

Introducción a Física de Partículas y Cosmología del siglo XX

4/4

Diego Blas



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

(basado en previas presentaciones de F. Marchesano y Á. Uranga)

Mecánica Clásica,
Teoría Cinética,
Termodinámica

Boltzmann

Maxwell

Newton

Partículas

Campos

Universo

Tecnología

Electromagnético Débil Fuerte

Detectores Aceleradores

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

e^-

Átomo

Núcleo

p^+

e^+

n

μ^-

π

τ^-

p^+

ν_e

u d s

ν_μ

c

τ^-

b

ν_τ

1990

2000

Masas de neutrinos

Movimiento Browniano

Fotón

Radioactividad

Relatividad especial

Mecánica Cuántica
Onda / partícula
Fermiones / Bosones

Dirac
Antimateria

Desintegración beta

Mesones de Yukawa

QED

Violación de P, C, CP

Higgs

Bosones W
Unificación electrodébil

Gran unificación?
Supersimetría?

Supercuerdas?

W

Z

g

3 familias

Rayos cósmicos

Relatividad General

Galaxias ; Universo en expansión; modelo del Big Bang

Materia oscura

Fusión nuclear

Nucleosíntesis cosmológica

Fondo de radiación de microondas

Inflación

Inhomogeneidades del fondo de microondas

Energía oscura

Geiger

Cámara de niebla

Ciclotrón

Sincrotrón

Cámara de burbujase

Aceleradores e^+e^-

Cámara de hilos

Enfriamiento de haces

Ordenadores online

Detectores modernos

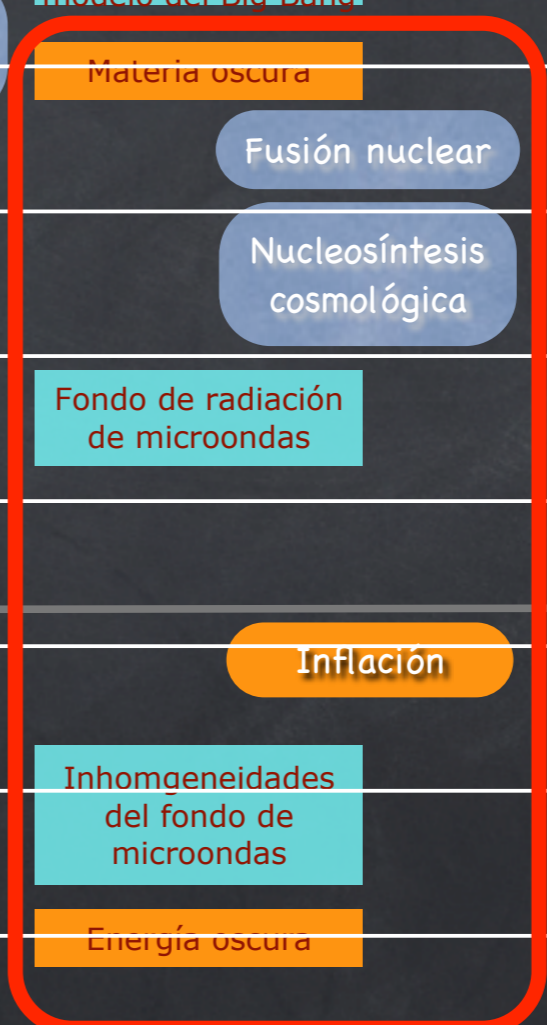
Aceleradores p^+p^-

WWW

GRID

Zoo de partículas

MODELO ESTÁNDAR



Mecánica Clásica,
Teoría Cinética,
Termodinámica

Boltzmann

Maxwell

Newton

Partículas

Campos

Universo

Tecnología

Electromagnético Débil Fuerte

Detectores Aceleradores

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

e^-

Átomo

Núcleo

p^+

e^+

n

μ^-

π

τ^-

p^+

ν_e

u d s

ν_μ

c

τ^-

b

ν_τ

Masas de neutrinos

Movimiento Browniano

Fotón

Radioactividad

Relatividad especial

Mecánica Cuántica
Onda / partícula
Fermiones / Bosones

Dirac
Antimateria

Desintegración beta

Mesones de Yukawa

QED

Violación de P, C, CP

Higgs

Bosones W
Unificación electrodébil

Gran unificación?

Supersimetría?

Supercuerdas?

W Z

g

3 familias

Rayos cósmicos

Relatividad General

Galaxias ; Universo en expansión; modelo del Big Bang

Materia oscura

Fusión nuclear

Nucleosíntesis cosmológica

radiación de fondo

Inflación

Geiger

Cámara de niebla

Ciclotrón

Sincrotrón

Cámara de burbujase

Aceleradores e^+e^-

Enfriamiento de haces

Ordenadores online

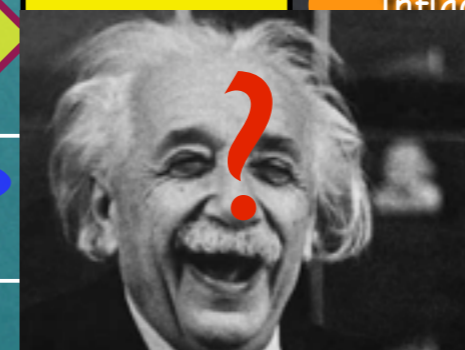
Detectores modernos

Aceleradores p^+p^-

WWW

GRID

RG?



Visión del Universo hacia 1960

- **Universo a gran escala: homogéneo e isótropo**
similar en cualquier punto y dirección

- **En expansión, con velocidad $H_0 = \dot{a}/a$**
(en 1960, estimada en $H \sim 50-100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$)
Hoy: $H = 70 \pm 3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

- **Big Bang: El Universo tiene un comienzo**

Edad del Universo (H_0^{-1})
(en 1960, estimada en 10-20 mil millones de años)
Hoy: 13.4 mil millones de años

Consistente con la edad de los objetos conocidos
p.ej. Sol ~ 4.7 mil millones de años

- **Comienzo comprimido y caliente, posterior expansión y enfriamiento**

Nucleosíntesis primordial

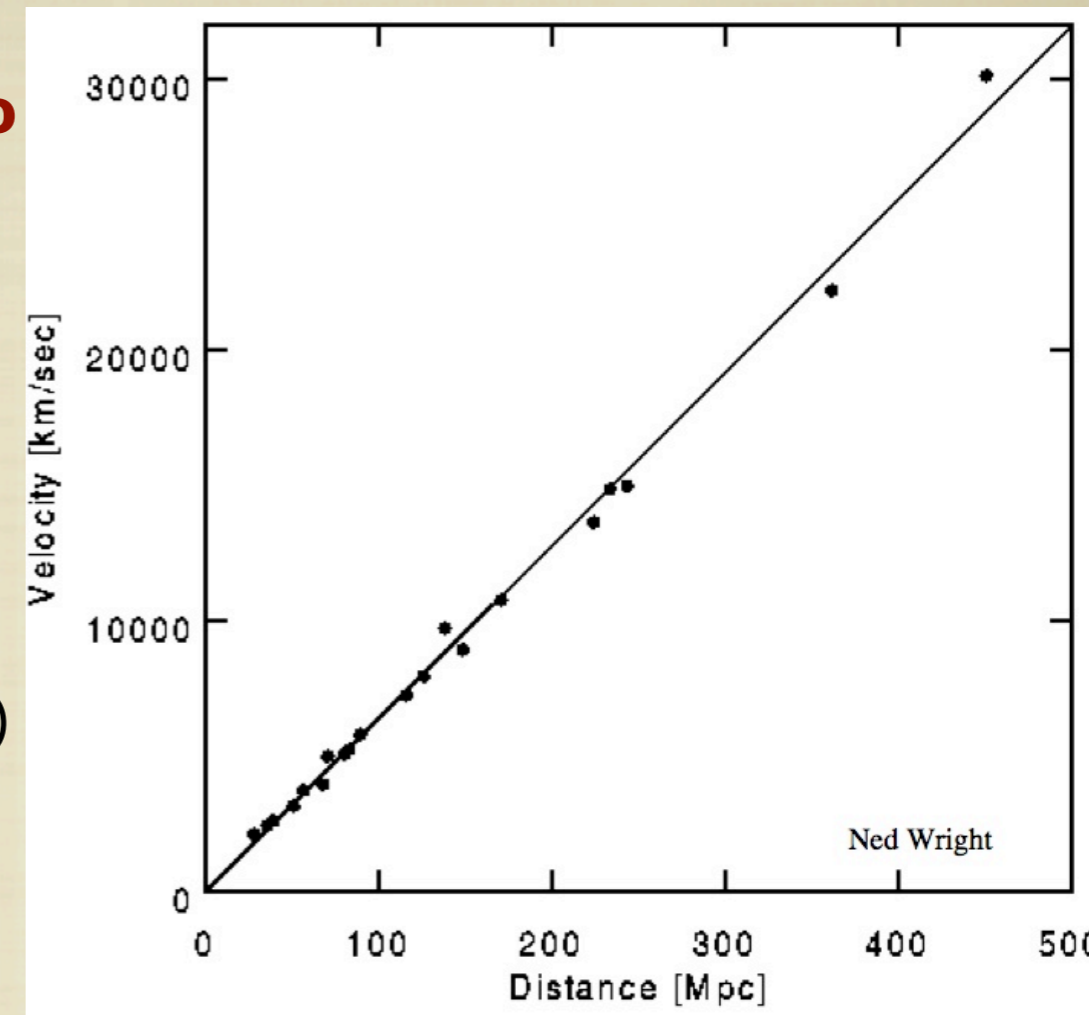
La sopa caliente de protones y neutrones se enfría y se forman núcleos ligeros

Fondo de radiación de microondas

La sopa caliente de núcleos y electrones se enfría y se forman átomos.

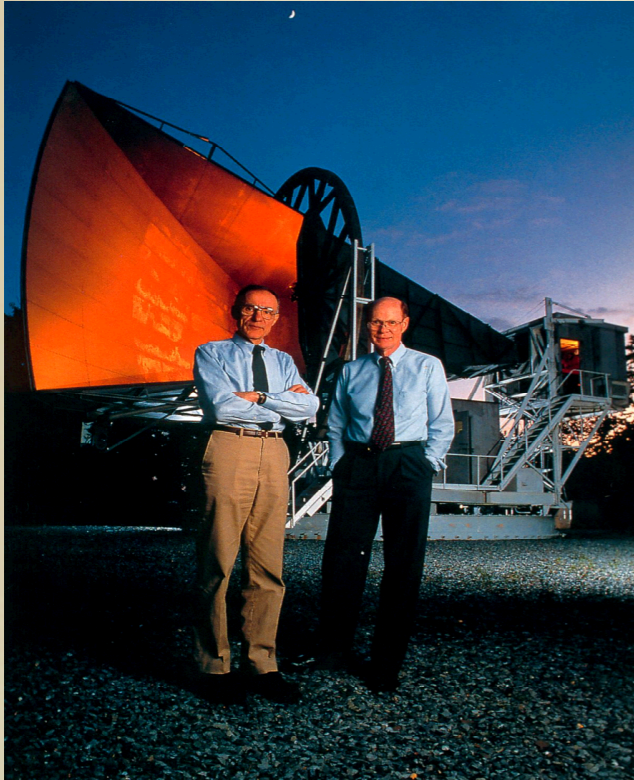
El Universo se vuelve transparente a los fotones

Predicción de un fondo de radiación, corrido al rojo hasta $T \sim 5\text{K}$

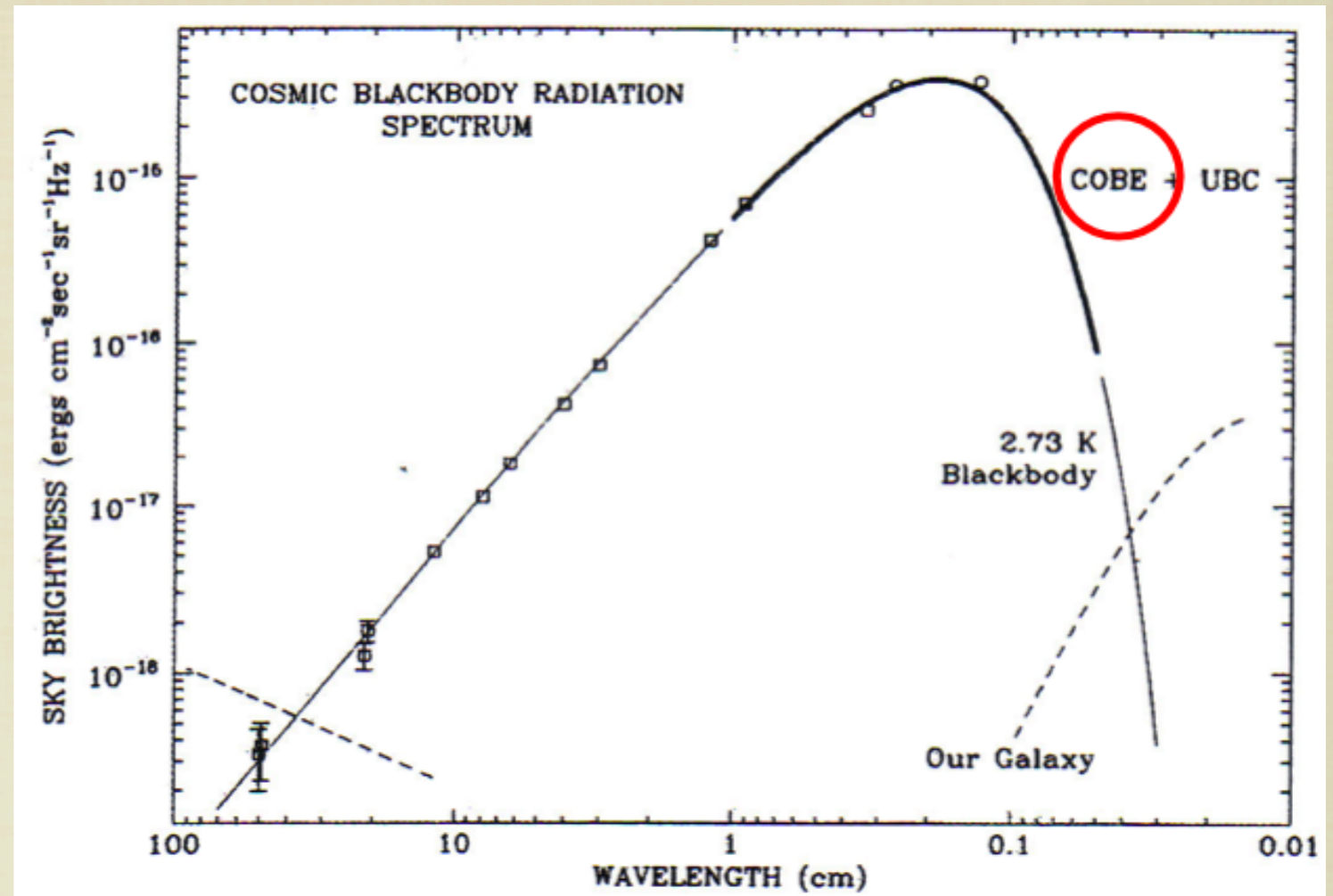




Descubrimiento del fondo de radiación de microondas 'Cosmic Microwave Background' (CMB)



A. Penzias y R. Wilson



Radiación con espectro de cuerpo negro a temperatura de 3K

Se acepta la teoría del Big Bang

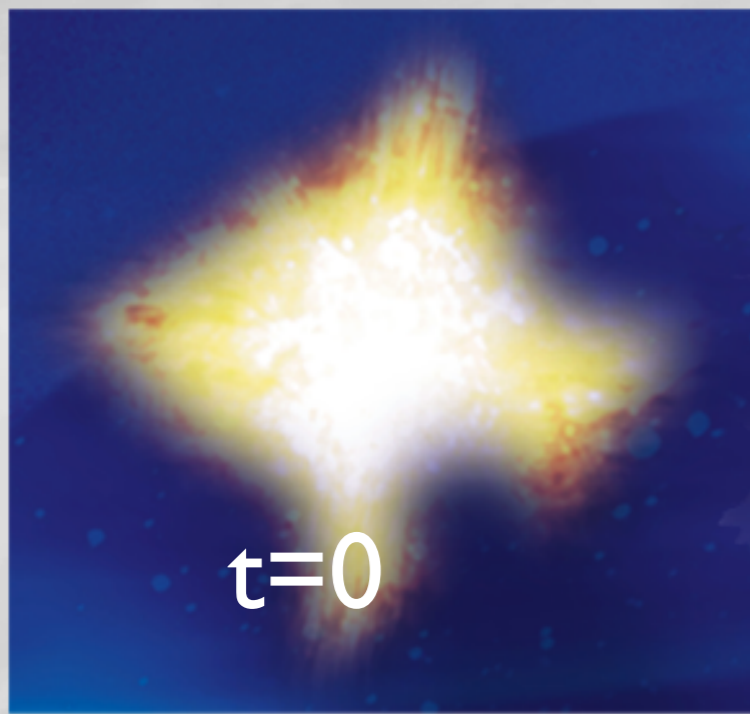
COSMOLOGÍA

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

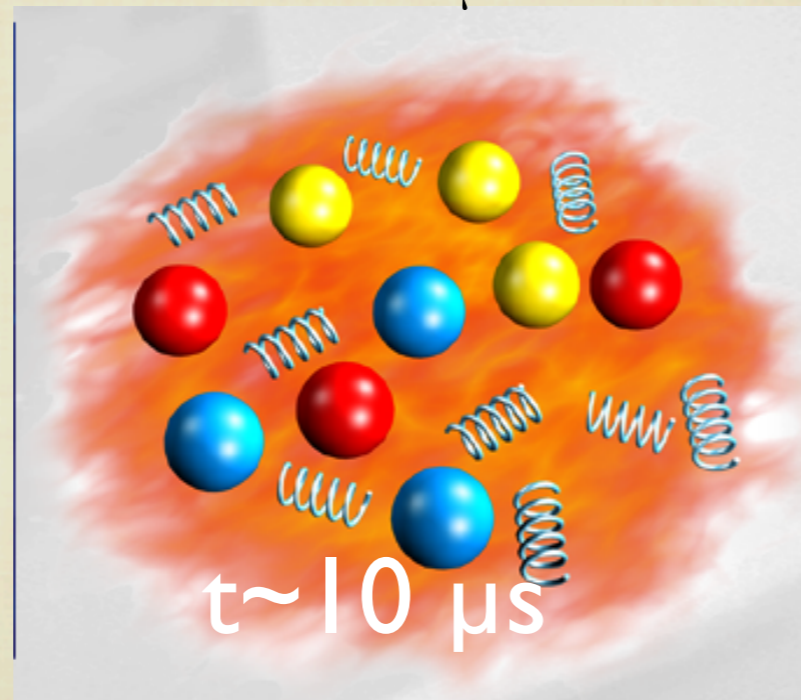
$t=0$



$t=0$

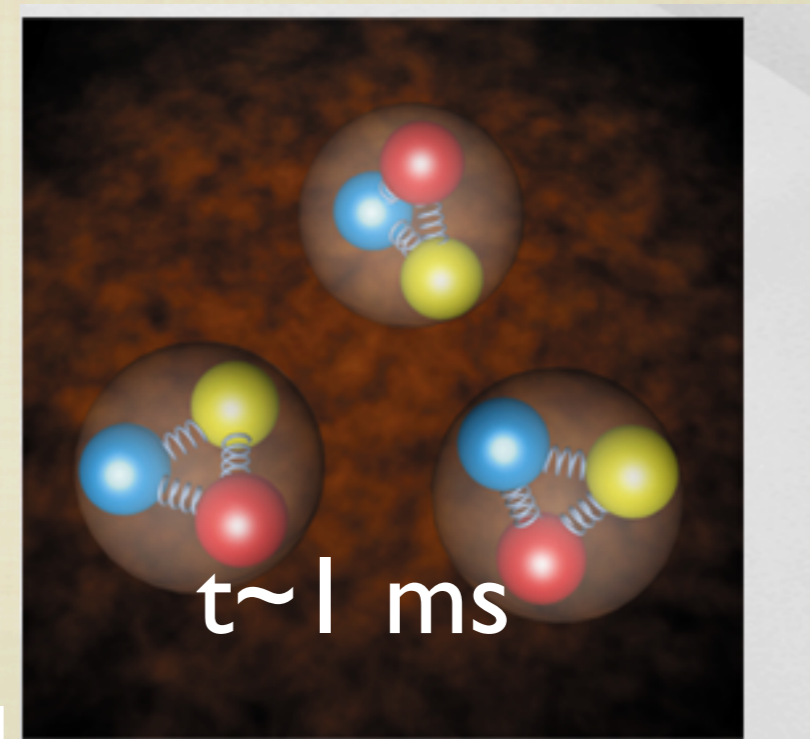
Big Bang

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



Plasma de partículas

$t \approx 1 \text{ms}$



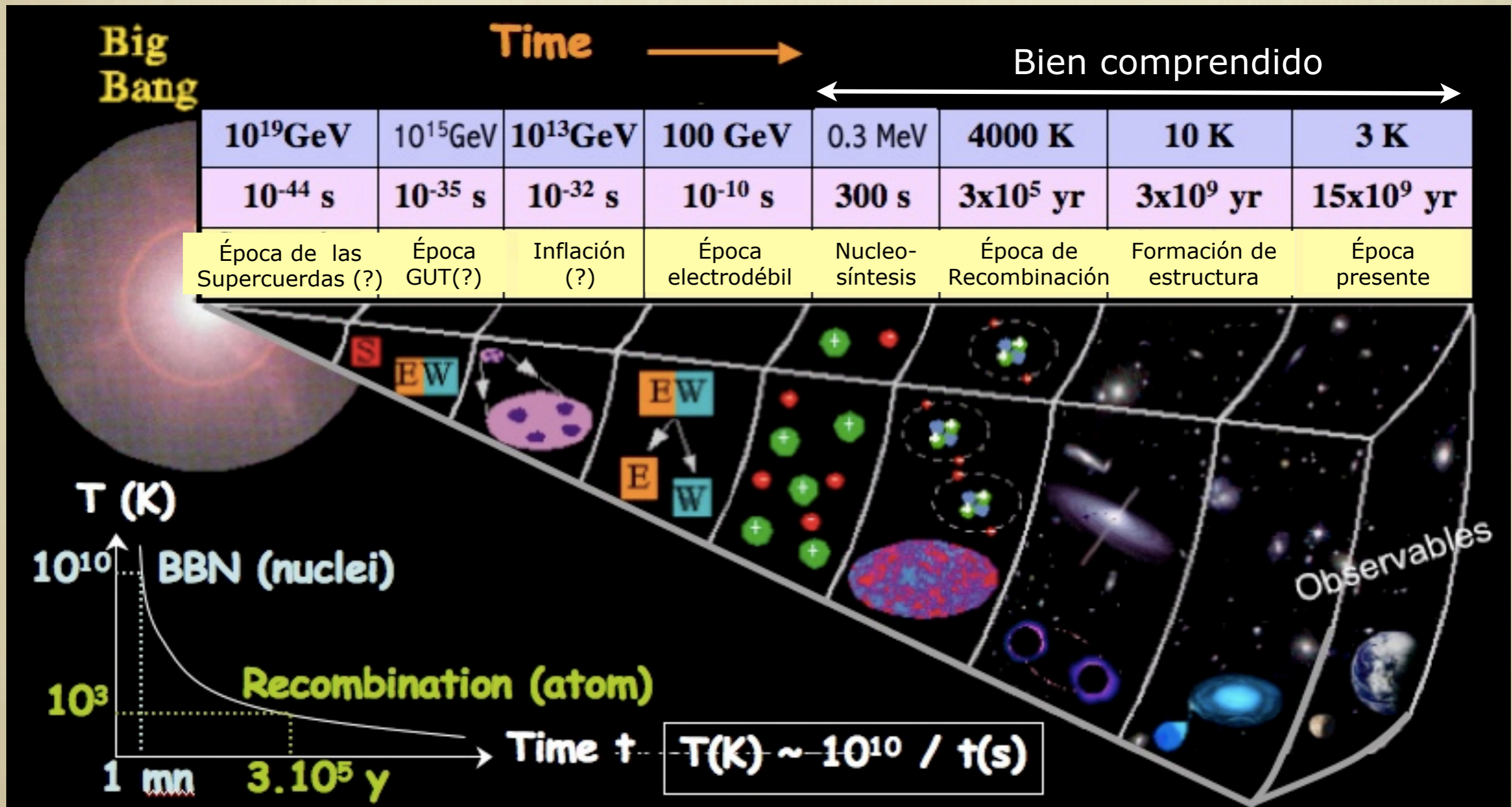
Nucleones



COSMOLOGÍA

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

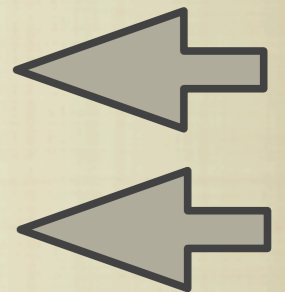
Pero nos proporcionan una imagen bastante detallada de la evolución del Universo a partir de las primeras fracciones de segundo



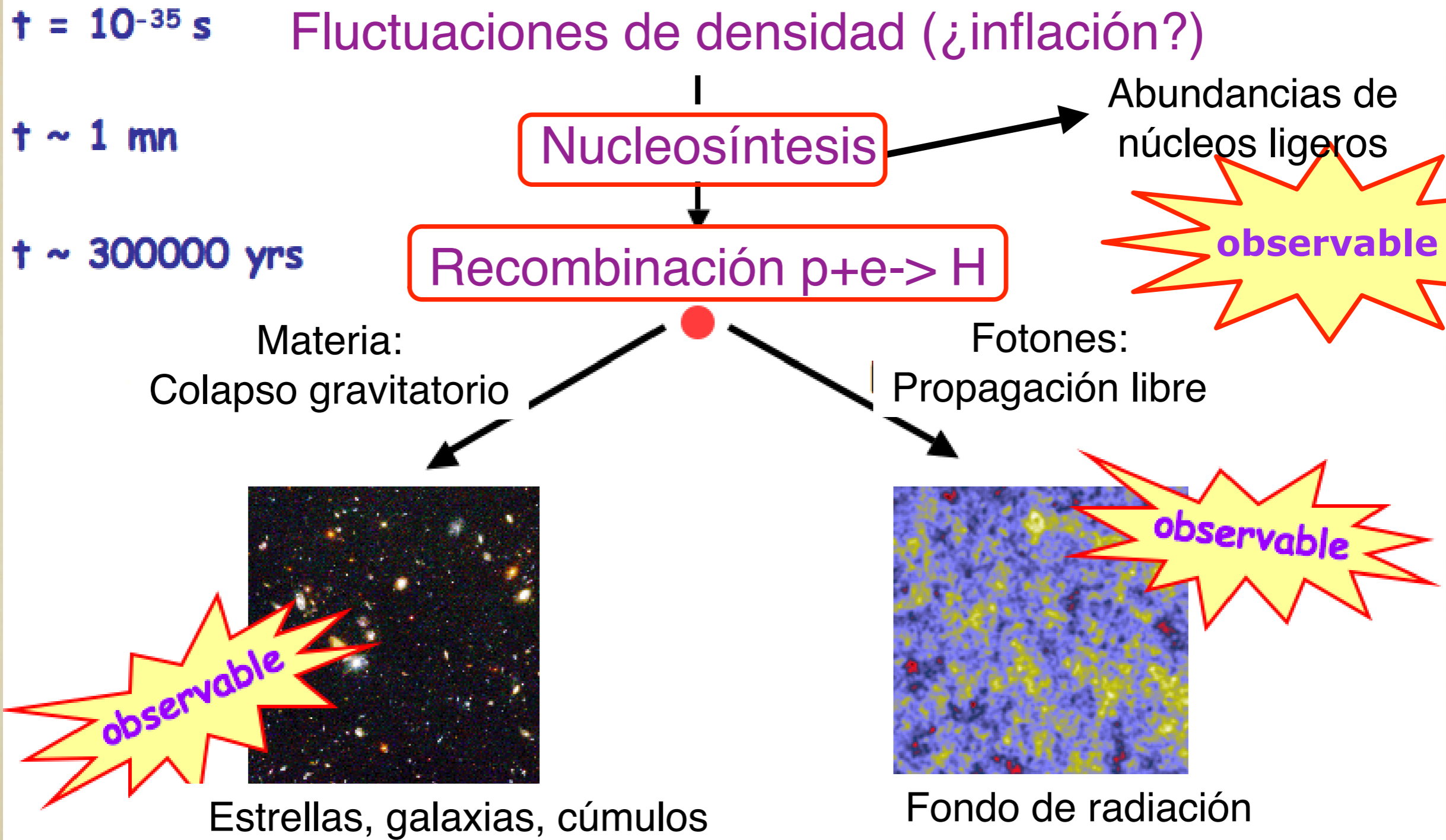
COSMOLOGÍA

Evolución a partir del Big Bang

Tiempo (sec)	Temperatura (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 años	0.4 eV = 4000 K	Recombinación de núcleos y electrones (transparencia)
10^9 años	10 K	Estrellas, Galaxias; Las supernovas producen los elementos pesados
10^{10} yrs	3 K	Hoy



Nos centramos en nucleosíntesis y recombinación





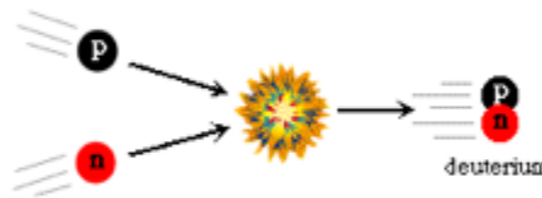
Nucleosíntesis primordial ("Big Bang Nucleosynthesis")

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

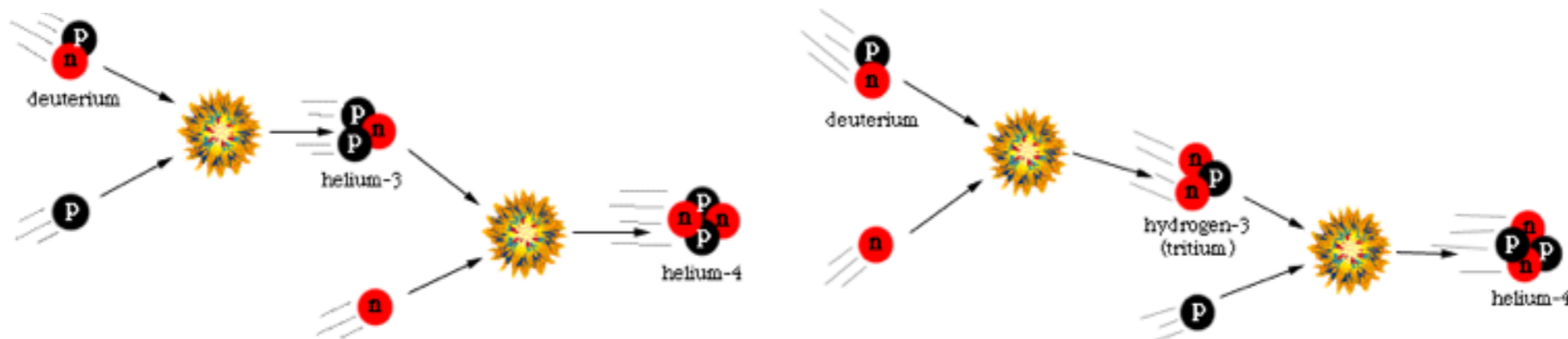
- Desintegración del neutrón



- Formación de Deuterio



- Formación de Helio-4



Fracción de masa en He = $2/8 = 0.25$

Fracción en H = 0.75

El cociente n_y/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 ~ 0.000000002 %

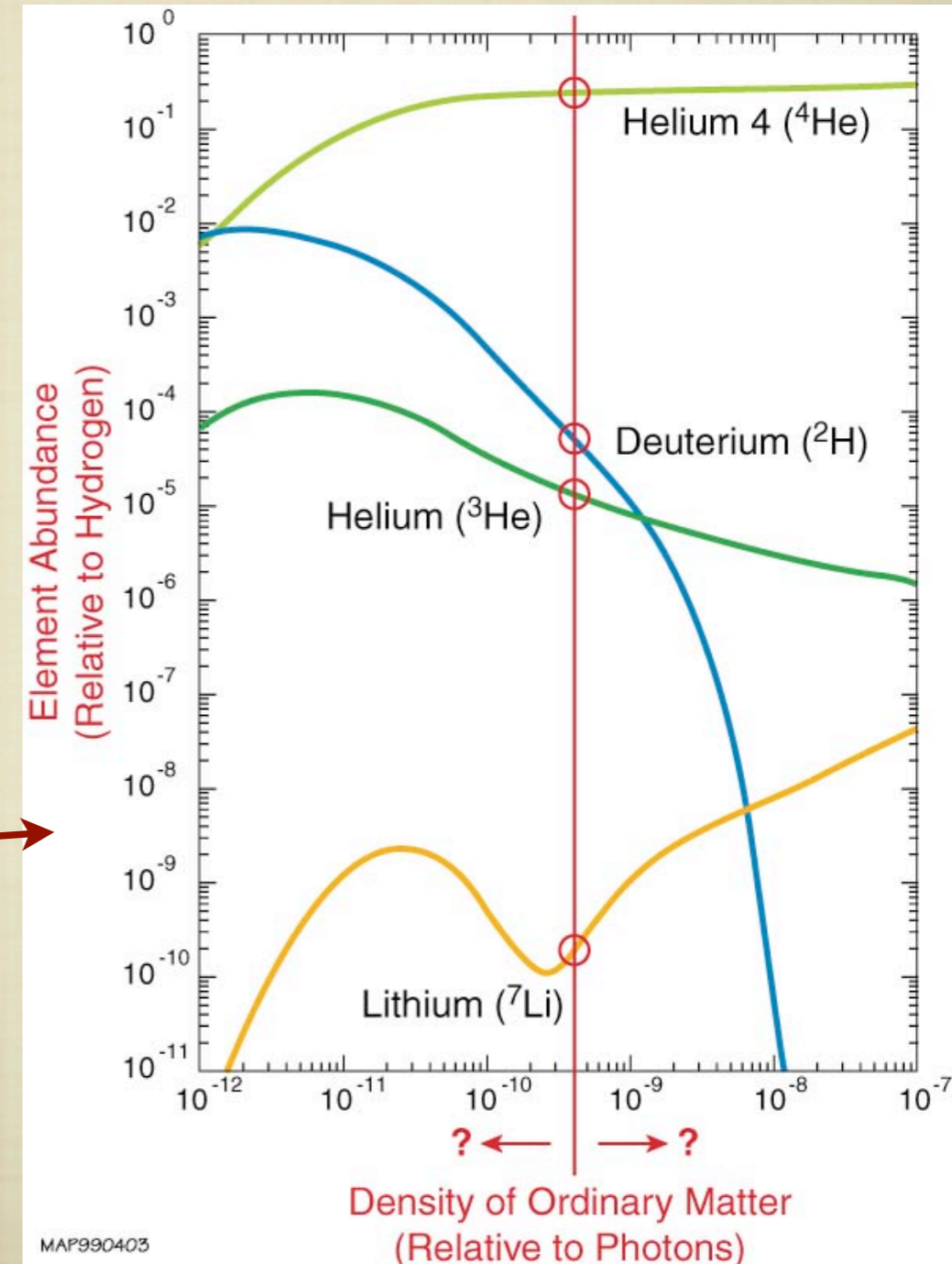
Buen acuerdo con la teoría

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? $n_b/n_\gamma = 10^{-9}$



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 ~ 0.000000002 %

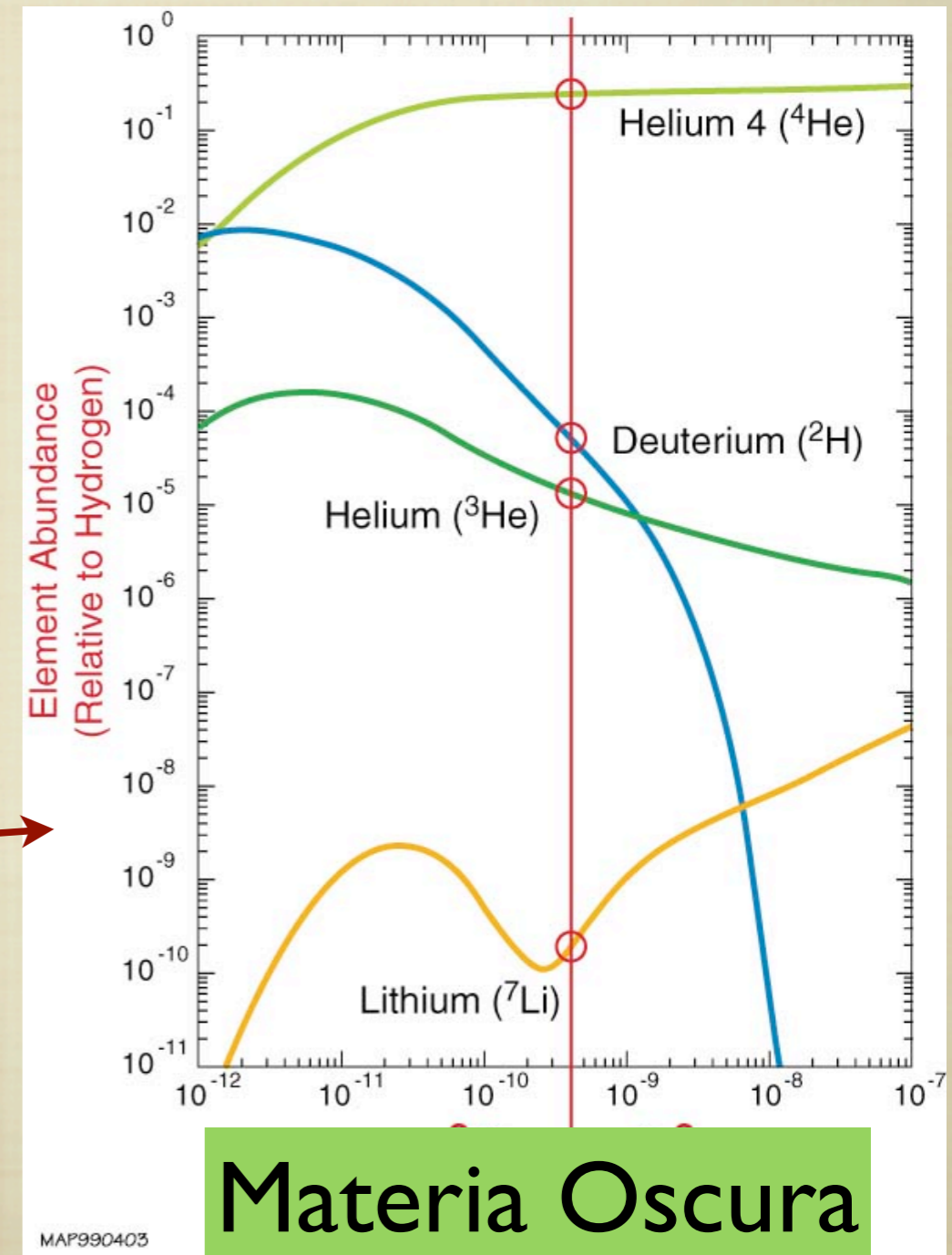
Buen acuerdo con la teoría

si hay un barión por cada mil millones de fotones

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

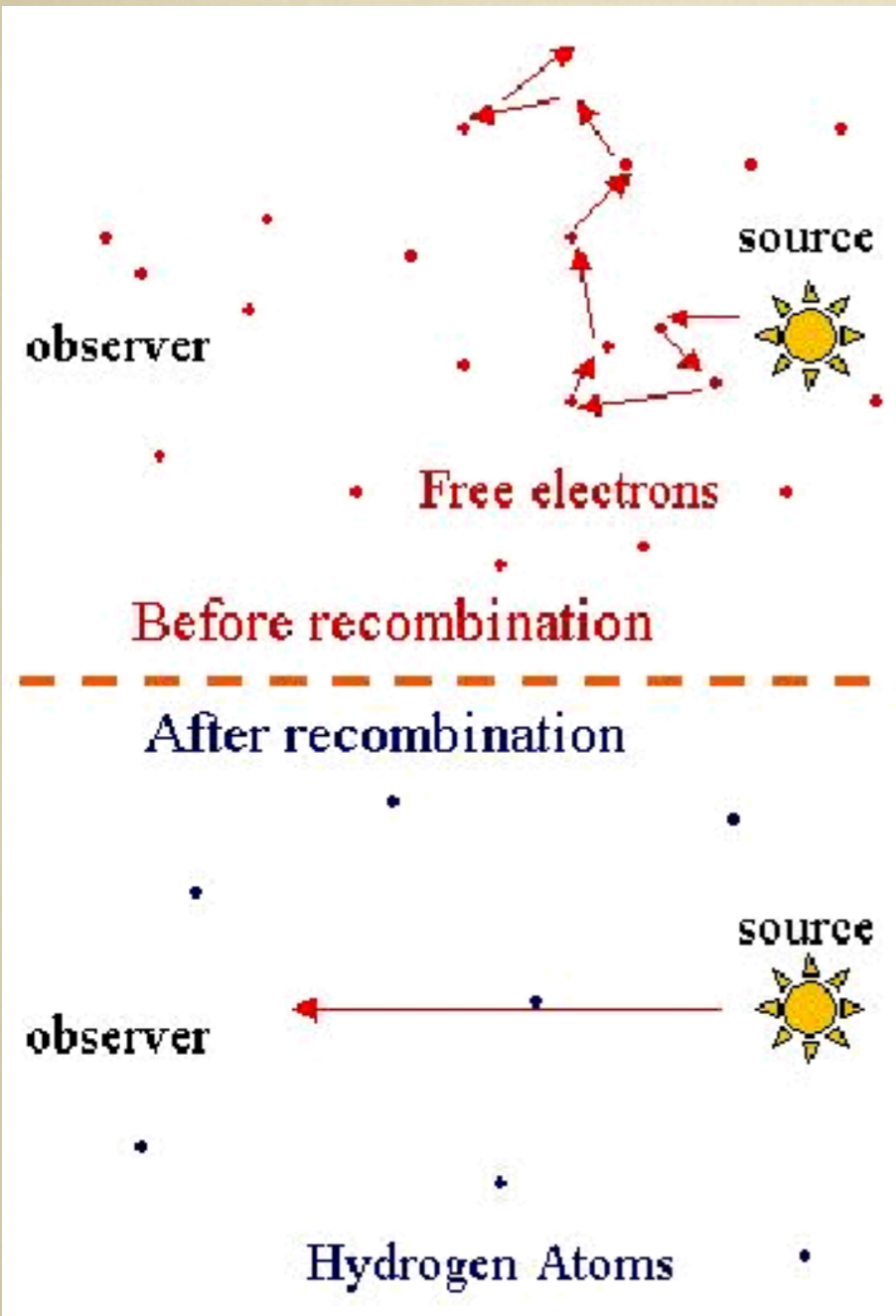
¿Por qué hay materia y no antimateria?

¿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

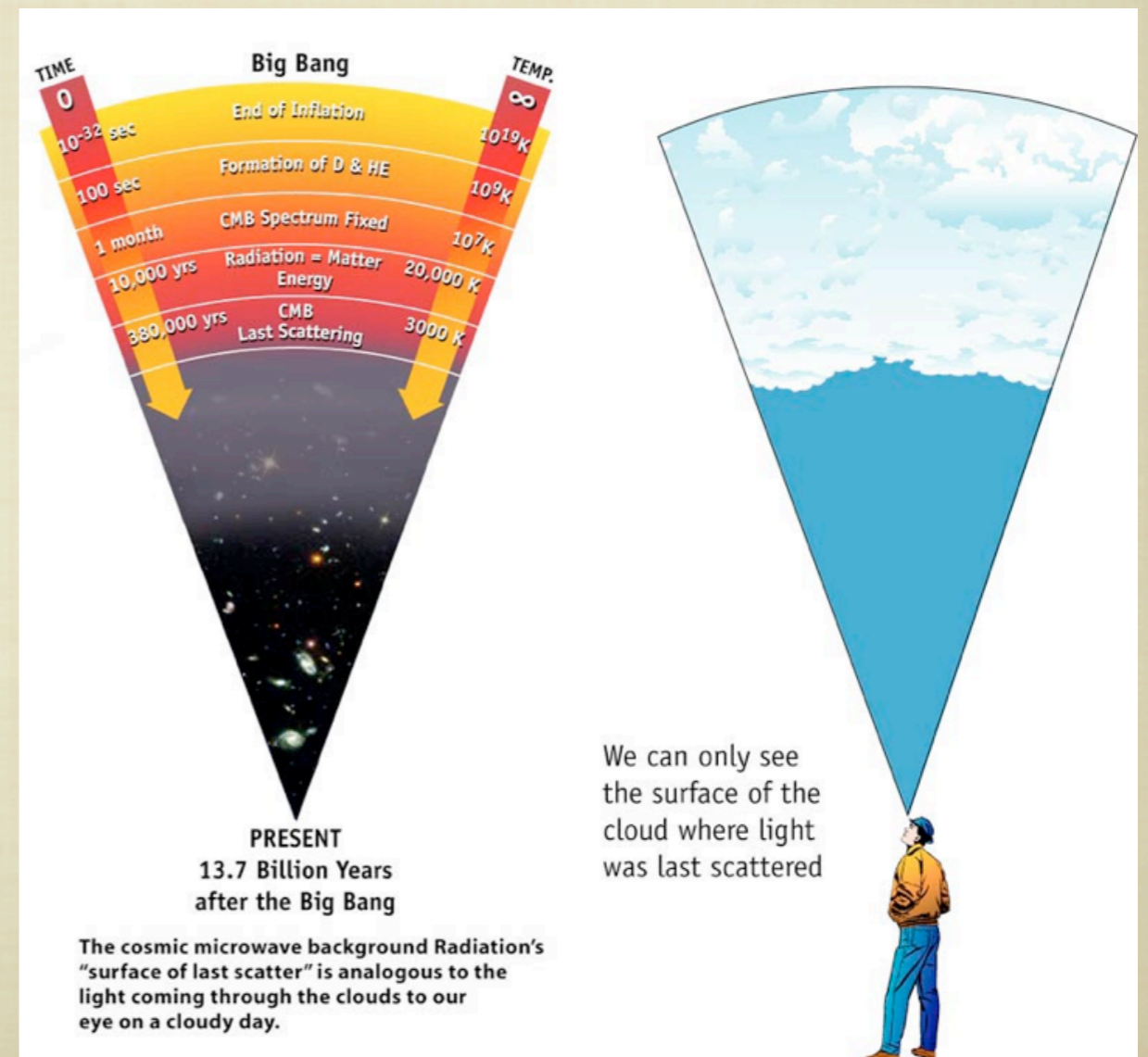
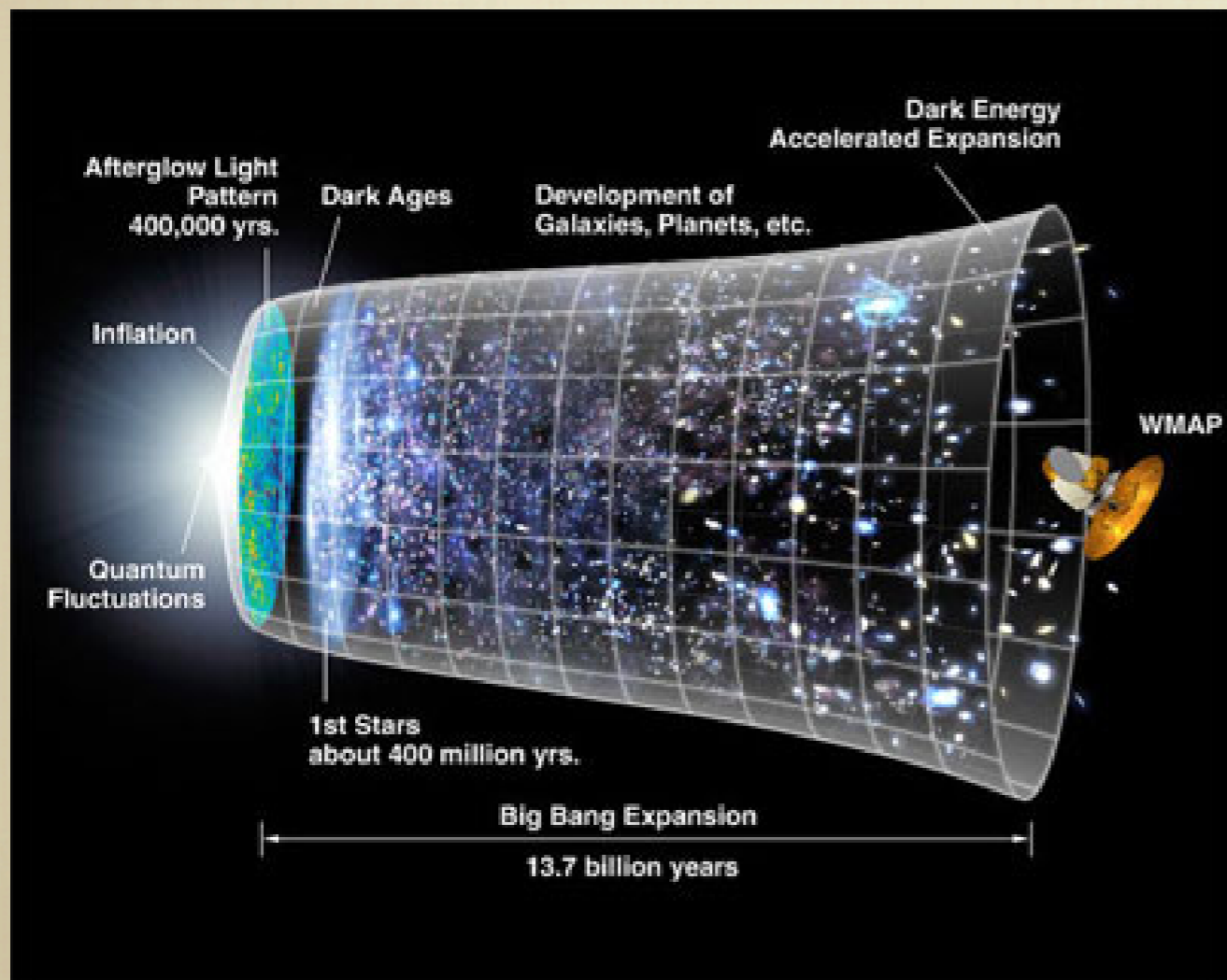
Radiación reliquia llena el Universo desde entonces

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

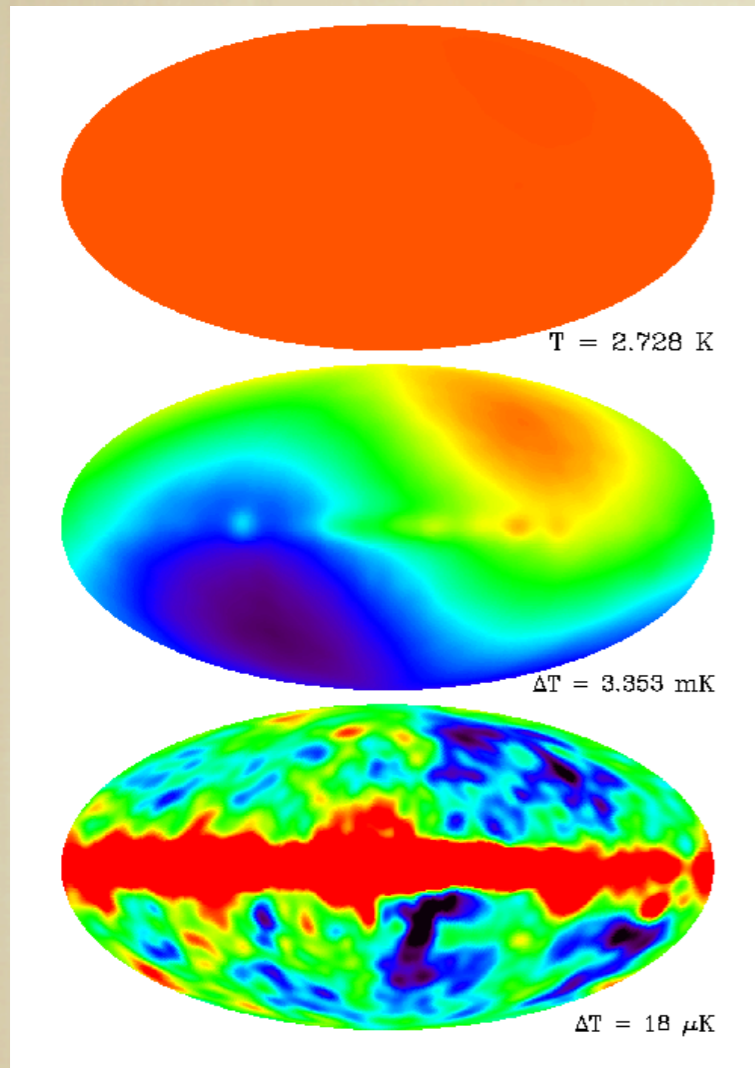
- Descubrimiento en 1965

- Medidas muy precisas en diversos experimentos,** recientemente los satélites COBE (1992) y WMAP (2003-08) (próximos datos del satélite Planck, lanzado en 2009)

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)



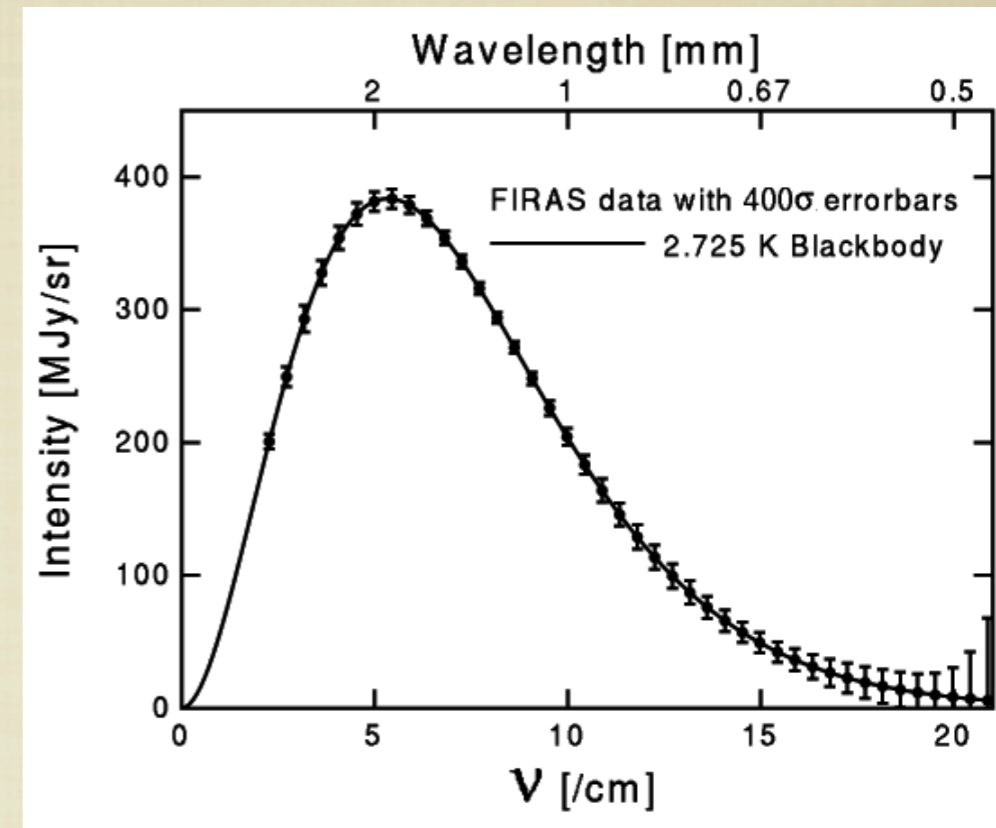
Estudio del fondo de radiación de microondas por el satélite COBE (premio Nobel 2006)



$T = 2.7 \text{ K}$

$\delta T = 3.3 \text{ mK}$
(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 -)

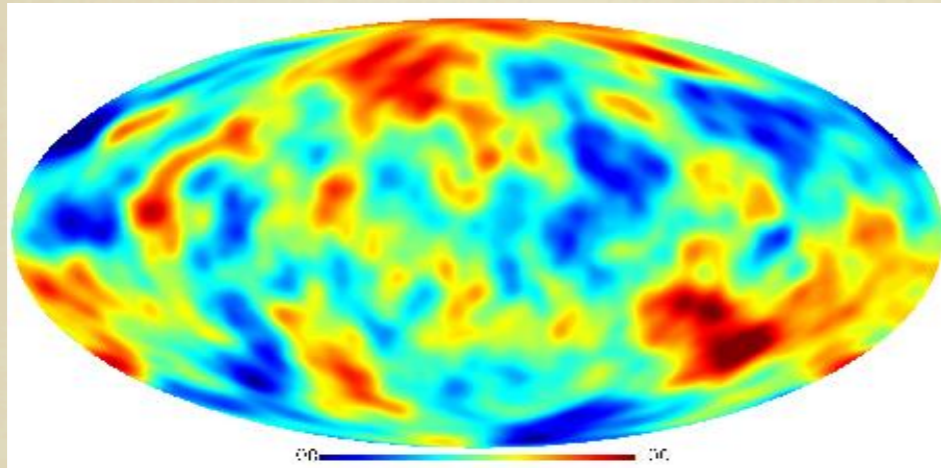


Extremadamente homogéneo, una parte en 100.000

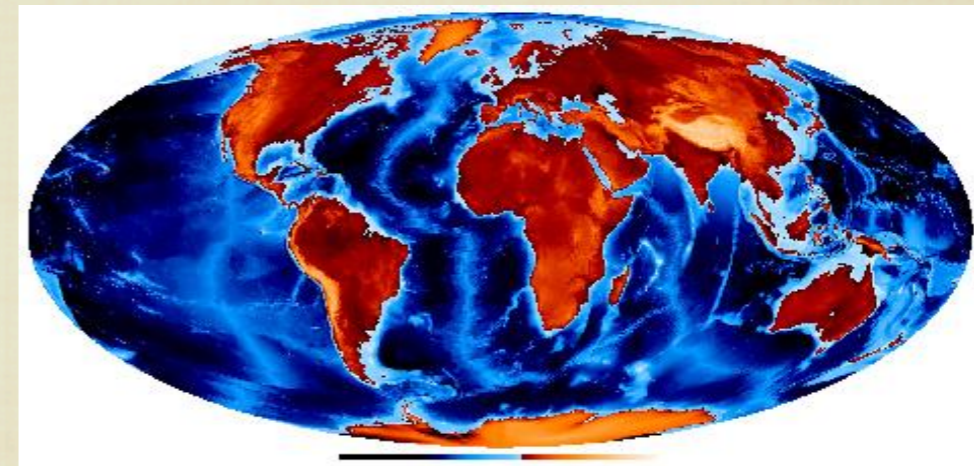
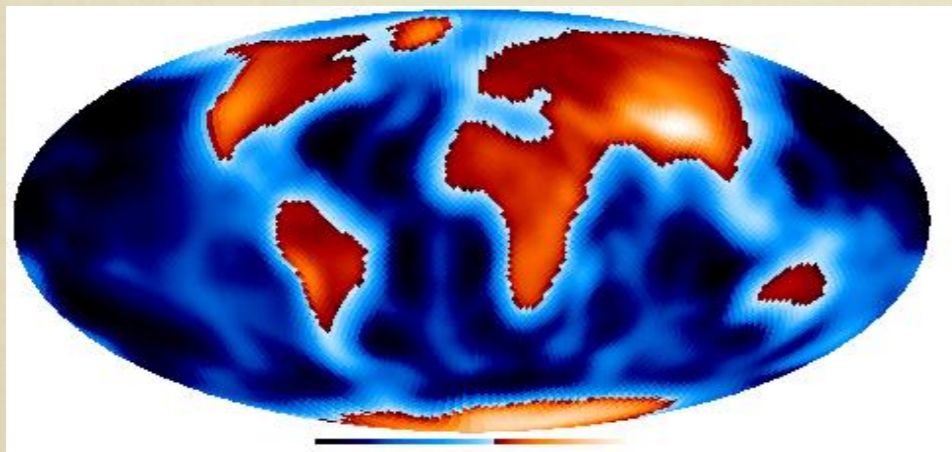
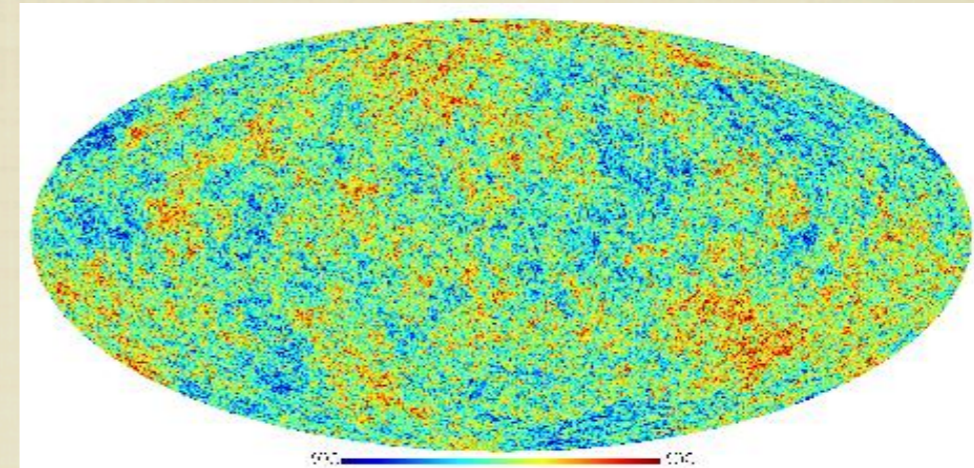
Las inhomogeneidades en la temperatura se originan por el corrimiento al rojo debido a fluctuaciones primordiales en la densidad

WMAP mejoró la precisión de las observaciones del CMB

COBE
(resolución de 7 grados)



WMAP
(resolución de .25 grados)

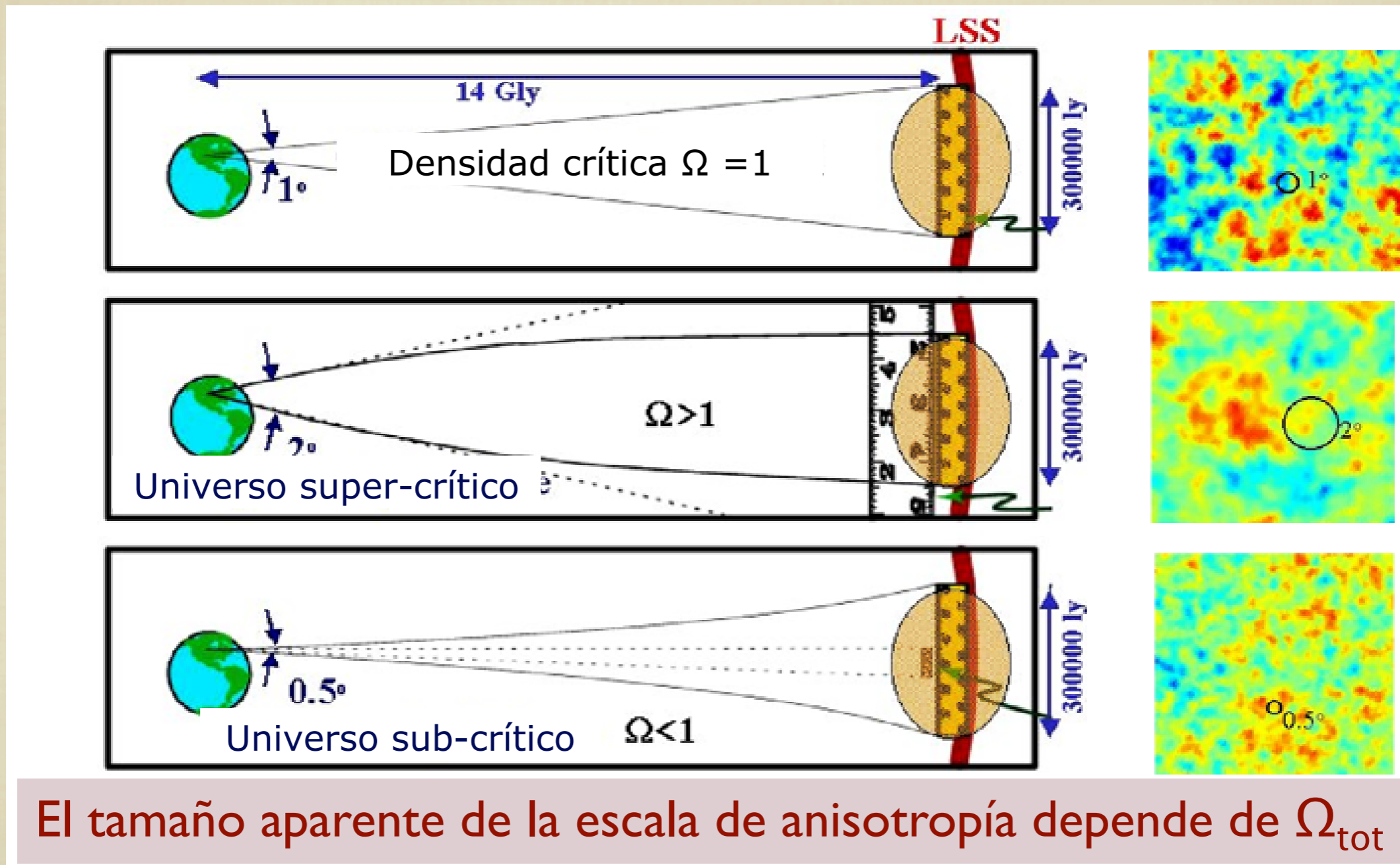


(analogía con resolución en mapas terrestres)

La anisotropía tiene una estructura granular.

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

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

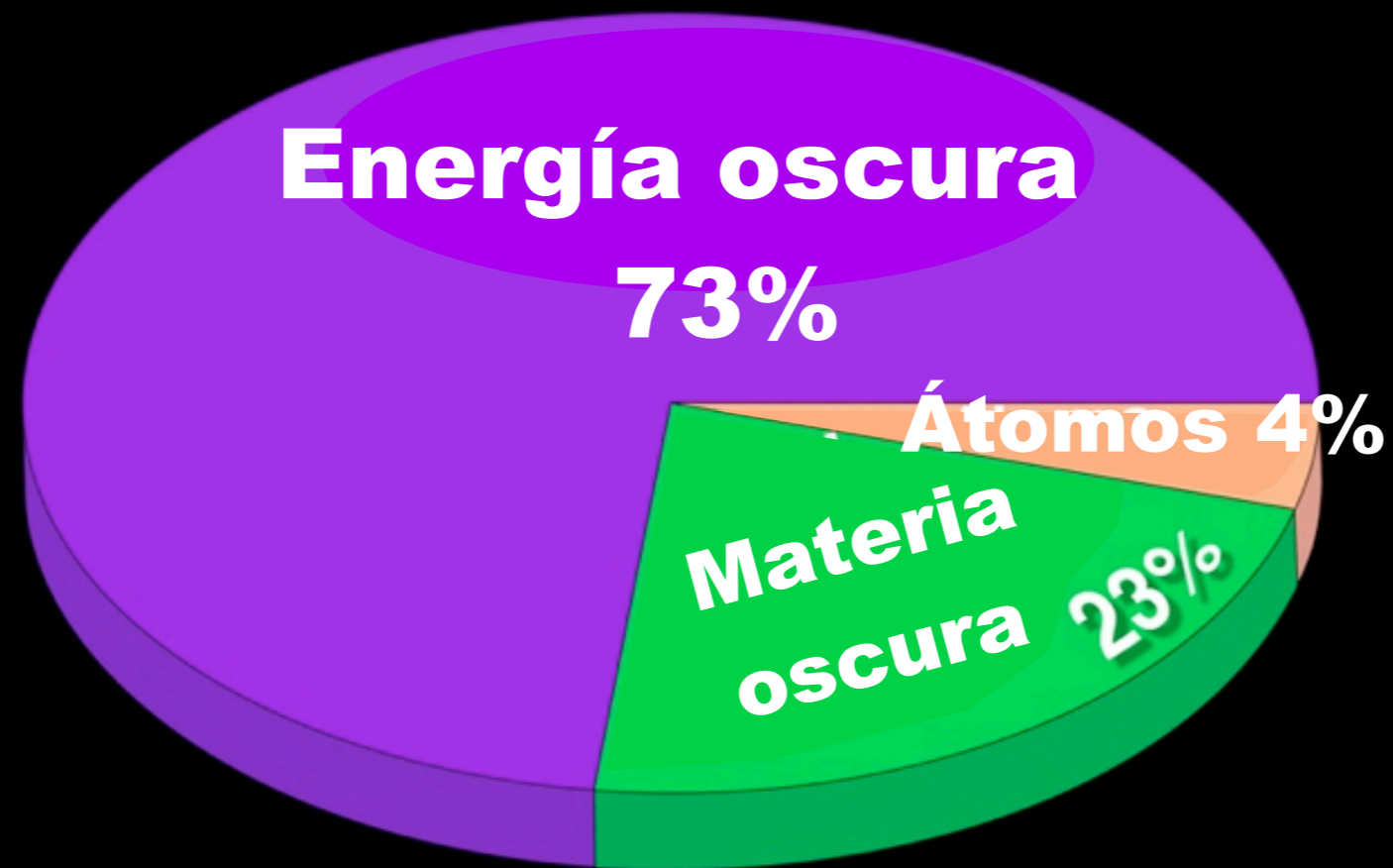


Los datos muestran que el Universo tiene la densidad crítica $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02$ y su geometría es plana



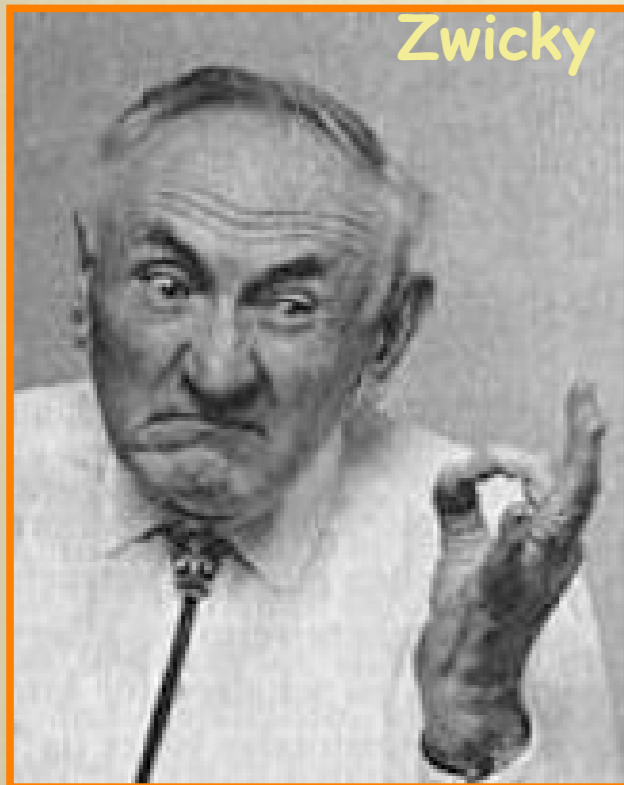
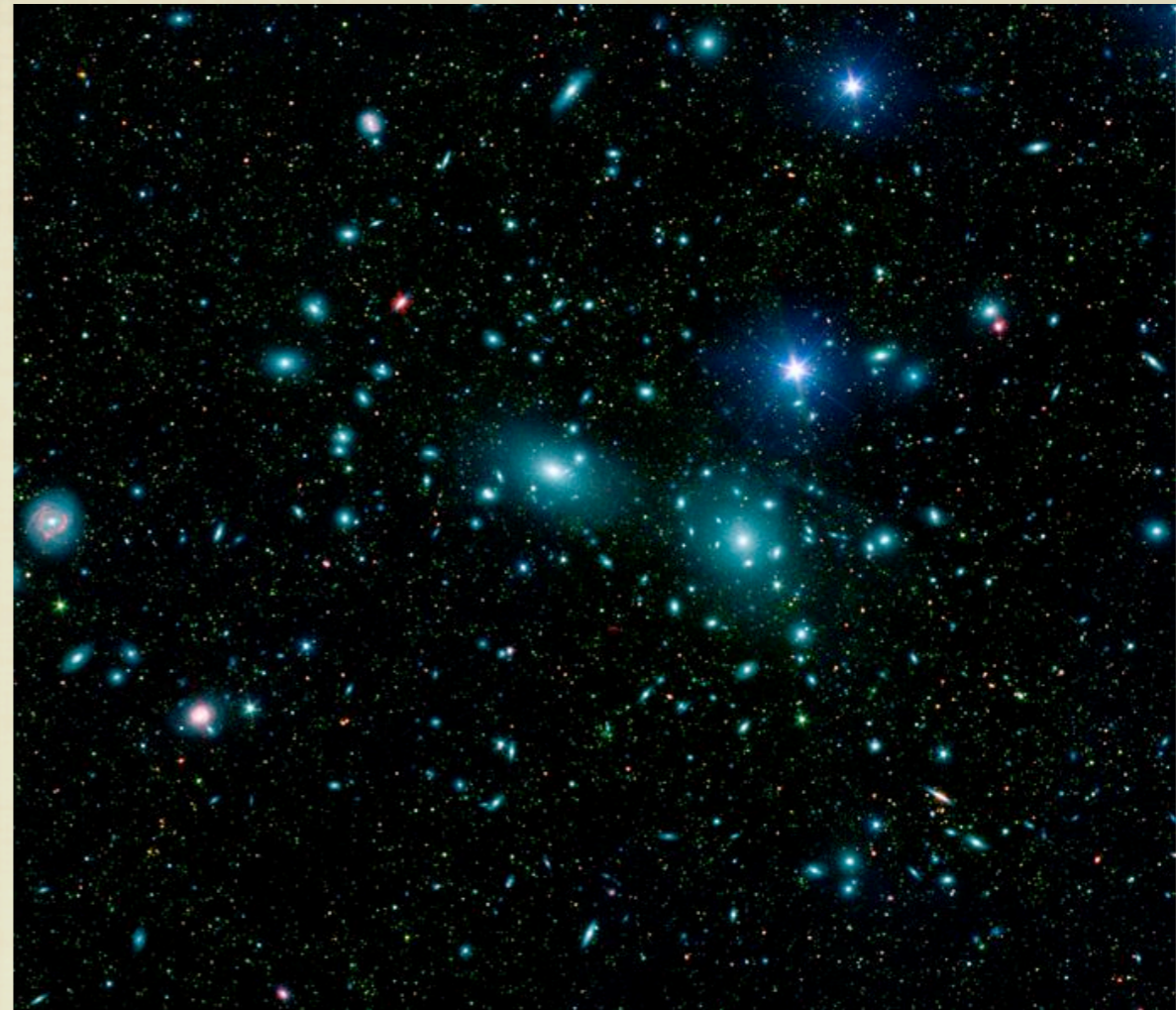
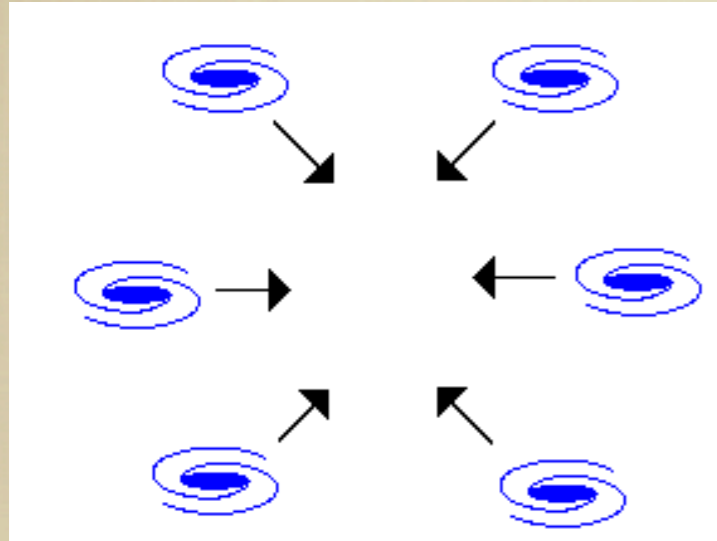
La extraña composición del Universo

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...

Indicios tempranos de la existencia de Materia oscura (Zwicky)



F. Zwicky

Estudio de la dinámica del cúmulo de galaxias Coma.
El efecto gravitacional requiere más masa de la visible
Masa de la materia visible = 10% masa gravitatoria total
Propuso la existencia de masa invisible, oscura

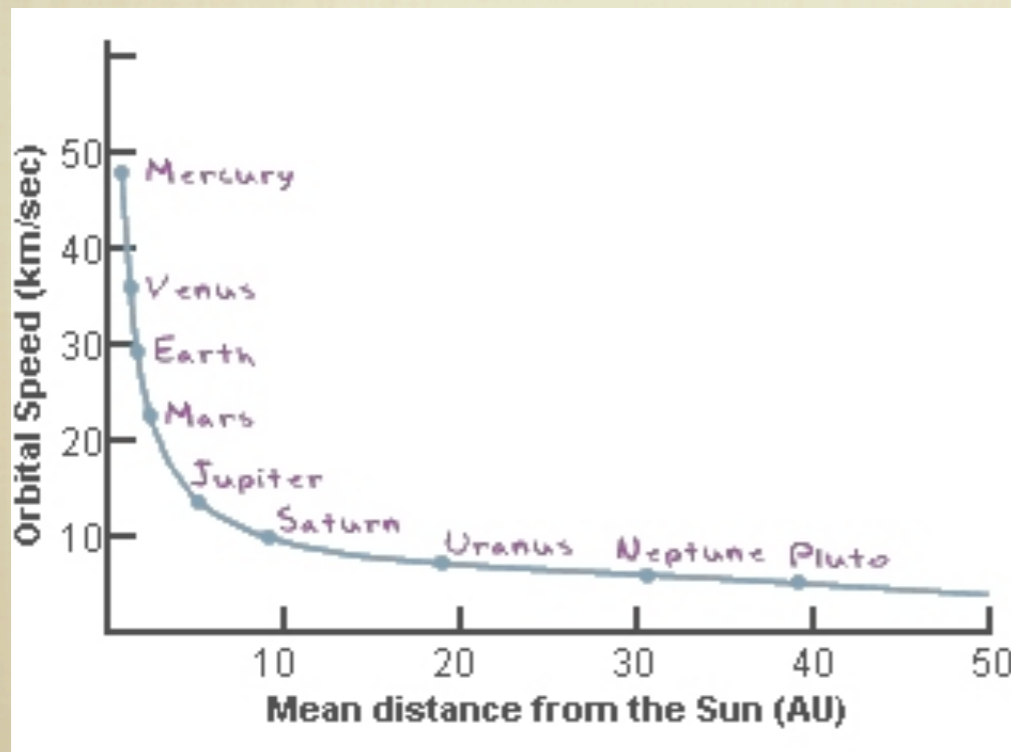
Más evidencia a favor de la materia oscura

Curvas de rotación de galaxias espirales:
Velocidad orbital vs. distancia radial
(depende de la masa gravitacional del sistema)

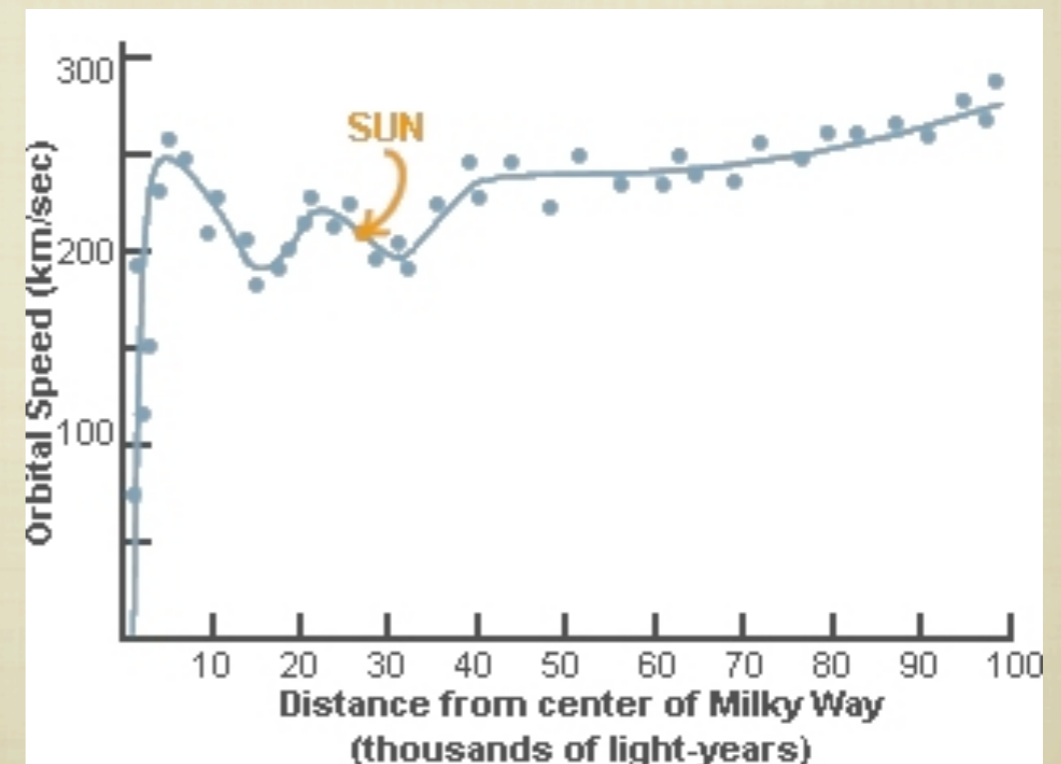
Usando la masa visible
se predice una dependencia $r^{-1/2}$

Sin embargo, los datos observacionales
no concuerdan con esa dependencia

Sugieren presencia de materia extra, oscura



Sistema Solar (una masa central)

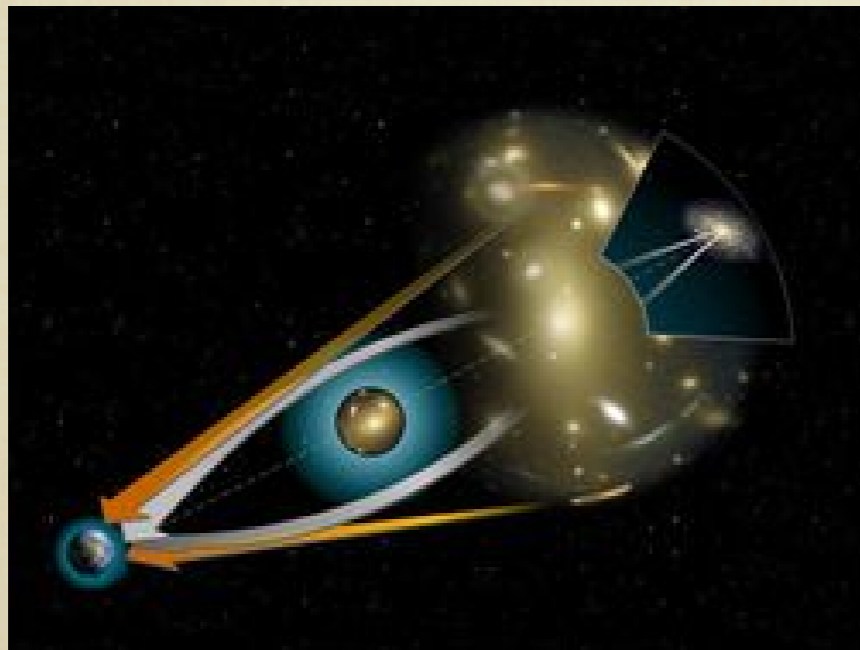


Galaxia (Vía Láctea)

Aún más evidencia a favor de la materia oscura

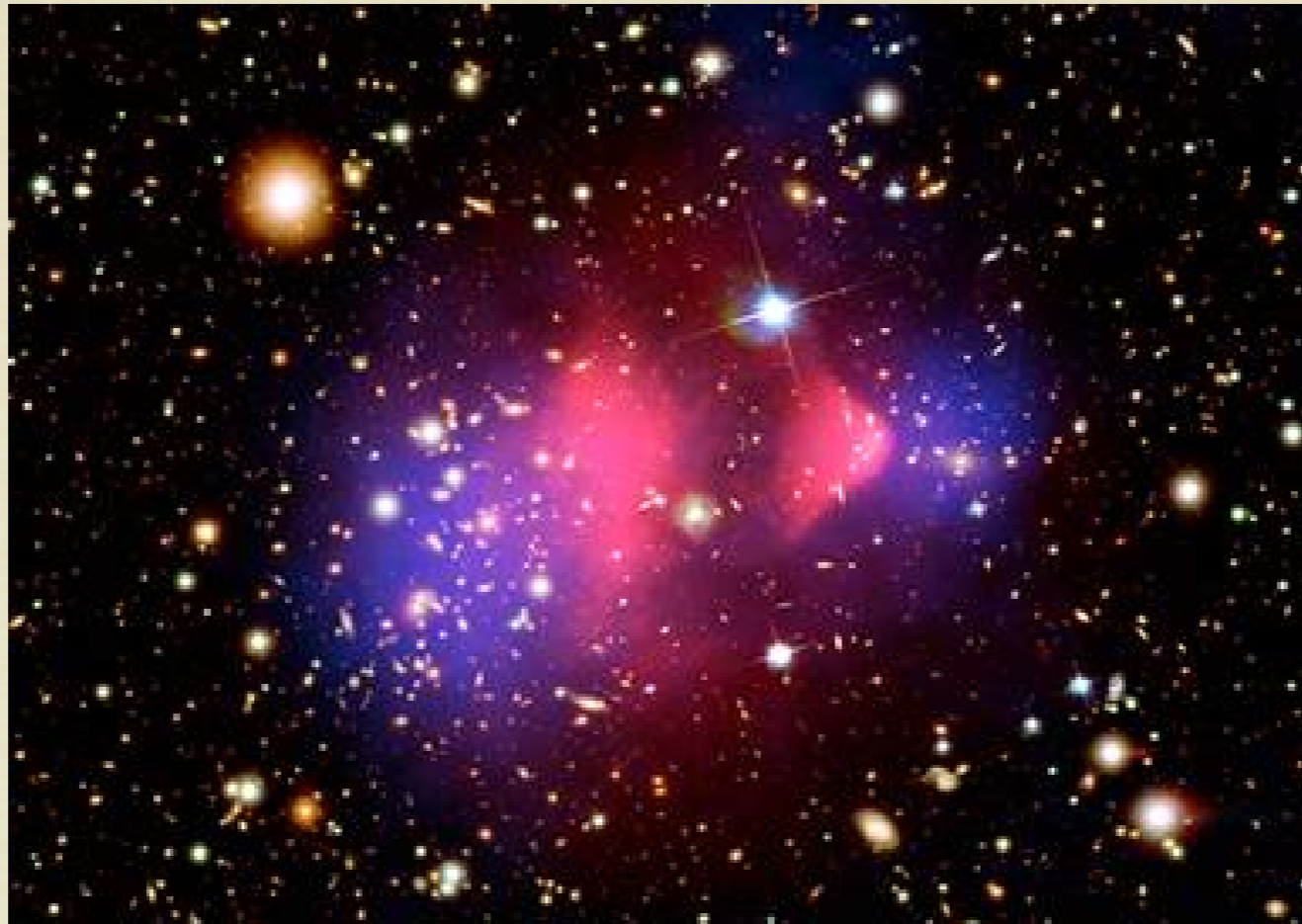
Lentes gravitacionales

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



Galaxy Cluster CI 0024+17 (ZwCl 0024+1652)
Hubble Space Telescope • ACS/WFC

¡Aún hay más!



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"

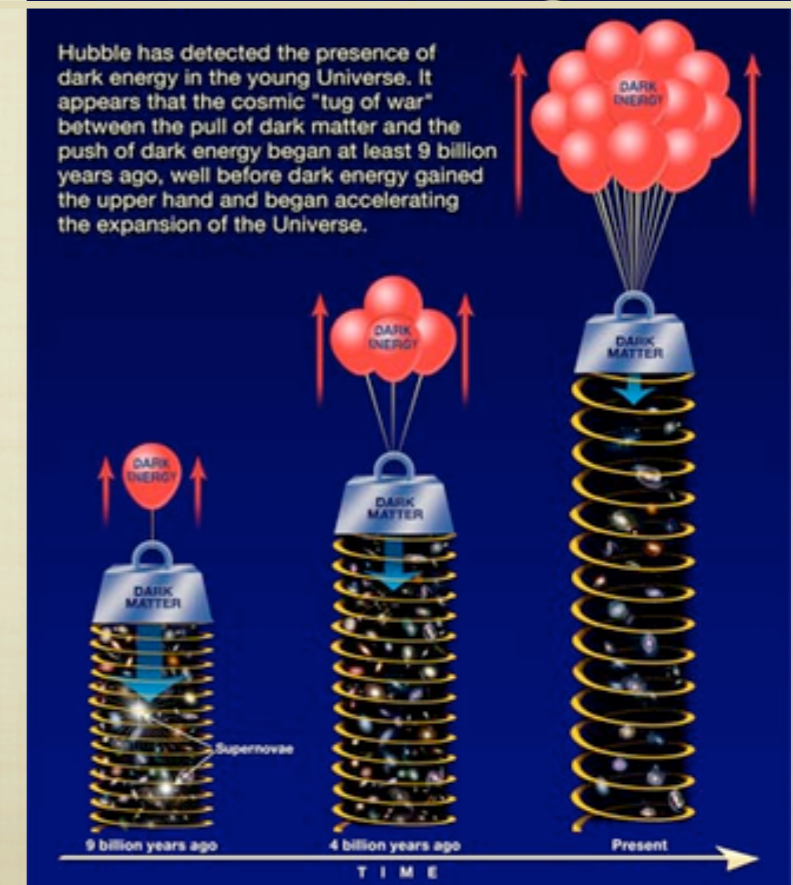
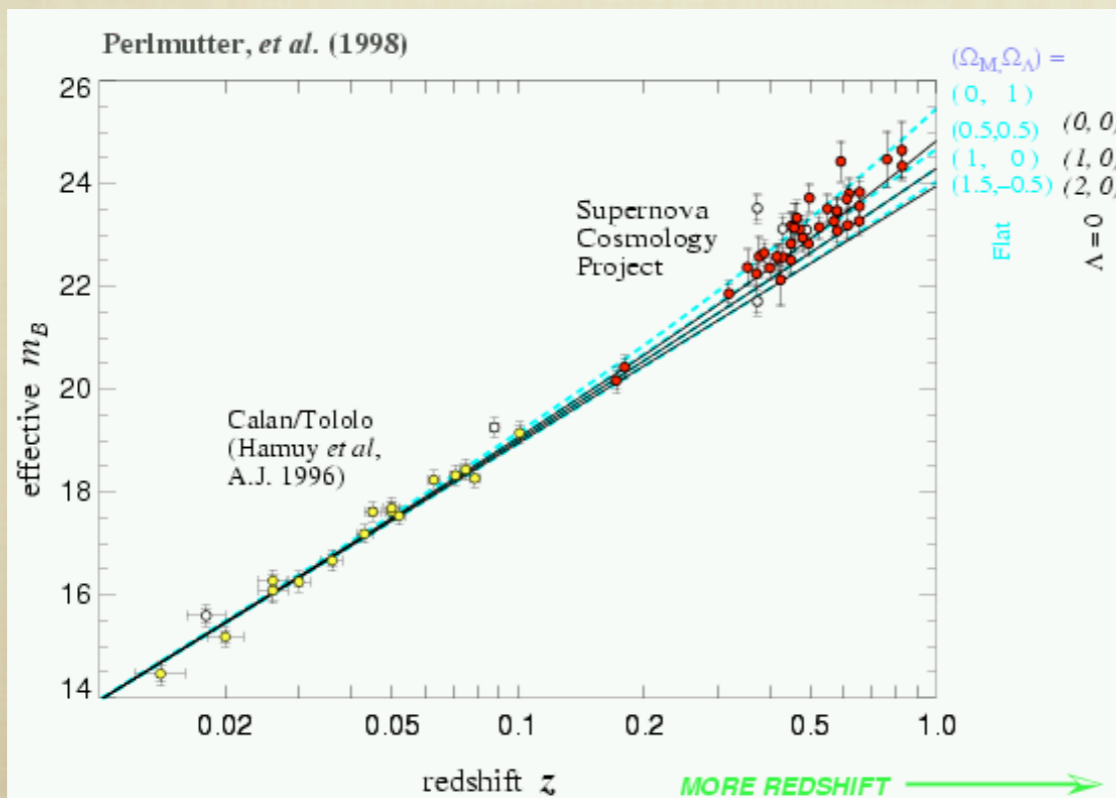
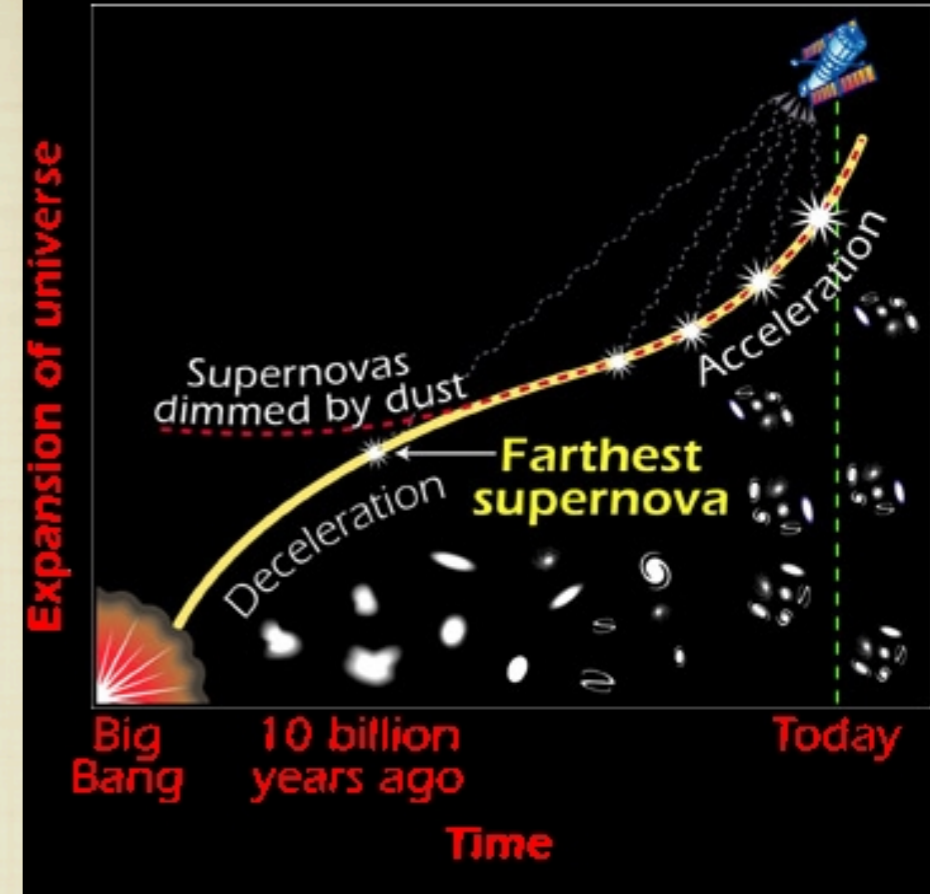
Medida de la expansión de Hubble

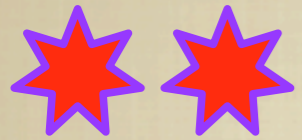
- El Universo ha pasado de una fase de deceleración a una fase de expansión acelerada

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

Energía oscura

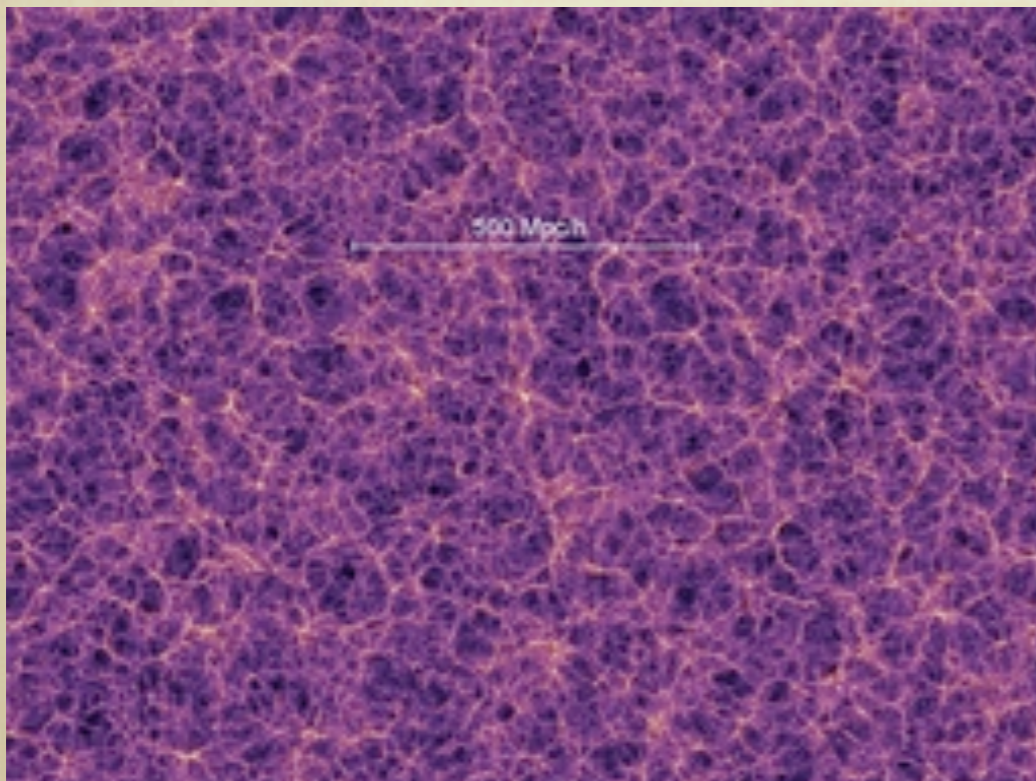
- La posibilidad más sencilla es una energía del vacío i una constante cosmológica! (Einstein):



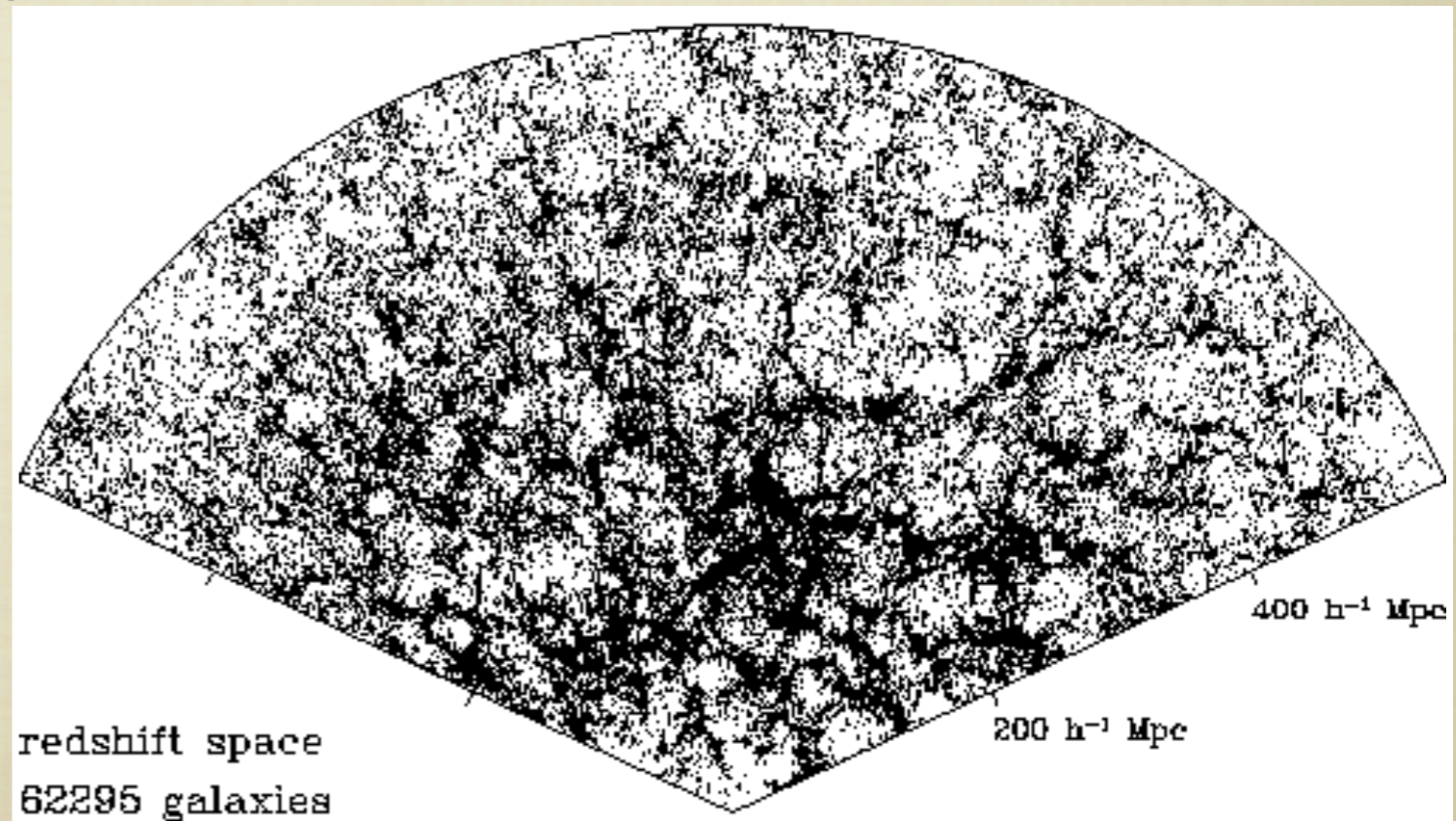


Formación de estructura:

- 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)

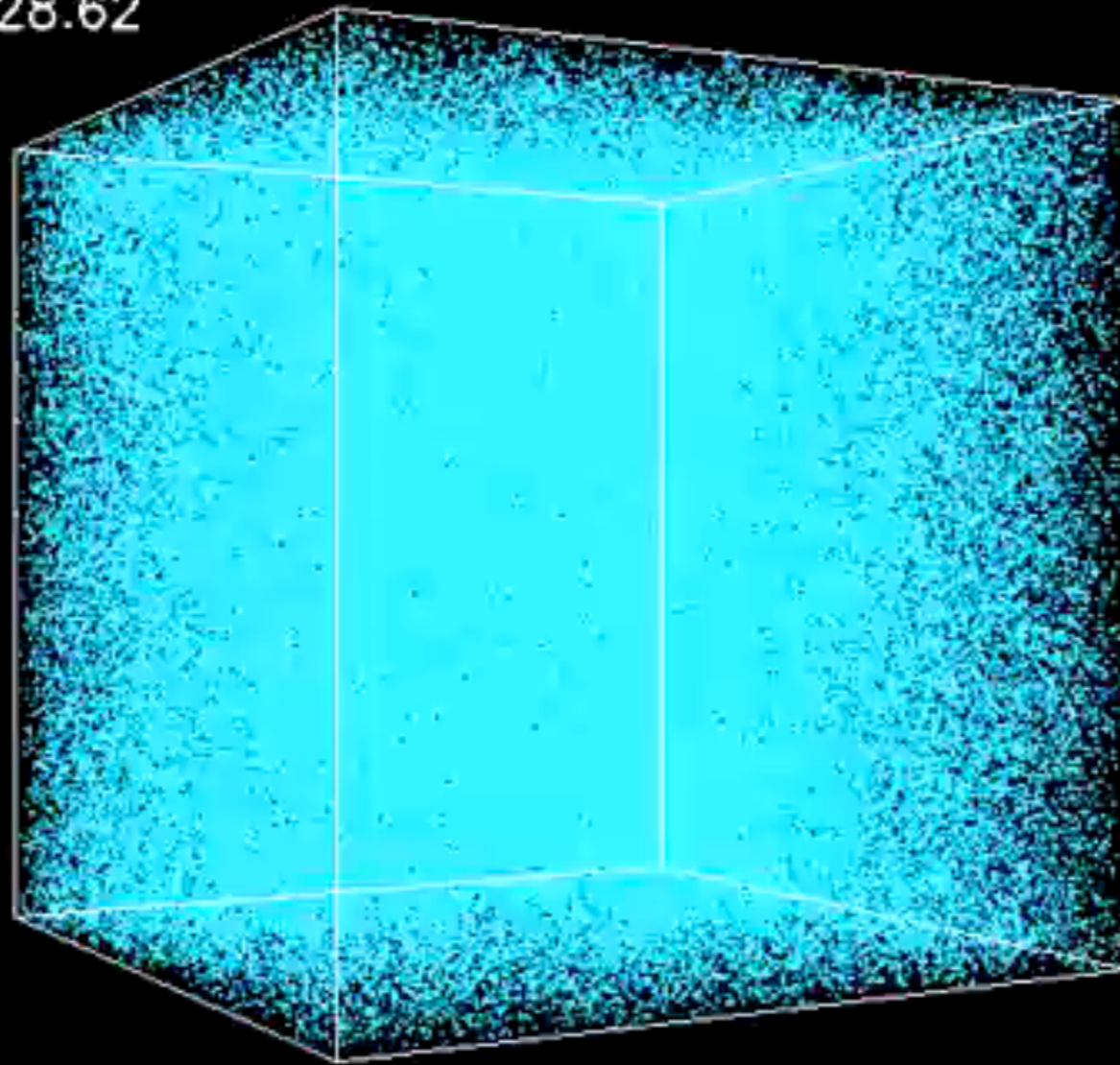


Millenium Simulation, 10^{10} partículas

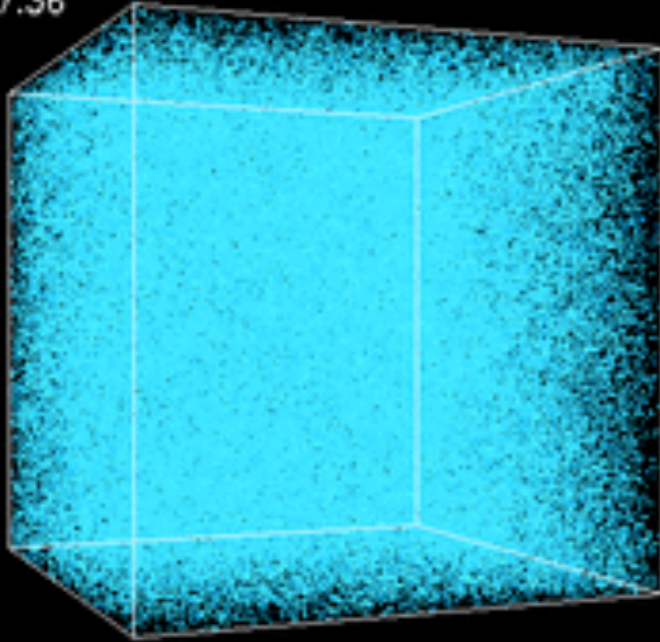


Sloan Digital Sky Survey, 2000

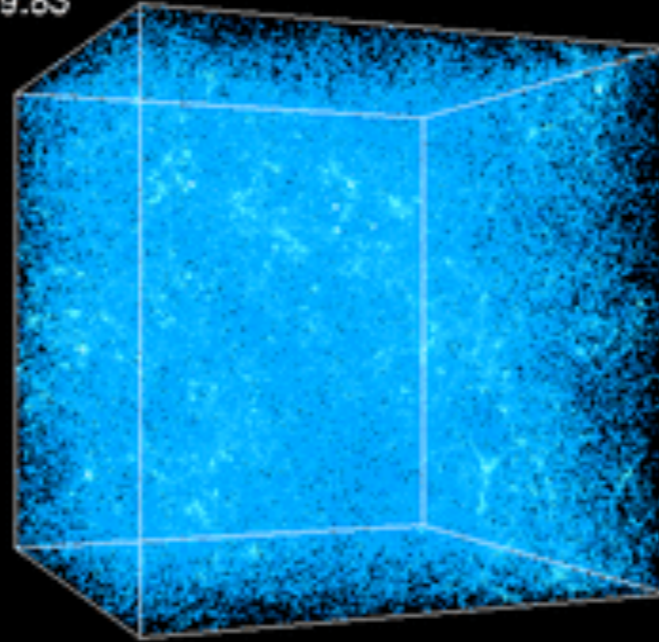
$Z=28.62$



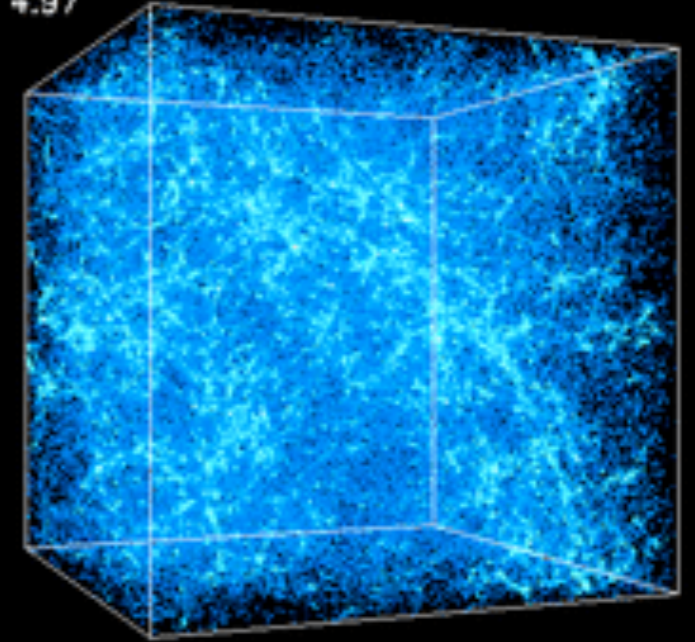
$Z=27.36$



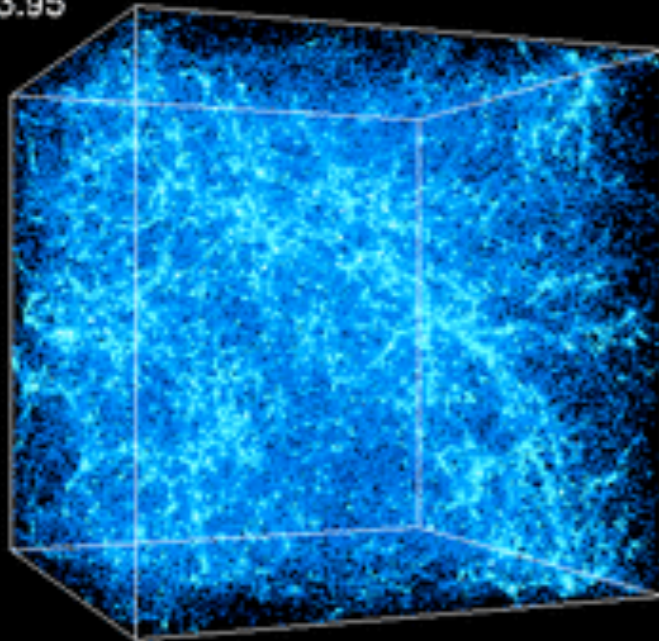
$Z= 9.83$



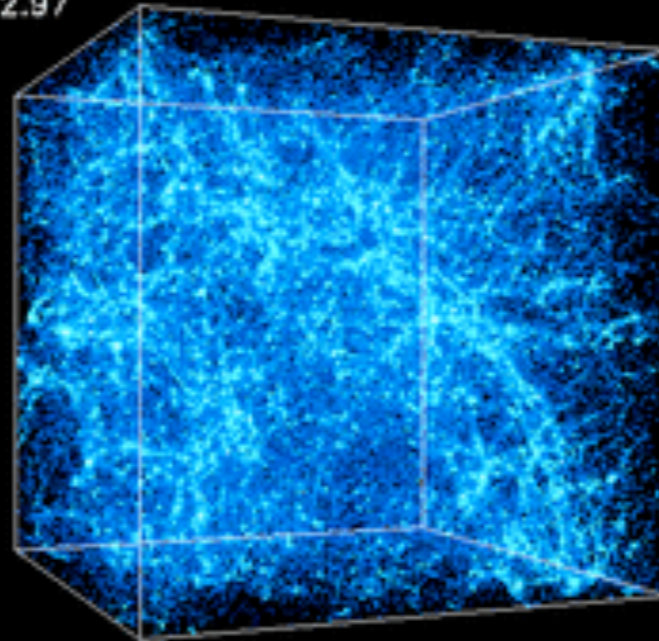
$Z= 4.97$



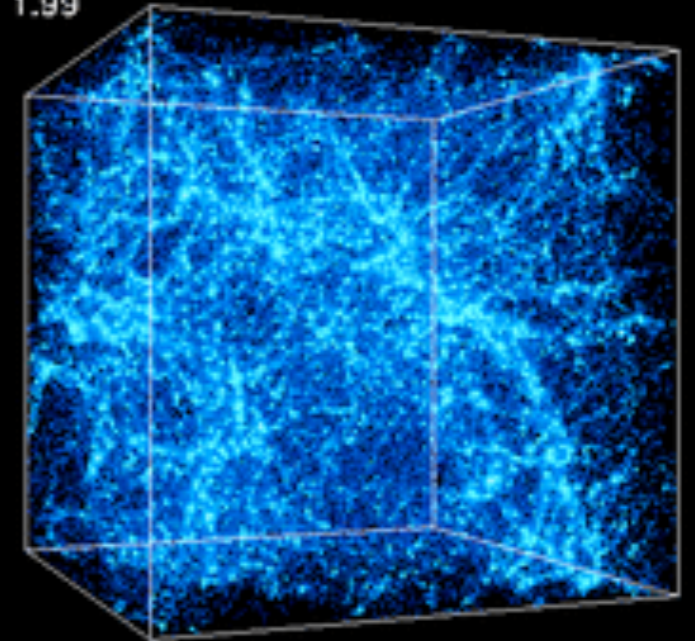
$Z= 3.95$



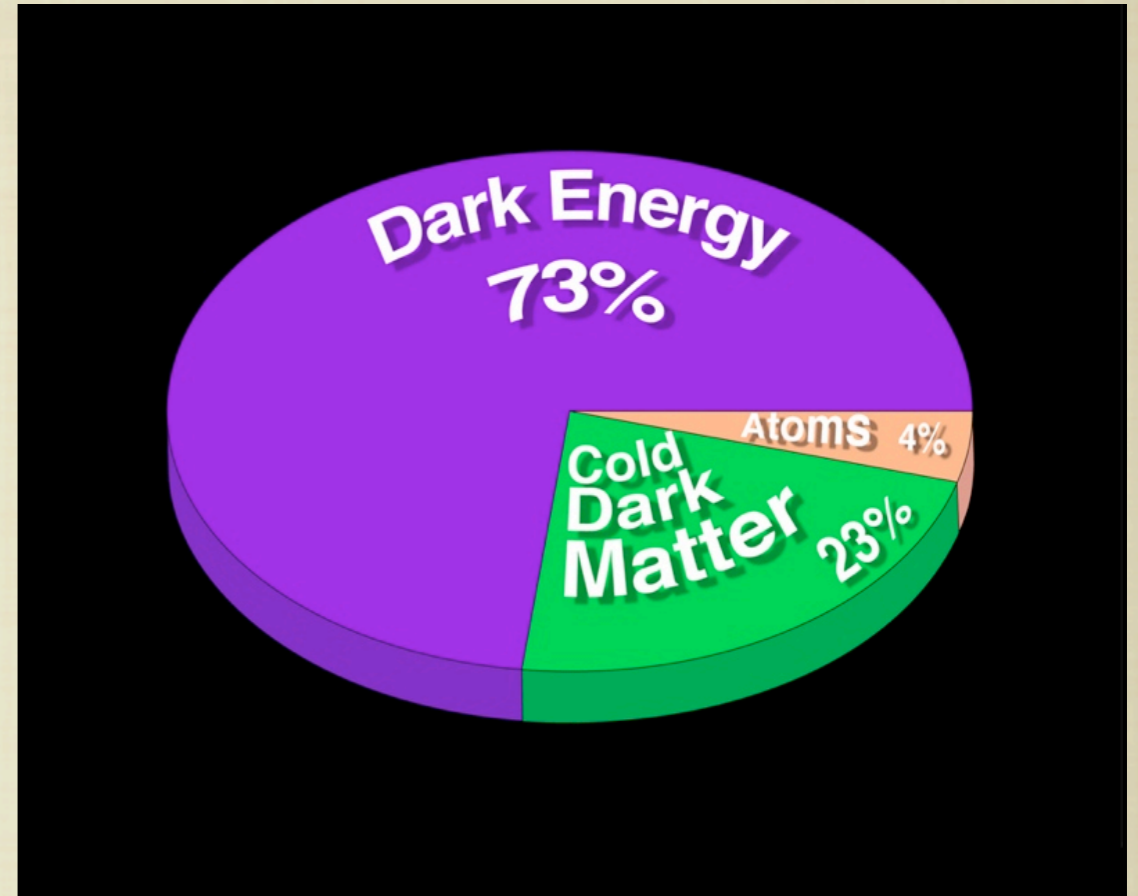
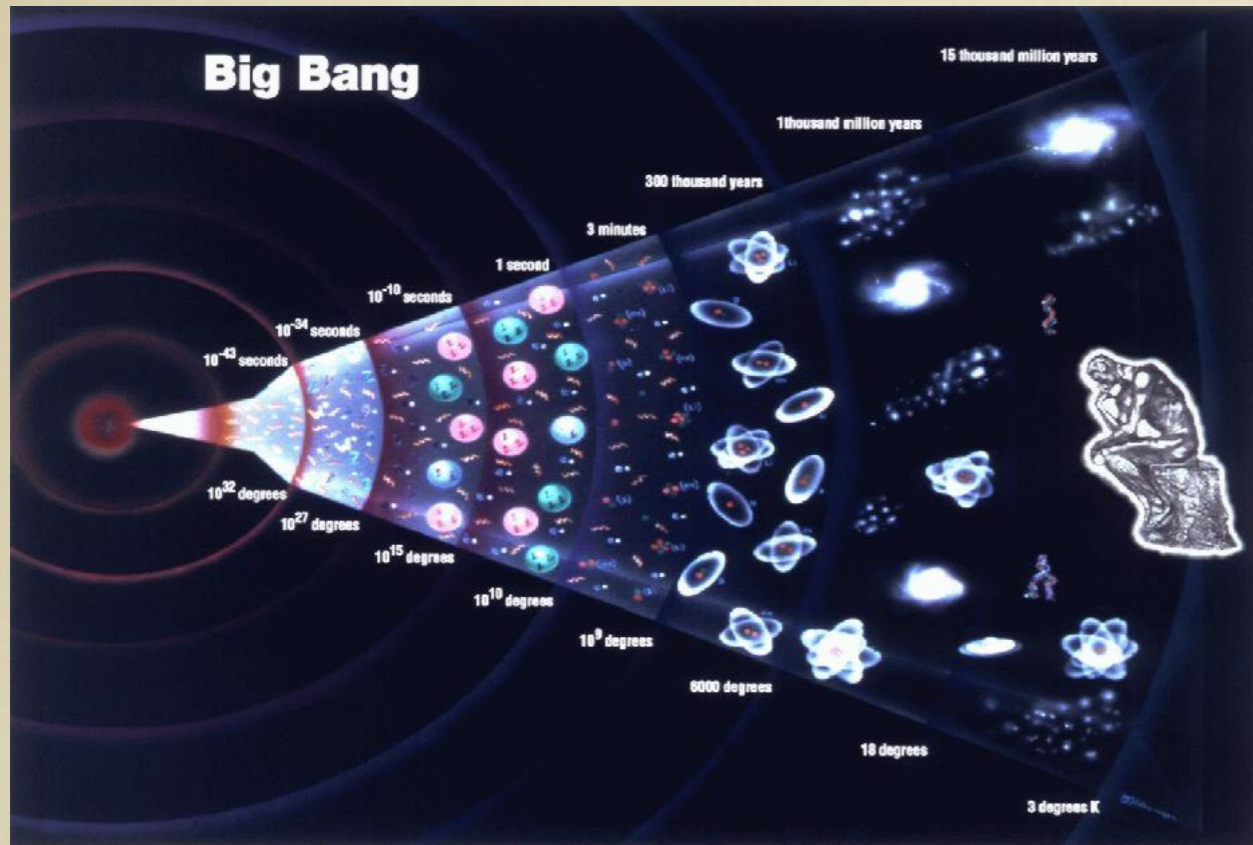
$Z= 2.97$



$Z= 1.99$



El modelo estándar de la Cosmología (Λ CDM, "concordance model")

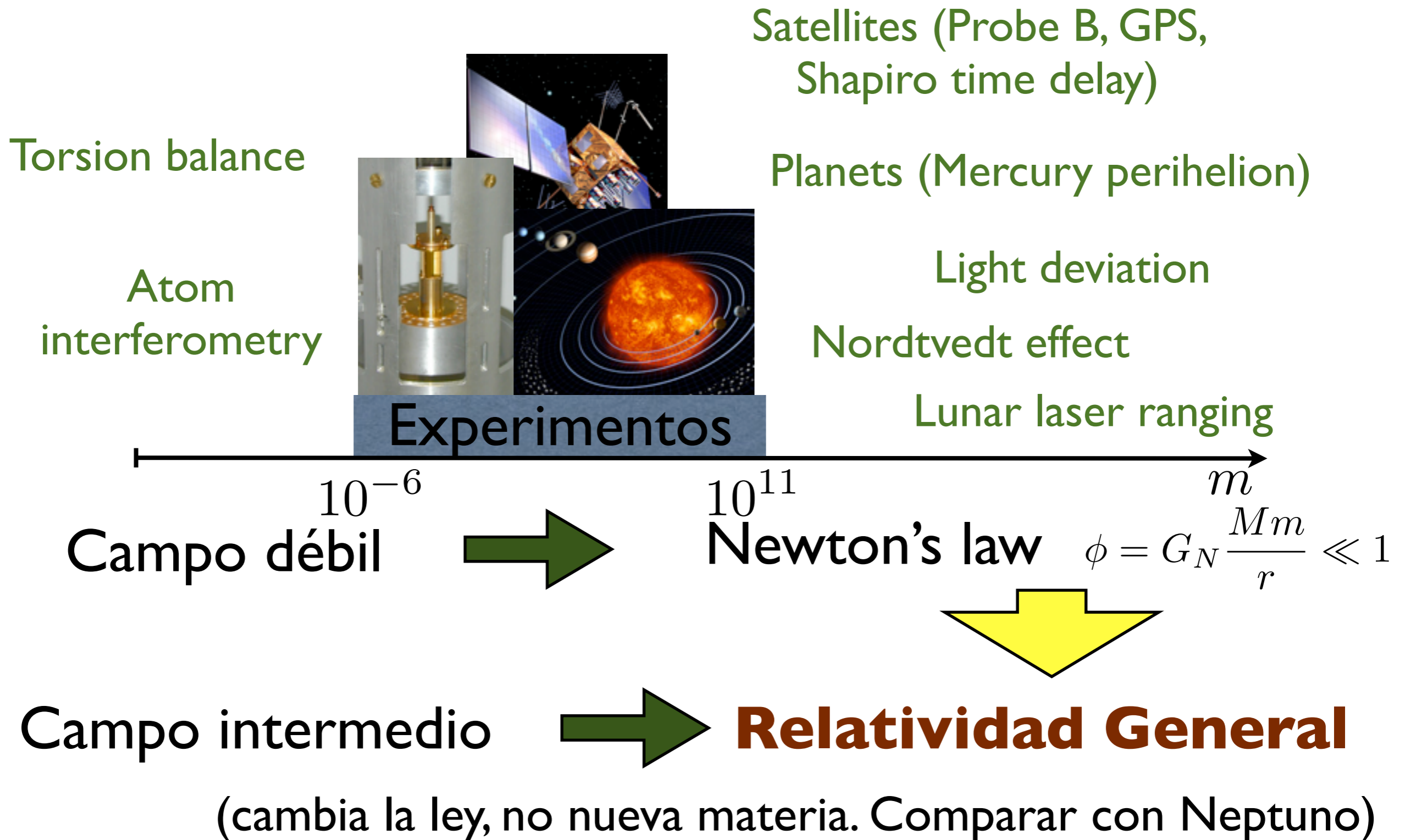


Una proeza del intelecto humano

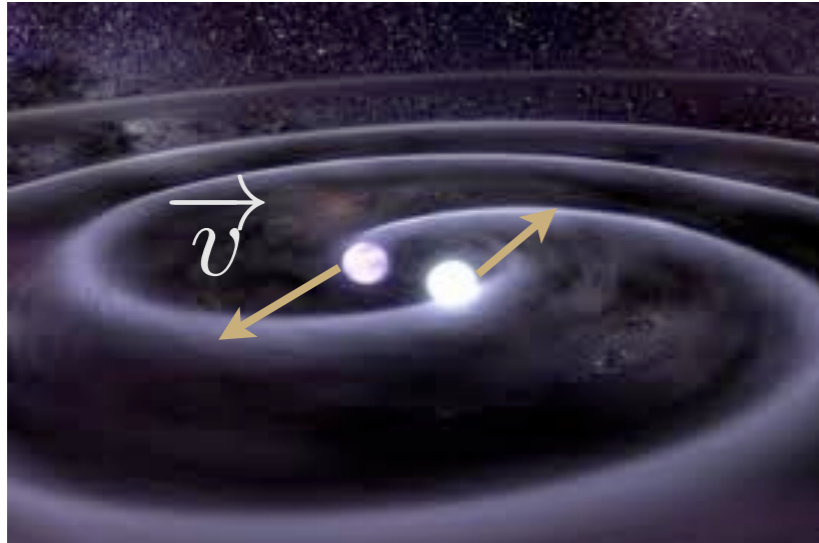
Describe la estructura y evolución del Universo conocido en escalas de espacio y tiempo que abarcan 10 órdenes de magnitud

Intrincada mezcla de lo infinitamente grande y lo infinitamente pequeño

Relatividad General en el s. XXI

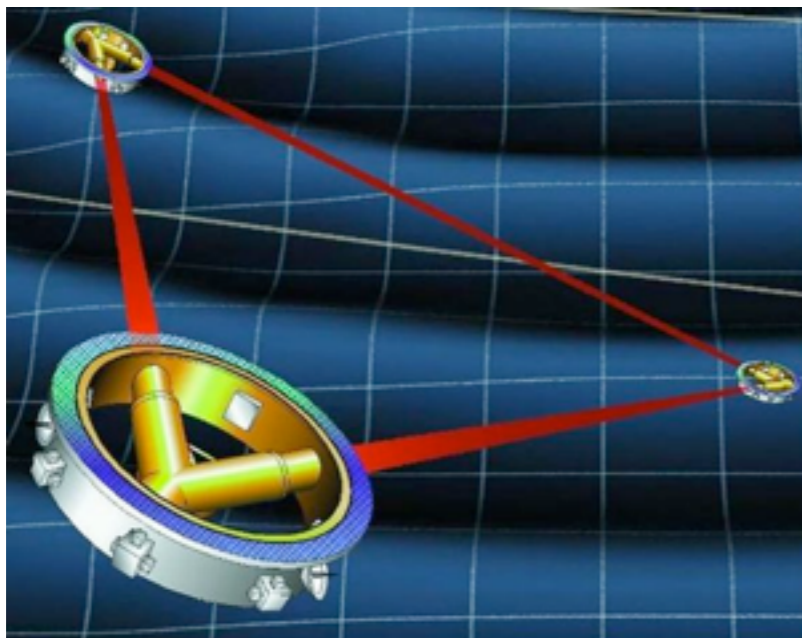


Relatividad General en el s. XXI



La Relatividad General predice la existencia de radiación gravitatoria por cuerpos en órbita

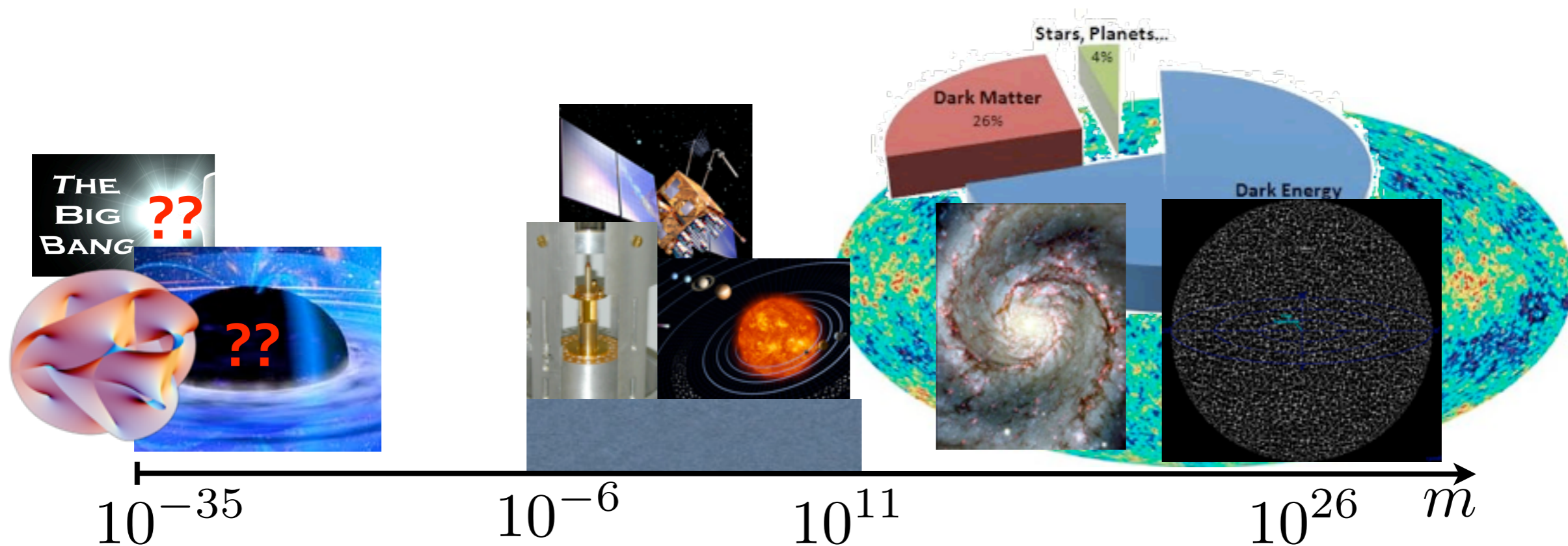
Su detección es el mayor desafío de la RG



← LISA
VIRGO →



Relatividad General en el s. XXI



Uso de la Relatividad General

Quantum gravity ??

← **Puzzles** →

Aceleración cosmológica

¿El “final de la Física”?

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

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

¿Naturaleza del 96% de la energía del Universo?

- **Materia oscura:**

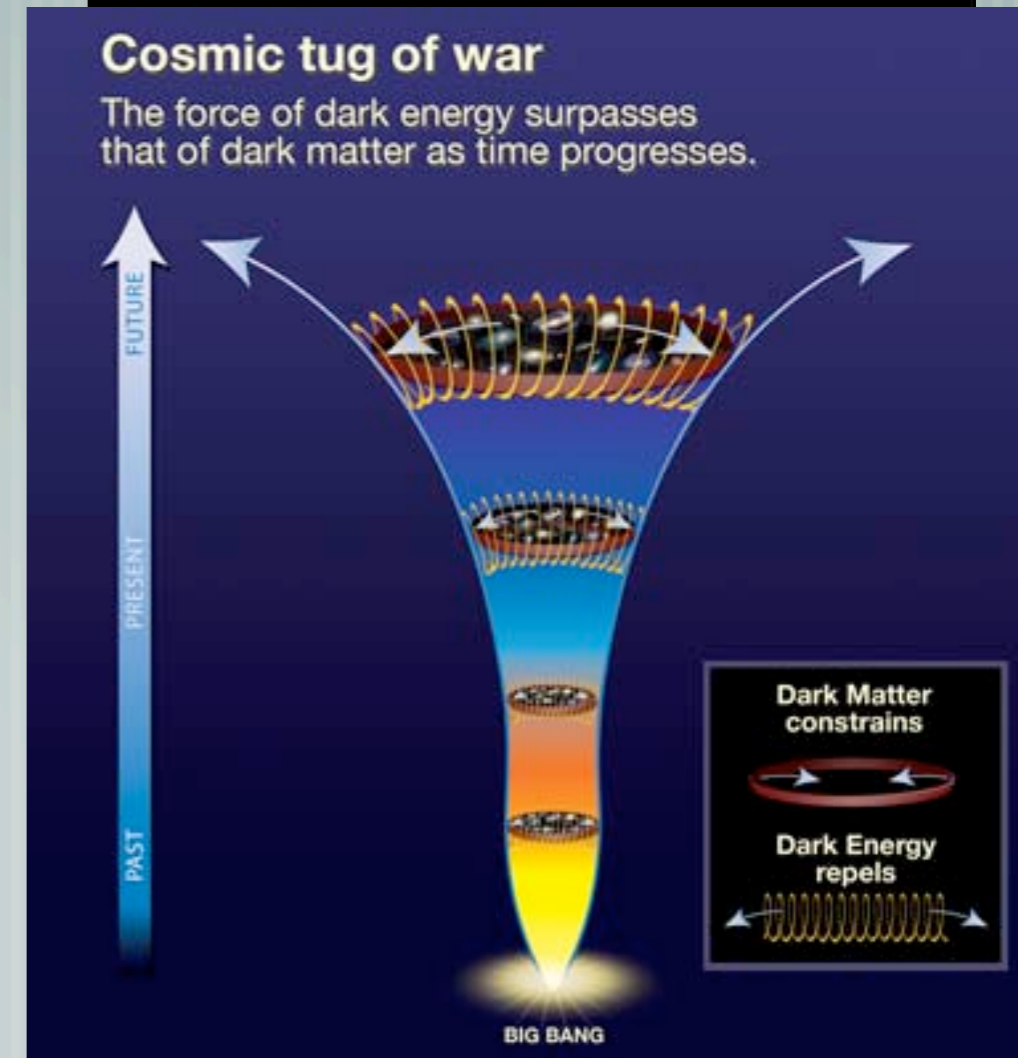
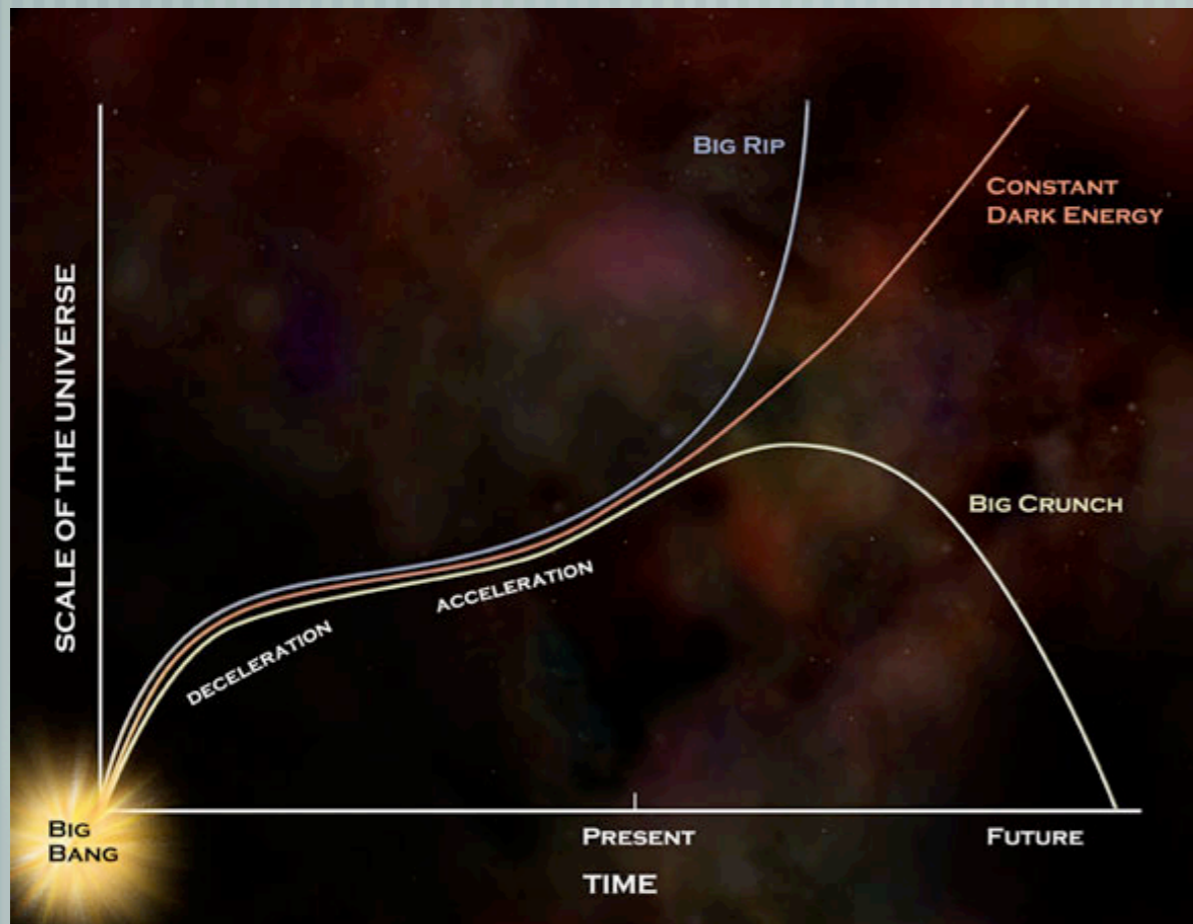
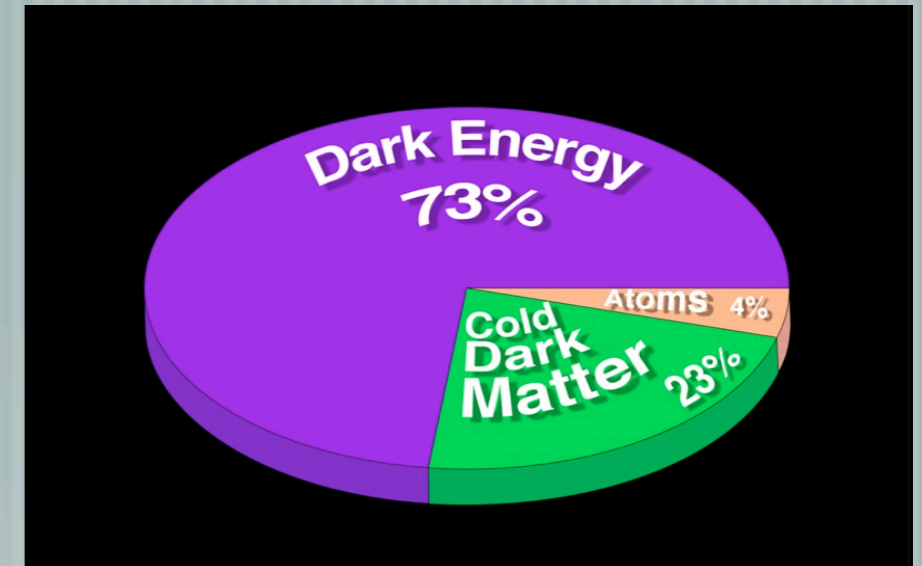
Partículas pesadas estables, reliquias primordiales
En supersimetría, partículas supersimétricas

- Búsqueda en detectores subterráneos o satélites
- Producción en LHC

- **Energía oscura:**

¿Constante cosmológica?

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



PREGUNTAS PARA EL s.XXI

¿Por qué hay materia y no antimateria? Bariogénesis

- El Universo visible no contiene antimateria
- Nucleosíntesis requiere una cantidad neta de bariones: $n_v/n_b=10^9$

¿Qué pasó con la antimateria en el Universo?

Universo primitivo:

igual número de partículas y antipartículas, en equilibrio térmico con la radiación, por creación-aniquilación

La gran aniquilación:

El Universo se enfría, se congela la creación de pares, gran aniquilación de partículas y antipartículas

Los supervivientes:

Antes de la aniquilación, se genera un exceso de partículas

Una partícula extra por cada mil millones de pares

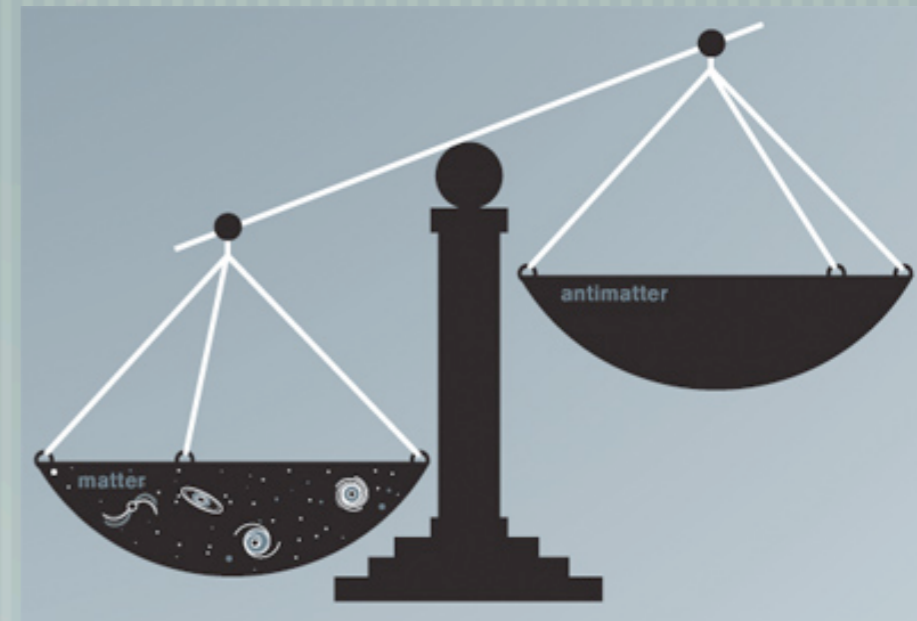
Tras la gran aniquilación, una partícula por cada mil millones de fotones

¿Cómo se generó este exceso de materia? (Sakharov, 1967)

Violación de CP (simetría materia-antimateria)

El modelo estándar viola la simetría CP (Cronin, Fitz, 1964), pero no de forma suficiente para generar la asimetría materia-antimateria en el Universo

¿Nuevos procesos que no conservan CP? ⇒ Se buscarán en LHC

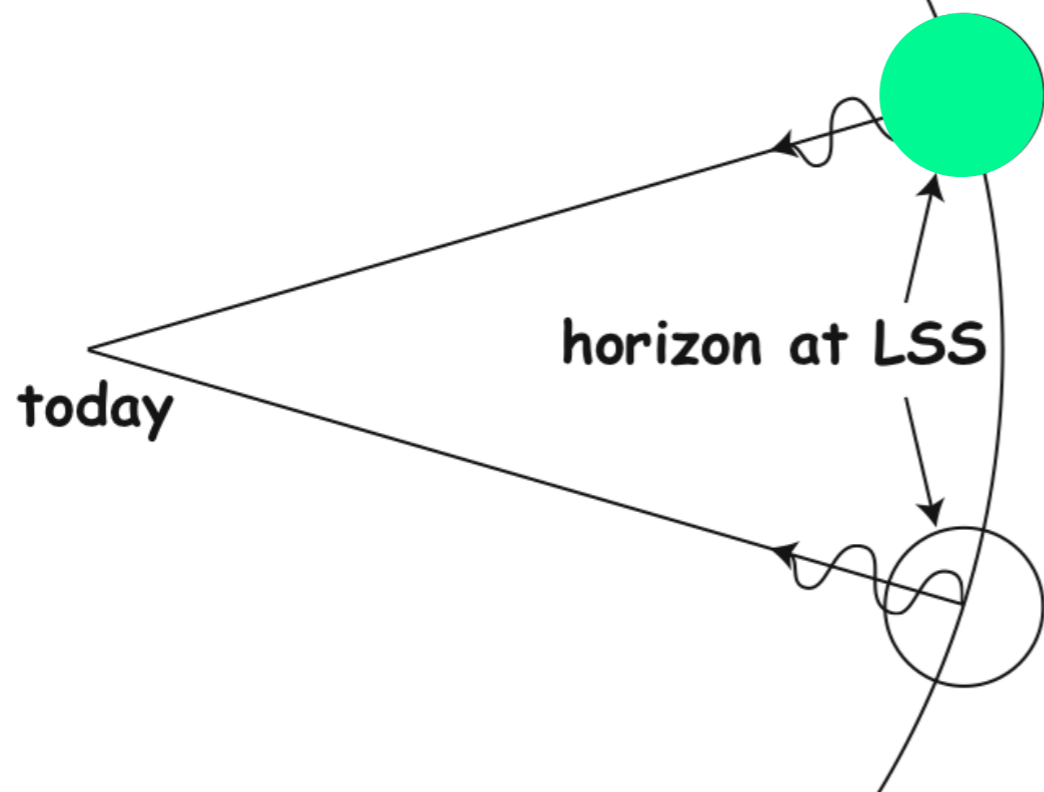


PREGUNTAS PARA EL s.XXI

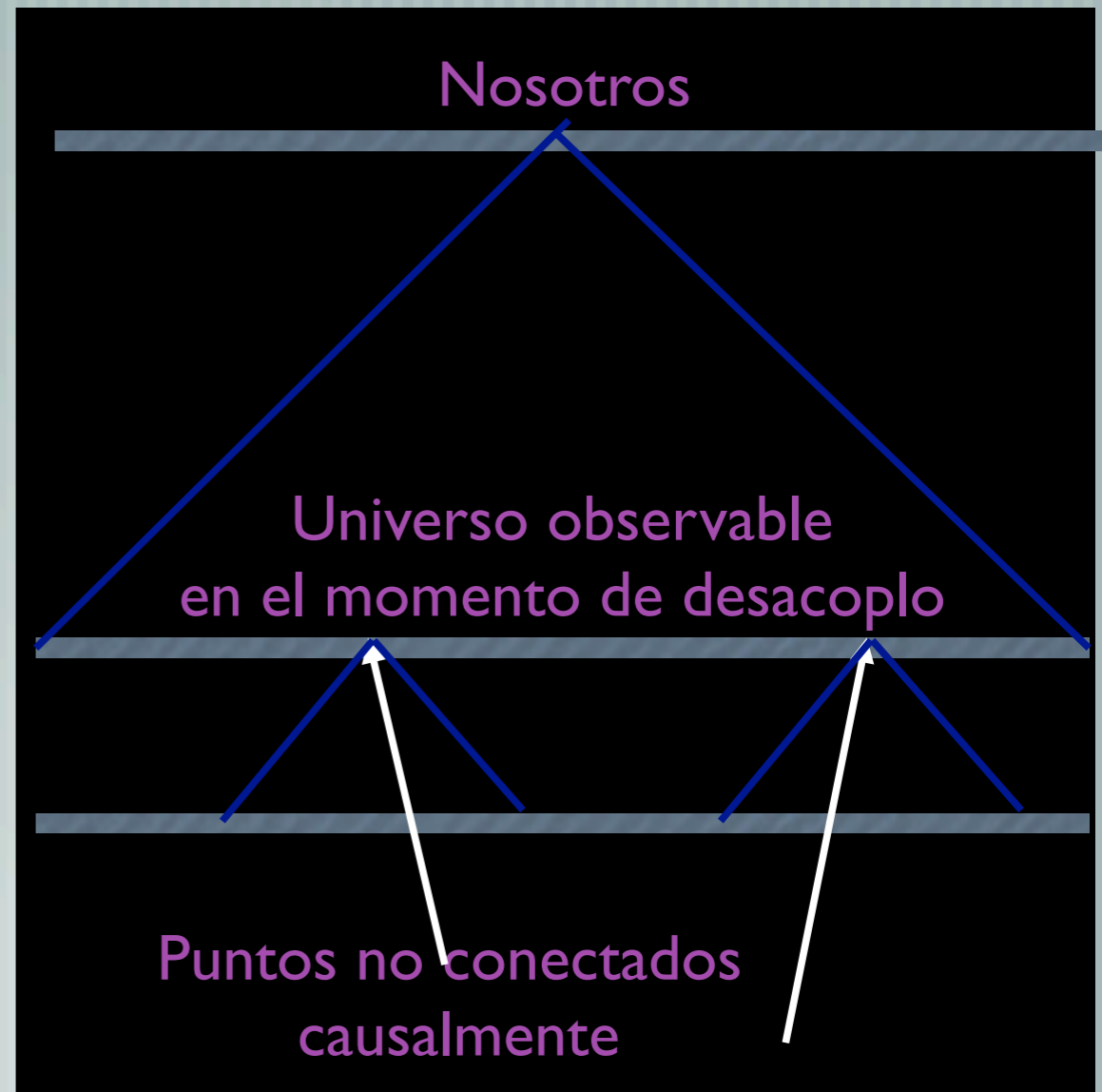
¿Cómo fueron los primeros instantes del Universo? Inflación

- ¿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



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



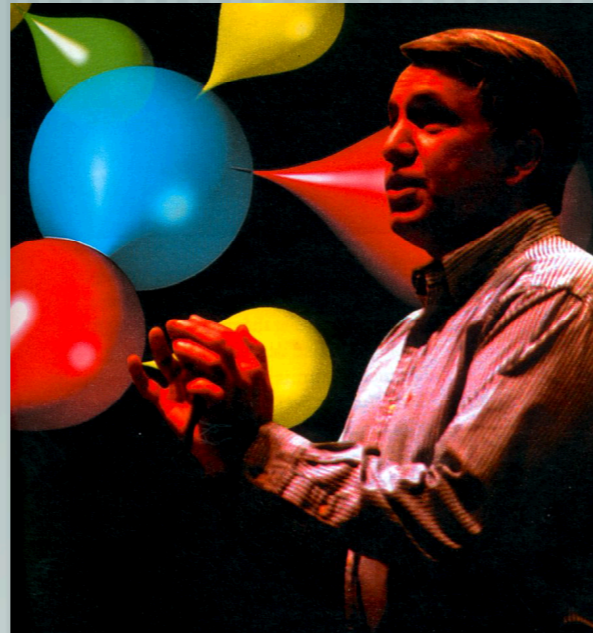
PREGUNTAS PARA EL s.XXI

Inflación: Guth, Linde, 1980

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



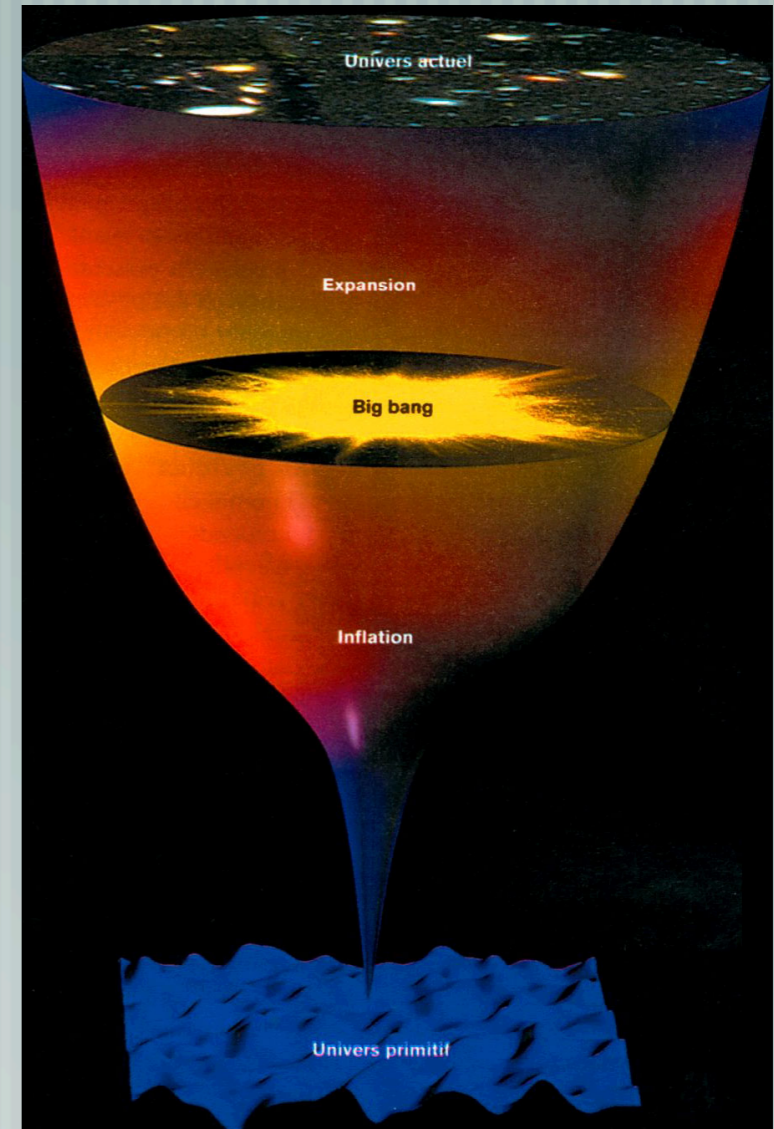
Alan Guth



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?



PREGUNTAS PARA EL s.XXI

FUNCIONAMIENTO DEL LHC



¡Nuevas respuestas!

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

Los quarks y leptones, ¿son elementales?

¿Están relacionados de algún modo?

¿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?

¿Gravedad cuántica?

¡Esta es la Física del s.XXI!

BIBLIOGRAFÍA

- Los tres primeros minutos del Universo, S. Weinberg
- Feynman lectures on Physics, R. Feynman (tercer tomo introducción a la Mecánica Cuántica)
- Cualquier otro libro de Feynman de divulgación
Electrodinámica Cuántica
¿Está Vd. de broma, Sr. Feynman?
...
- Historia del tiempo (S. Hawking)
- El Universo Elegante (B. Green), Libro + Programa TV
- Warped Passages (L. Randall), etc, con cierta “precaución” (últimos capítulos tienden a ser especulativos)
- Agujeros Negros y Tiempo Curvo, K. Thorne

diego.blas@epfl.ch