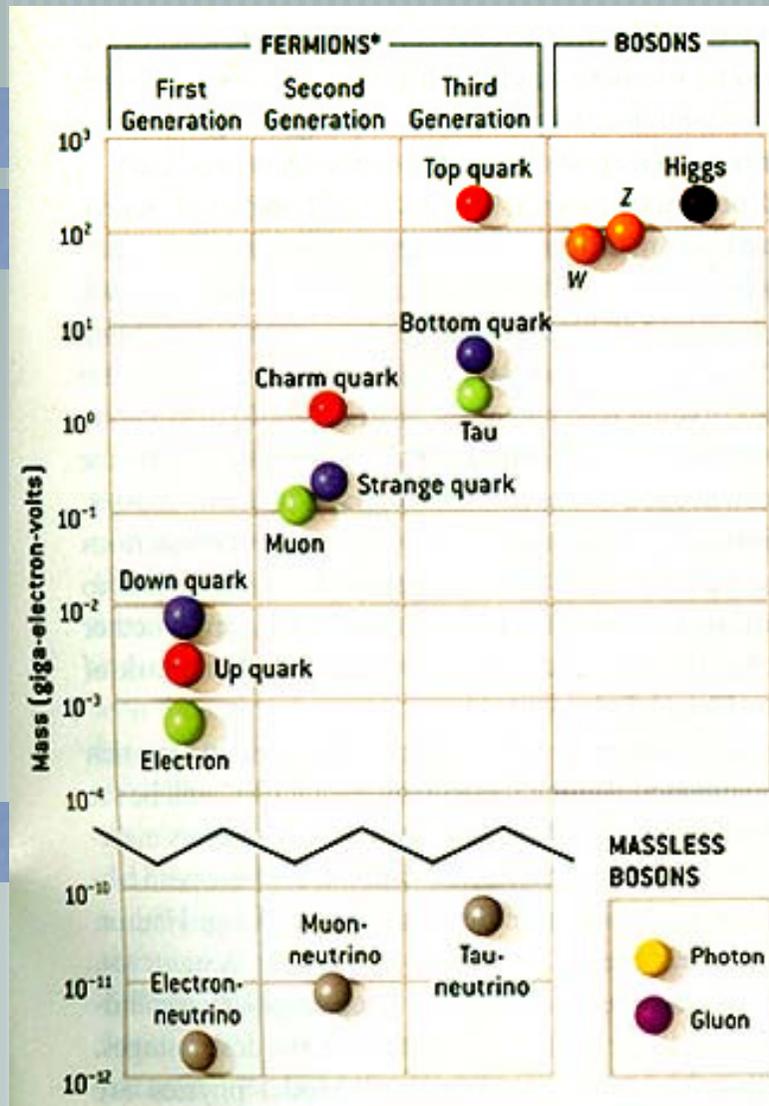
1 TeV →

100 GeV →

1 GeV →

1 MeV →

0.01 eV →



Peter Higgs

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

2) ¿Hay más simetrías en la Naturaleza? ¿Supersimetría?

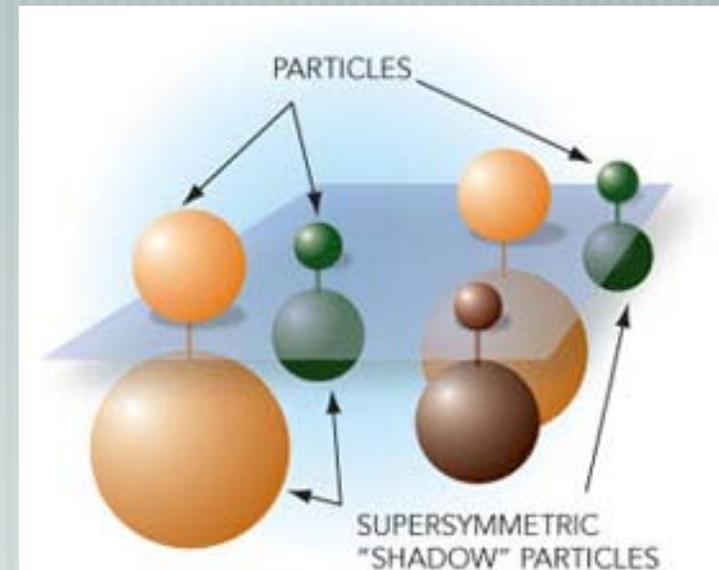
La simetría juega un papel fundamental en la física de las partículas elementales (p.ej. QCD -> simetría de color, teoría electrodébil -> simetría electrón/neutrino) ▪

Supersimetría es una simetría que relaciona fermiones (spin 1/2) y bosones (spin 0, 1)

En supersimetría:

Cada partícula del modelo estándar tiene una partícula supersimétrica asociada, con spin diferente (super-compañero)

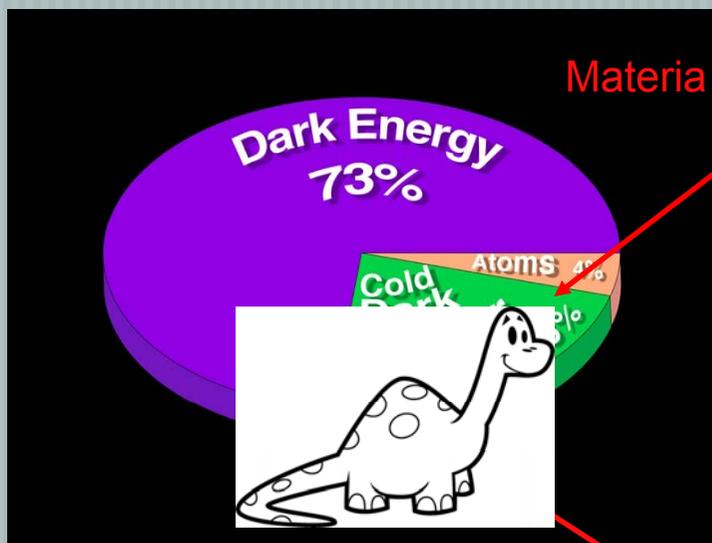
Spin 1/2	Spin 1
leptón	sleptón
quark	squark
Wino	W/Z
fotino	fotón
gluino	gluón



**Si estas partículas existen, serán muy pesadas (> 200 GeV)
Pero muy posiblemente estén al alcance del LHC**

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

3) ¿De qué está hecho el 96% de la energía del Universo?



Materia de tipo conocido

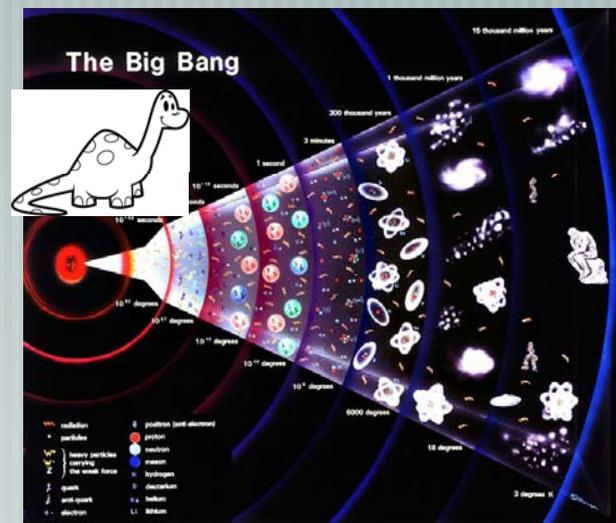


- **Materia oscura:** Partículas pesadas estables
Reliquias del Universo primordial
En supersimetría, partículas supersimétricas

- **Energía oscura:**

¿Constante cosmológica?

¿Un nuevo tipo de materia? ("quintaesencia")

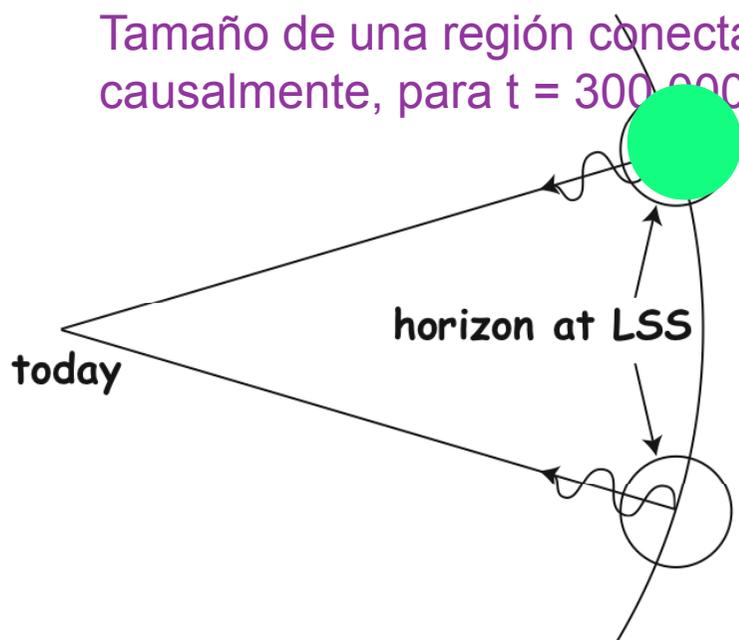


PREGUNTAS PARA EL s.XXI

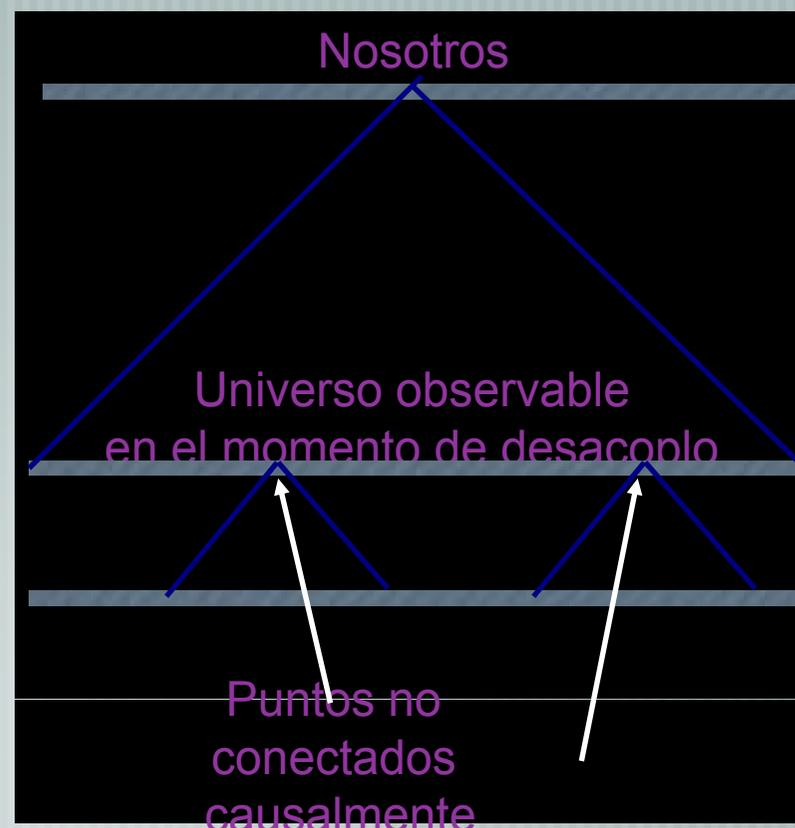
4) ¿Cómo fueron los primeros instantes del Universo? Inflación

- ¿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



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

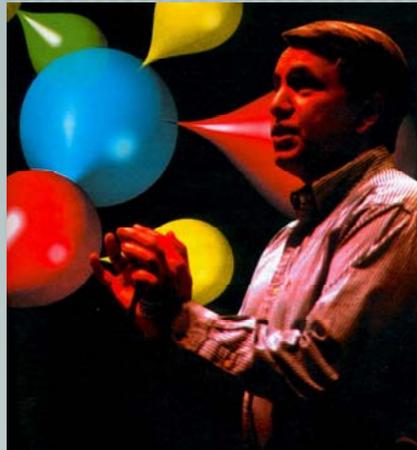


PREGUNTAS PARA EL s.XXI

Alan Guth / Andrei Linde, 1980: Inflación

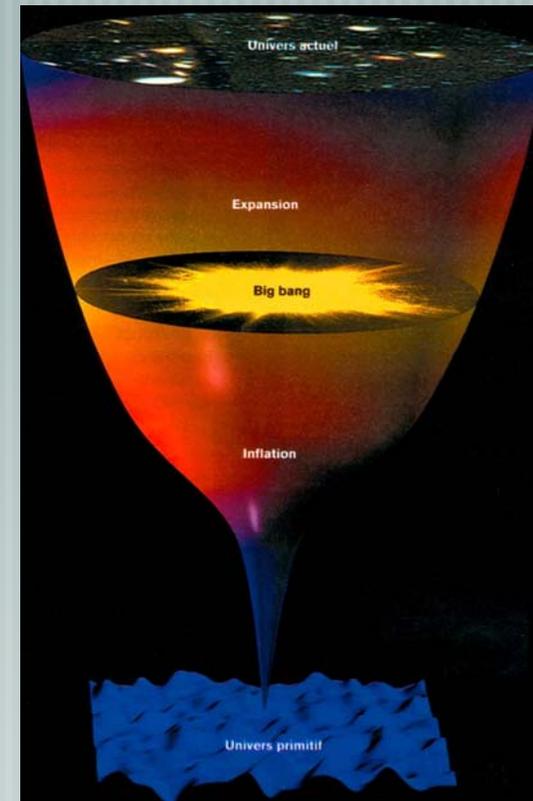
El Universo tuvo una fase de expansión superluminal, inducida por un campo denominado "inflatón"

Para ver esta película, debe disponer de QuickTime™ y de un descompresor TIFF (sin comprimir).



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?

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

5) ¿Unificación de las interacciones? ¿Gravedad y Mecánica Cuántica? ¿...?

- Teoría de cuerdas

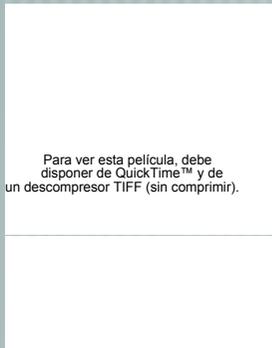


La teoría de (super)cuerdas describe la gravedad a nivel cuántico (gravitón)

Todas las partículas (incluido el gravitón) son diferentes estados de vibración de un único tipo de cuerda -> Unificación

Idea muy atractiva, pero todavía sin evidencia experimental

- Dimensiones extra



Ciertas teorías (p.ej. Teoría de cuerdas) predicen la existencia de dimensiones adicionales, de tamaño microscópico.

Si son suficientemente grandes, podrían explicar la debilidad de la interacción gravitacional: La gravedad tiene un acoplamiento similar a las otras interacciones, pero los gravitones escapan en las dimensiones extra

En estos modelos, el LHC podría producir procesos donde la interacción gravitatoria es relevante, p.ej. Producción de mini agujeros negros!

- Agujeros negros y Mecánica Cuántica

Radiación de Hawking, el problema de la información, el principio holográfico, ..

Multitud de ideas nuevas: ¿qué nos espera en el próximo nivel de conocimiento de la Naturaleza?

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

COMIENZO DEL FUNCIONAMIENTO DEL
LHC EN 2008



¡Nuevas respuestas!

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

Para ver esta película, debe
disponer de QuickTime™ y de
un descompresor TIFF (sin comprimir).

Colisiones protón-protón
(2835 paquetes en cada haz,
 10^{11} protones en cada haz)

a una energía sin precedentes
7TeV por cada haz

con una luminosidad de 10^{34} cm⁻² seg⁻¹

a un ritmo furioso

40 millones de cruces paquetes por segundo;
entre 10 y 1000 millones de colisiones por segundo

con un análisis exhaustivo de datos
(p.ej. La producción de Higgs sucede
1 de cada 10.000.000.000.000 veces)

**UN EXPERIMENTO CRUCIAL,
Y UN MOMENTO HISTÓRICO EN LA FÍSICA**

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

1900 - 2000: Progreso asombroso en la comprensión de la estructura de la materia y del Universo

Hemos aprendido de qué está hecha la materia
Hemos aprendido las etapas principales en la evolución del Universo

Ahora nos enfrentamos a un nuevo nivel de preguntas más profundas

Para ver esta película, debe disponer de QuickTime™ y de un descompresor TIFF (sin comprimir).

Los quarks y leptones, ¿son elementales?

¿Están relacionados de algún modo?

(p.ej. ¿por qué la carga del electrón y del protón son exactamente opuestas?)

¿Existen más tipos de materia? (Materia oscura)

¿Existen más tipos de interacciones?

¿Por qué hay 3 familias?

¿Están las diferentes constantes fundamentales relacionadas?

¿Por qué casi no hay antimateria en el Universo? (bariogénesis)

¿Cuál es el mecanismo de inflación?

¿Qué es la energía oscura?

(paradójicamente, lo que menos entendemos en el Universo es el vacío)

¿Unificación de partículas y de interacciones?

¡Esta es la Física del s.XXI!