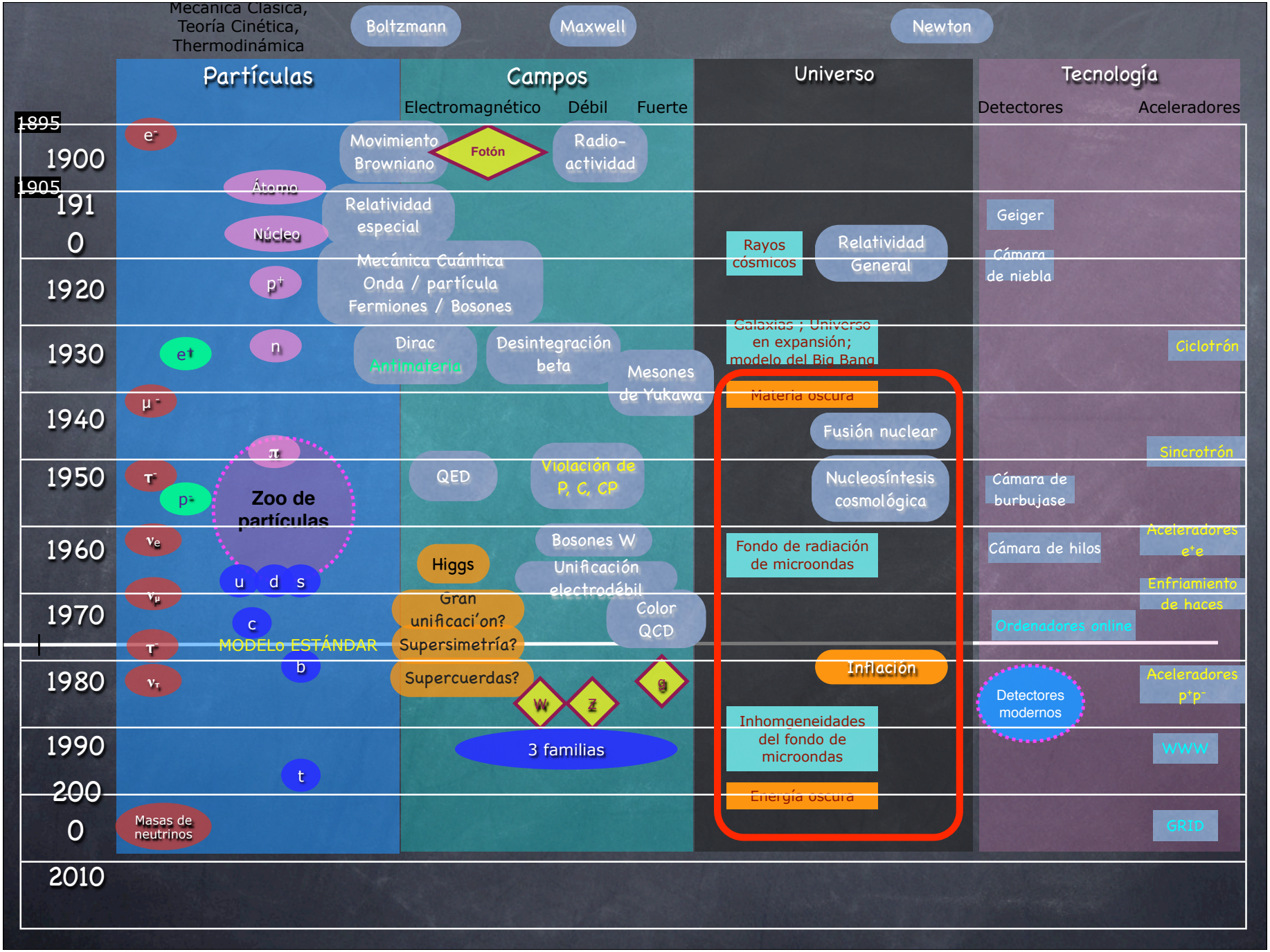

Mecánica Clásica, Teoría Cinética, Thermodinámica
Boltzmann
Maxwell
Newton
Partículas
Campos
Electromagnético
Débil
Fuerte
Universo
Tecnología
Detectores
Aceleradores
1895
1900
1905
1910
1920
1930
1940
1950
1960
1970
1980
1990
2000
2010
e⁻
Movimiento Browniano
Fotón
Radio-actividad
Átomo
Relatividad especial
Núcleo
Rayos cósmicos
Relatividad General
Geiger
Cámara de niebla
p⁺
Mecánica Cuántica
Onda / partícula
Fermiones / Bosones
e⁺
n
Dirac
Antimateria
Desintegración beta
Galaxias ; Universo en expansión; modelo del Big Bang
Ciclotrón
Mesones de Yukawa
μ⁻
Materia oscura
Fusión nuclear
Sincrotrón
π
τ⁻
p̄
QED
Violación de P, C, CP
Nucleosíntesis cosmológica
Cámara de burbujase
Zoo de partículas
νe
Bosones W
Higgs
Fondo de radiación de microondas
Cámara de hilos
Aceleradores e⁺e⁻
u
d
s
Unificación electrodébil
Enfriamiento de haces
νμ
Gran unificaci'on?
Color QCD
Ordenadores online
c
MODELo ESTÁNDAR
Supersimetría?
τ⁻
Inflación
b
Supercuerdas?
Aceleradores p⁺p⁻
νT
W
Z
g
Detectores modernos
Inhomgeneidades del fondo de microondas
3 familias
WWW
t
Energía oscura
Masas de neutrinos
GRID

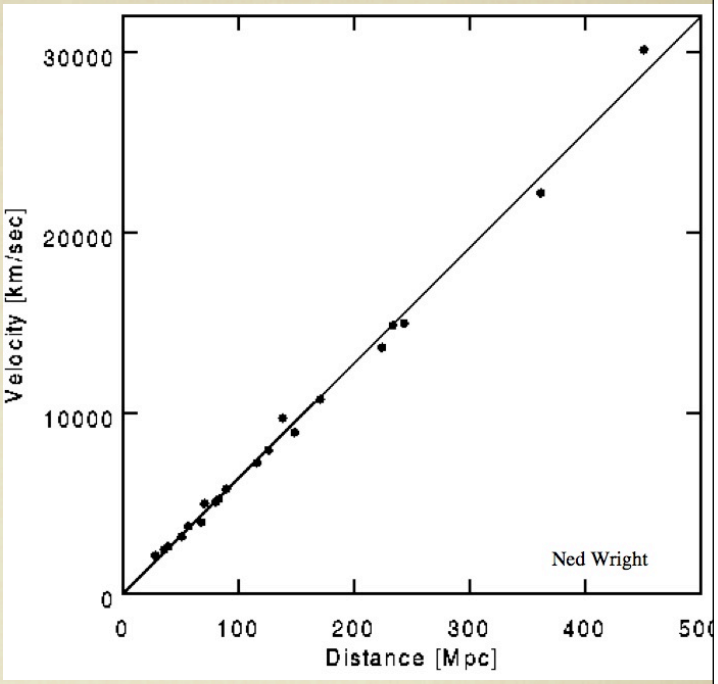
COSMOLOGÍA

1960

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~50-100 km s^{-1} Mpc^{-1})
Hoy: H = 70±3 km s^{-1} 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

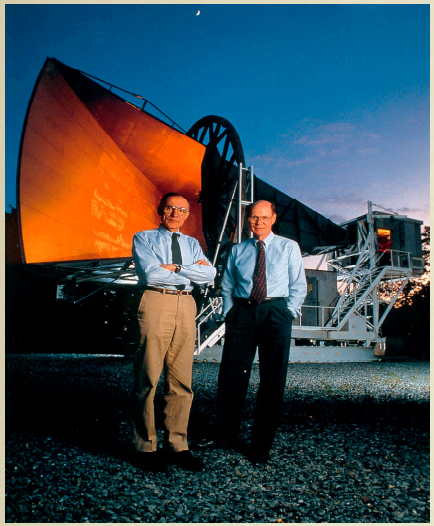
Fondo de radiación de microondas

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~5K

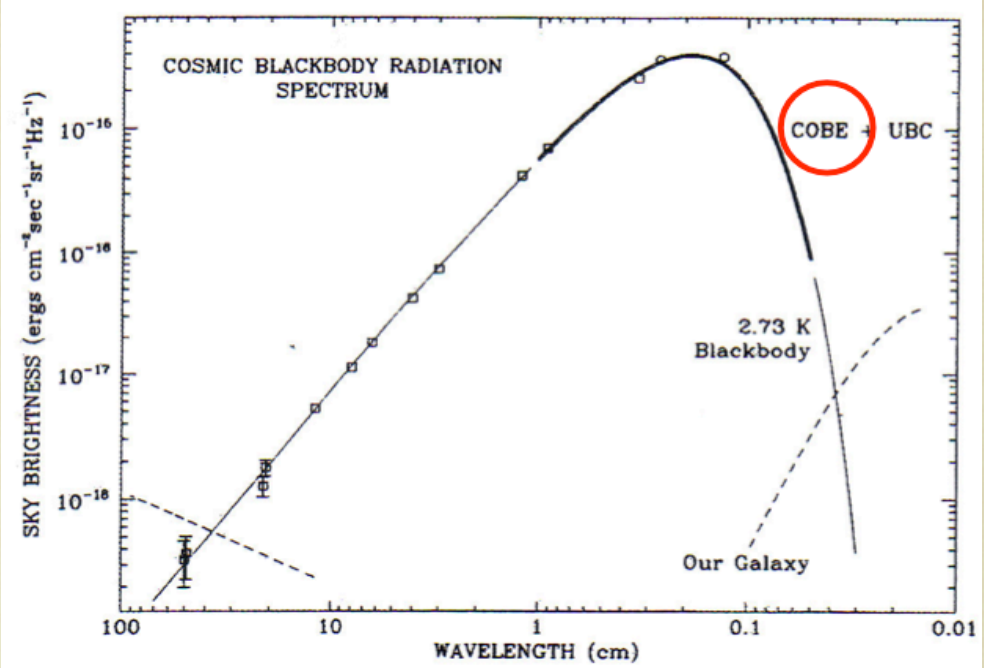
COSMOLOGÍA

1963

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

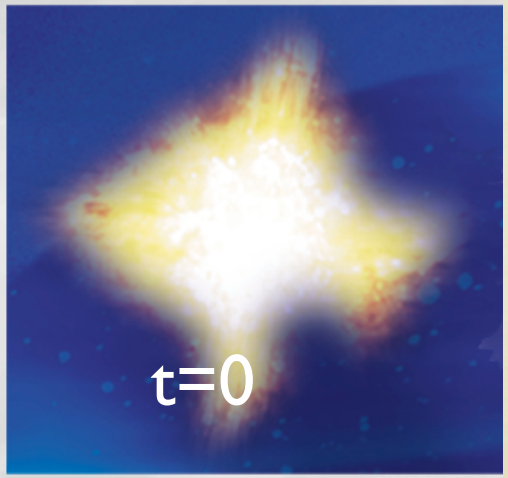
COSMOLOGÍA

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

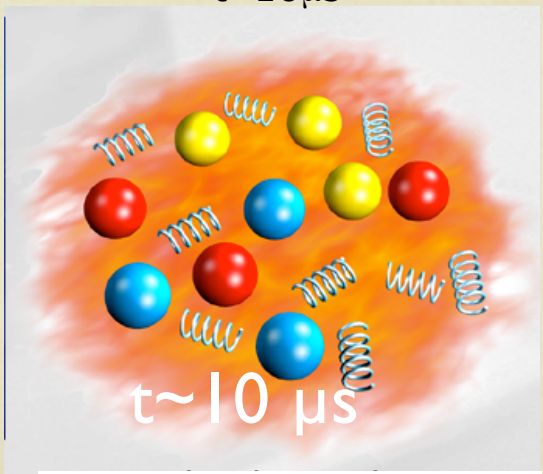
Y la Cosmología sirve de banco de pruebas para la Física de Partículas

t=0



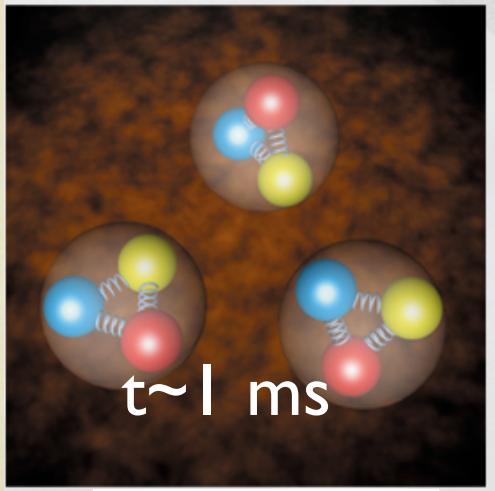
Big Bang

t≈10μs



Plasma de partículas

t ≈1ms

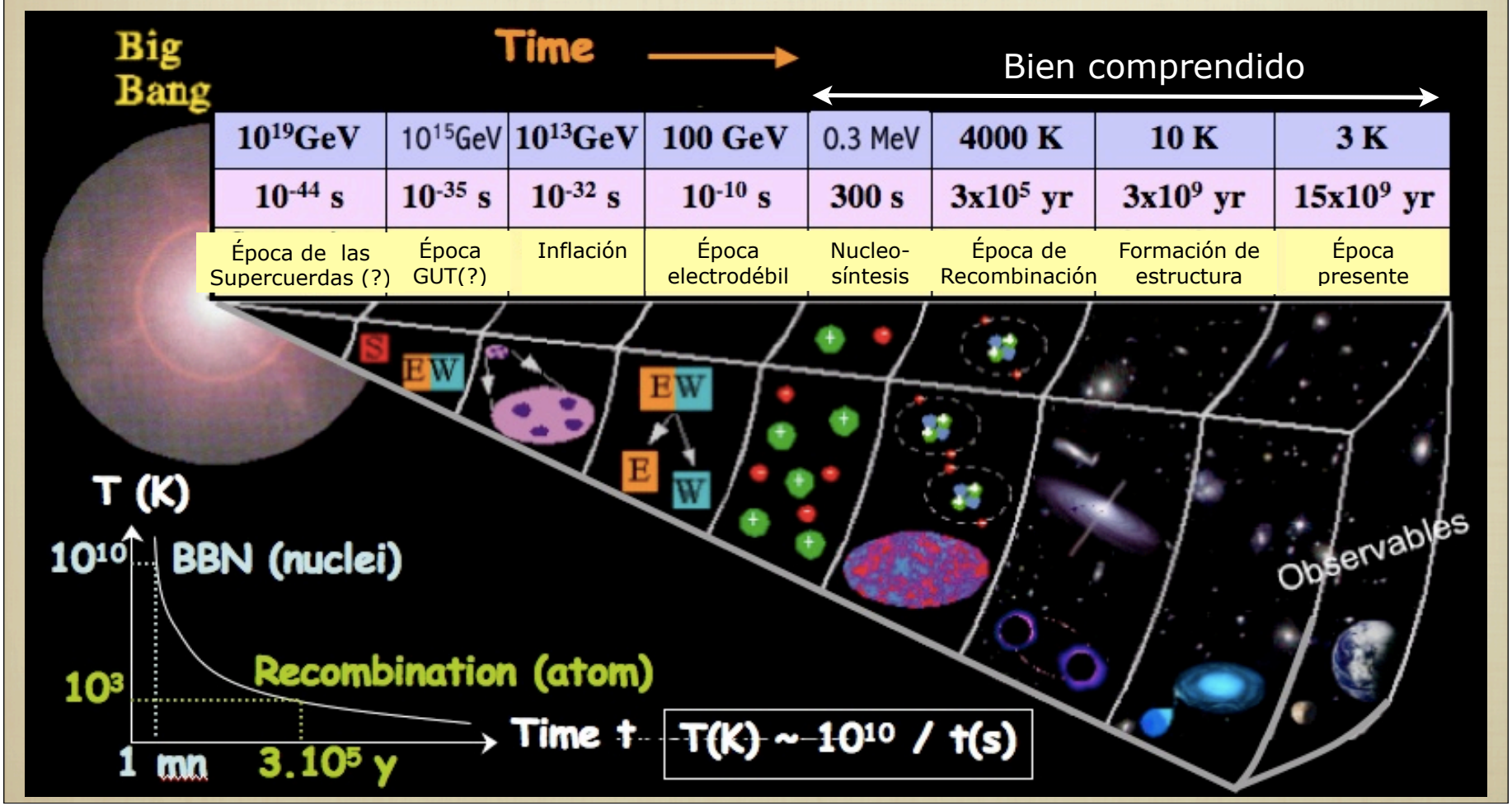


Nucleones

COSMOLOGÍA

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

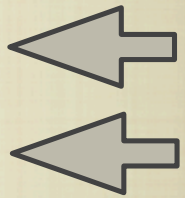
Pero nos proporcionan una imagen bastante detallada de la evolución del Universo a partir de las primeras fracciones de segundo



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

COSMOLOGÍA

1960

t = 10^{-35} s

Fluctuaciones de densidad (¿inflación?)

t ~ 1 mn

Nucleosíntesis

Abundancias de núcleos ligeros

observable

t ~ 300000 yrs

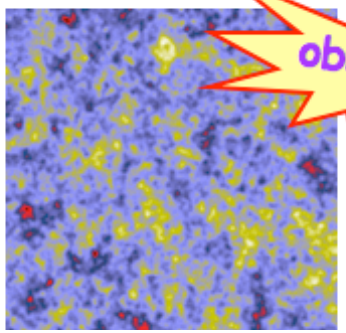
Recombinación p+e-> H

Materia:
Colapso gravitatorio

Fotones:
Propagación libre

observable

Estrellas, galaxias, cúmulos



observable

Fondo de radiación

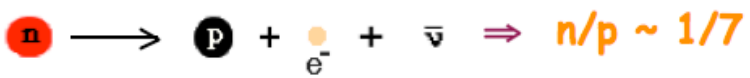
Nucleosíntesis primordial ("Big Bang Nucleosynthesis")

En los primeros minutos, el Universo lleno de fotones, protones, neutrones, electrones, en equilibrio térmico

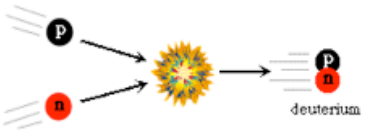
Temperatura tan alta que los núcleos están disociados por la agitación térmica

Al enfriarse hasta T~0.3 MeV, los protones y neutrones cristalizan en núcleos

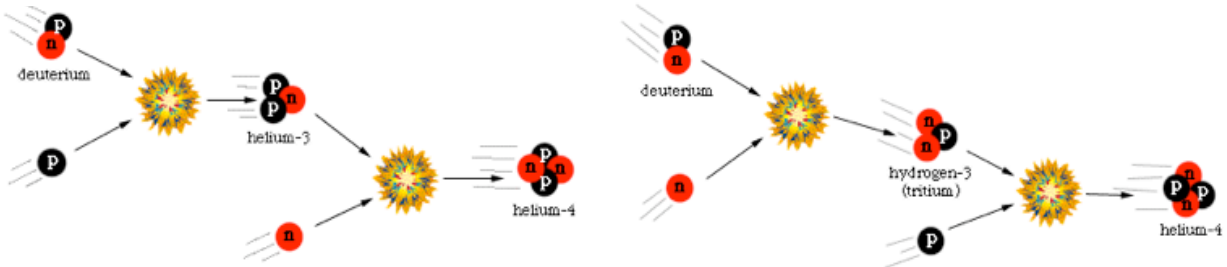
- Desintegración del neutrón



- Formación de Deuterio



- Formación de Helio-4



Fracción de masa en He=2/8=0.25

Fracción en H=0.75

El cociente n_γ/n_b controla la rapidez del paso intermedio

Nucleosíntesis primordial

COSMOLOGÍA

1948

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

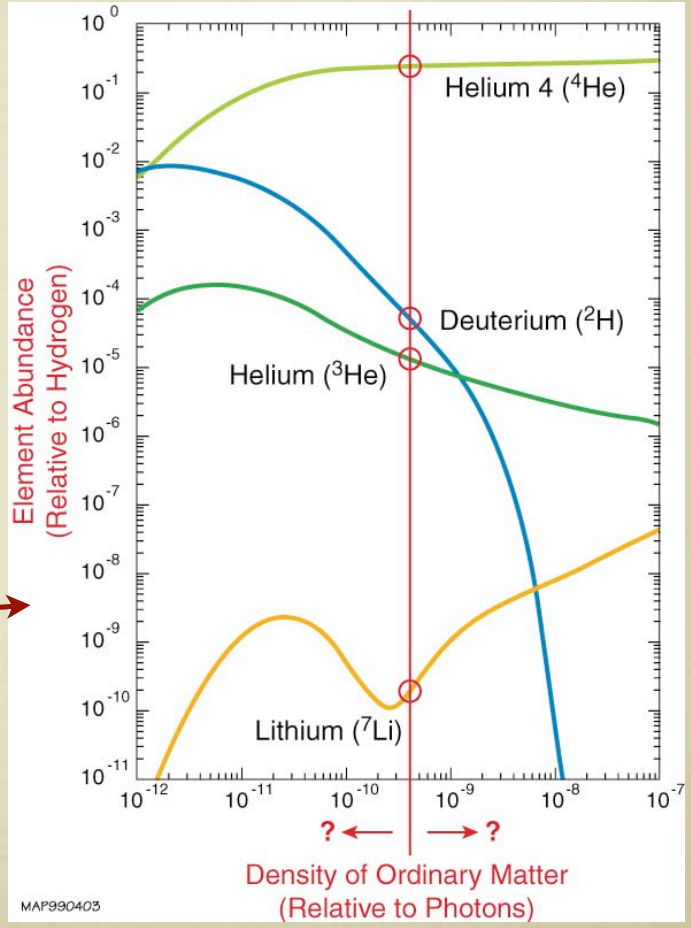
Los núcleos formados enseguida están demasiado alejados unos de otros para combinarse en otros más complejos

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

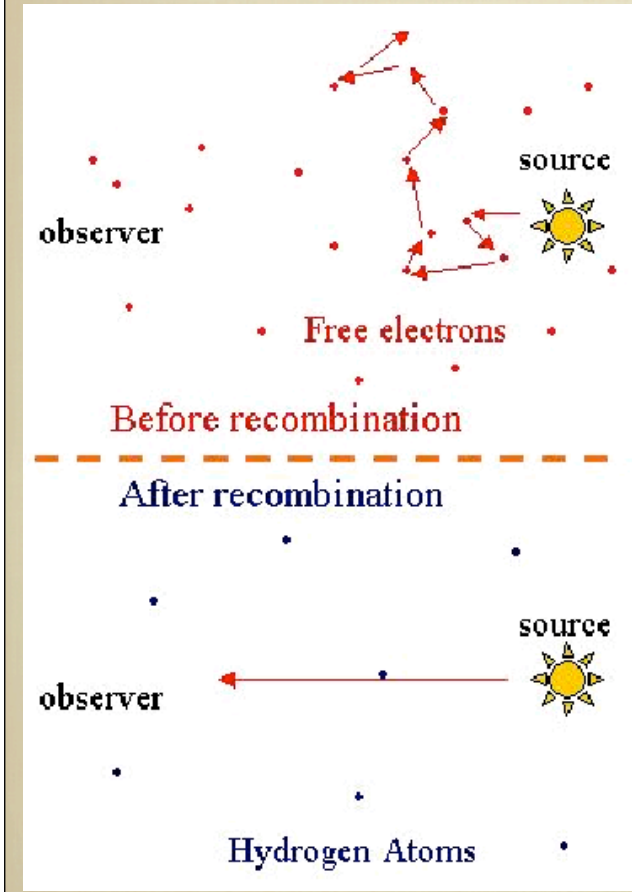


Pregunta para el s.XXI: **Bariogénesis**

¿Por qué hay materia y no antimateria?
¿Por qué núcleos $n_\gamma/n_b=10^9$?

COSMOLOGÍA

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~0.4 eV=4000K, los núcleos y electrones cristalizan en átomos

- Los átomos son neutros ⇒ 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=2.7K** (λ~Microondas)

Fondo de radiación de microondas

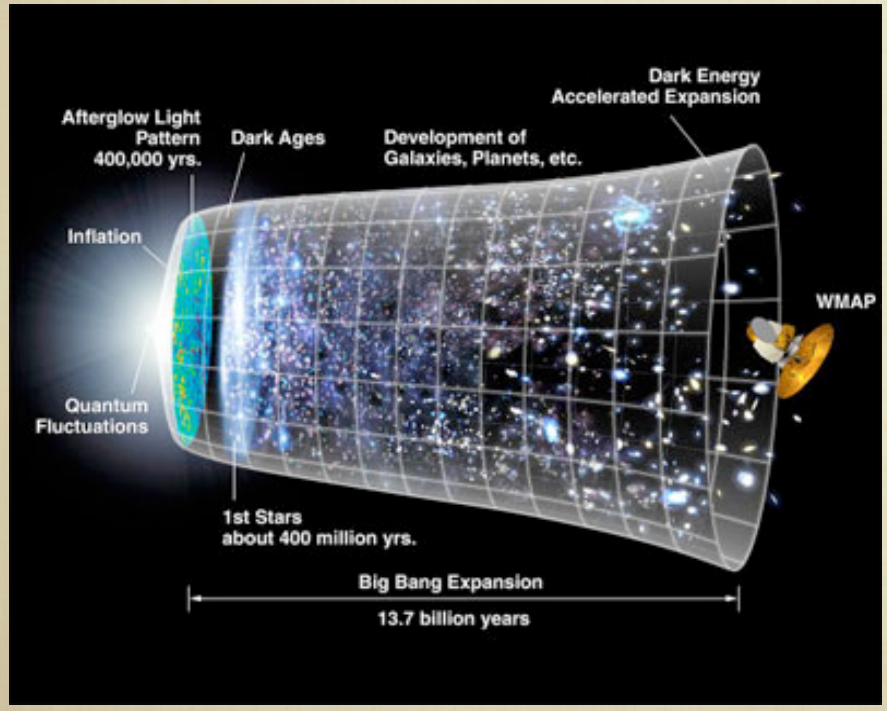
COSMOLOGÍA

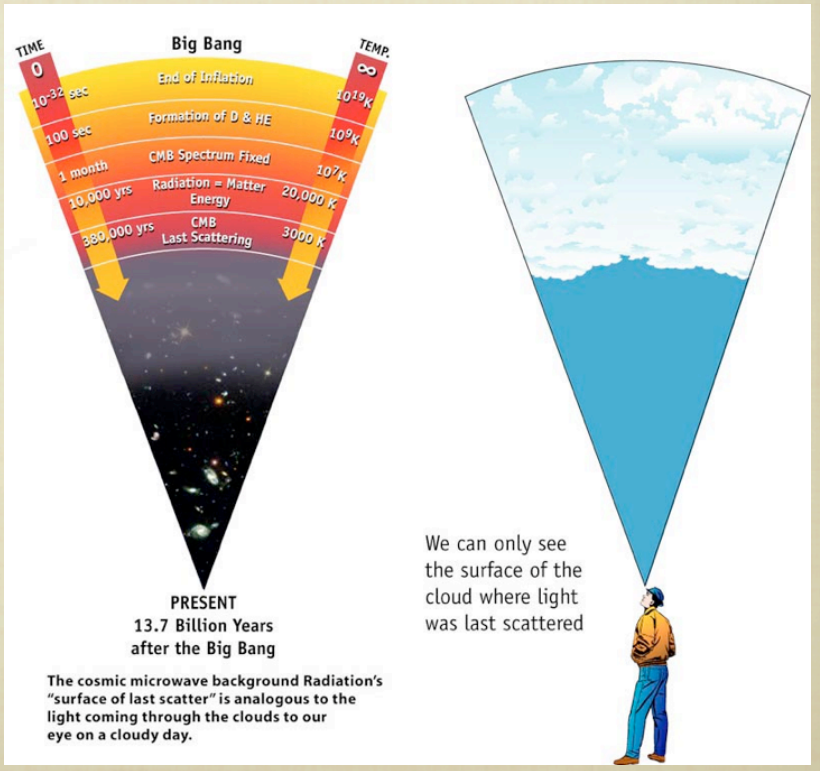
1992,2003

- Descubrimiento en 1965

- Medidas muy precisas en diversos experimentos, recientemente los satétiles COBE (1992) y WMAP (2003-08)
(Se prepara el lanzamiento del satélite Planck 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)



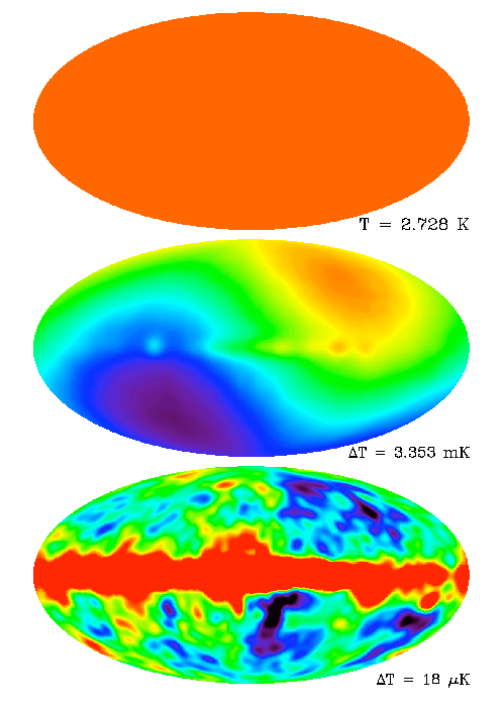


Fondo de radiación de microondas

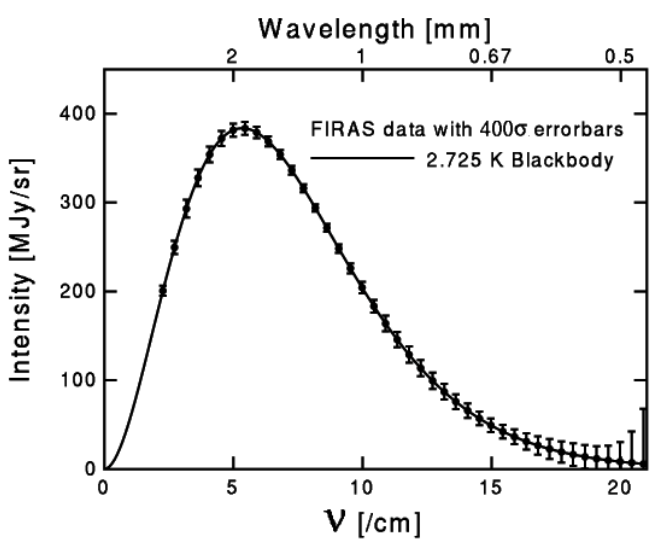
COSMOLOGÍA

1992

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



T= 2.7 K



δT= 3.3 mK

(anisotropía tras eliminar el modo constante)

δT= 18 μK

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

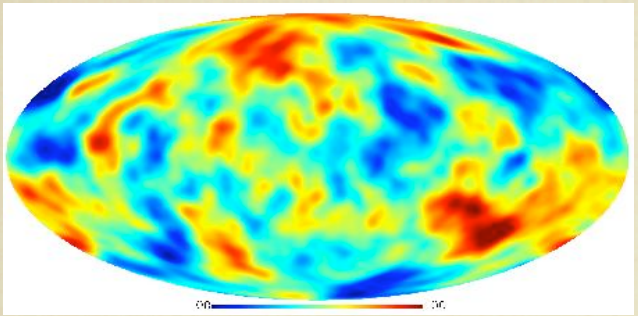
Extremadamente homogéneo, una parte en 100.000

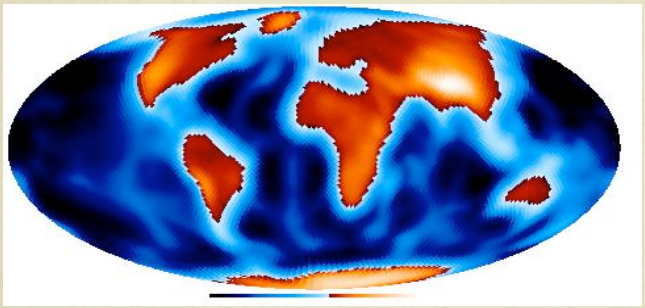
Las inhomogeneidades en la temperatura se originan por el corrimiento al rojo debido a fluctuaciones primodiales en la densidad

COSMOLOGÍA

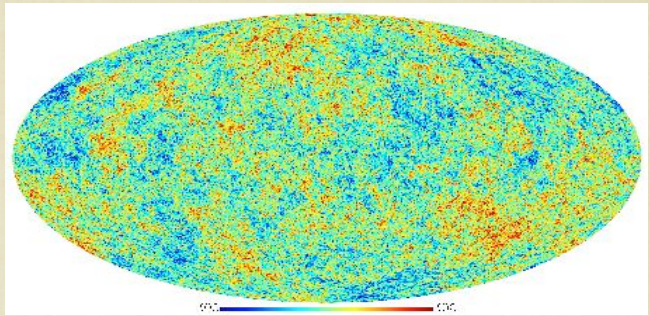
WMAP mejoró la precisión de las observaciones del CMB

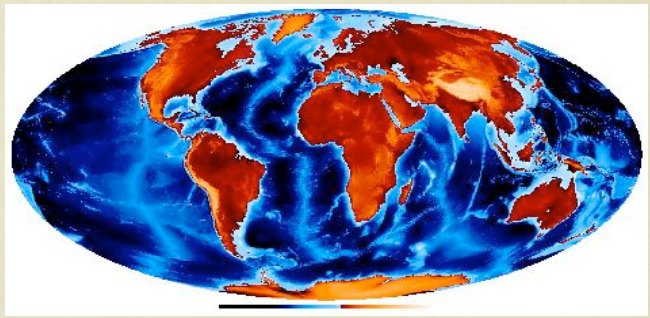
COBE
(resolución de 7 grados)





WMAP
(resolución de .25 grados)

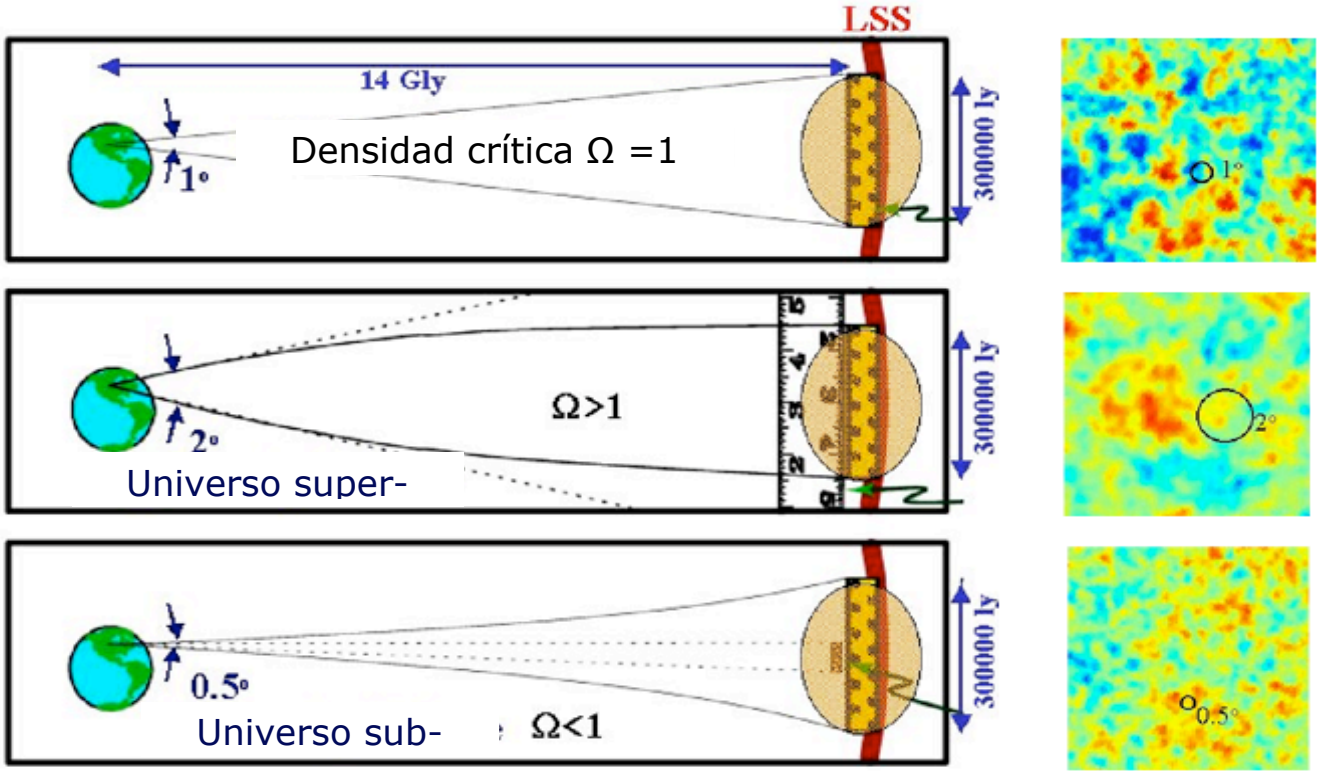




(analogía con resolución en mapas terrestres)

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



El tamaño aparente de la escala de anisotropía depende de Ω_{tot}

Los datos muestran que el Universo tiene la densidad crítica
Ω_{tot} =1.02 ±0.02 **y su geometría es plana**

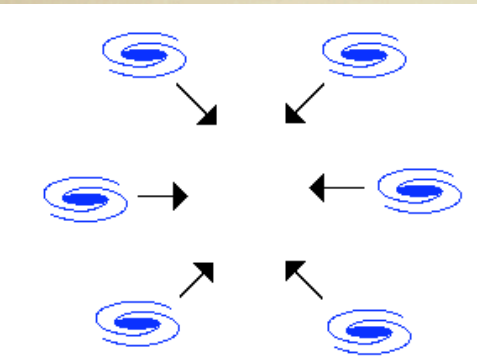
La extraña composición del Universo

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

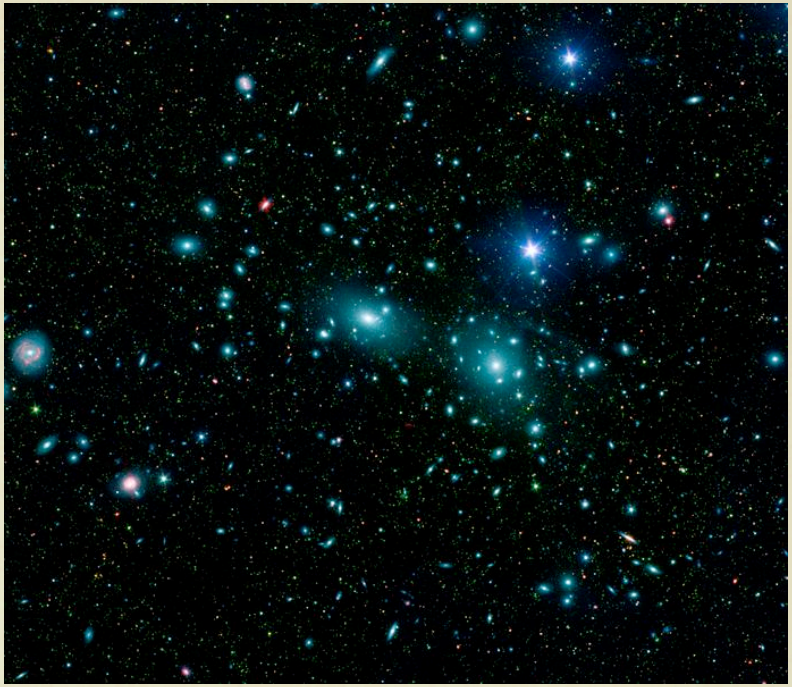
Un Universo muy oscuro…

COSMOLOGÍA

Indicios tempranos de la existencia de Materia oscura (Zwicky)



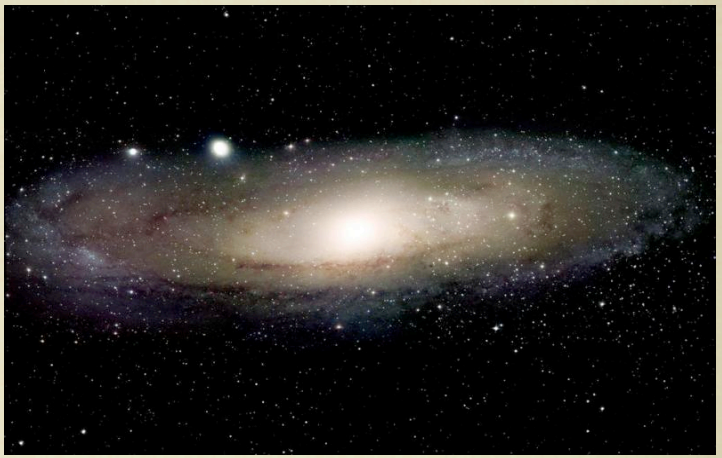
F. Zwicky



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

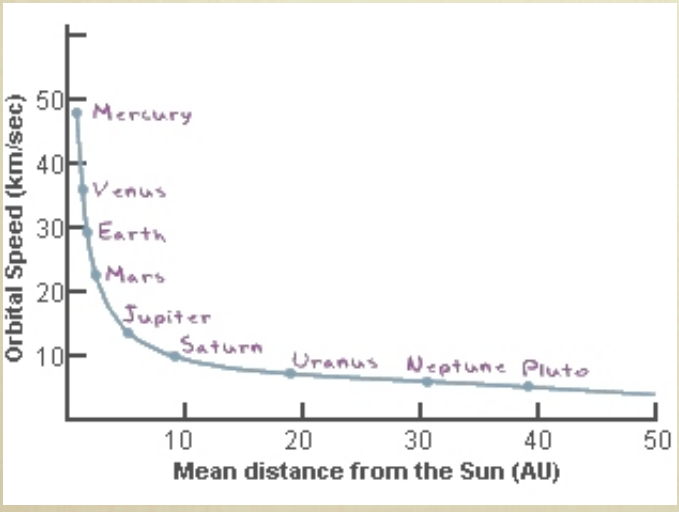
Curvas de rotación de galaxias espirales:
Velocidad orbitar vs. distancia radial
(depende de la masa gravitacional del sistema)



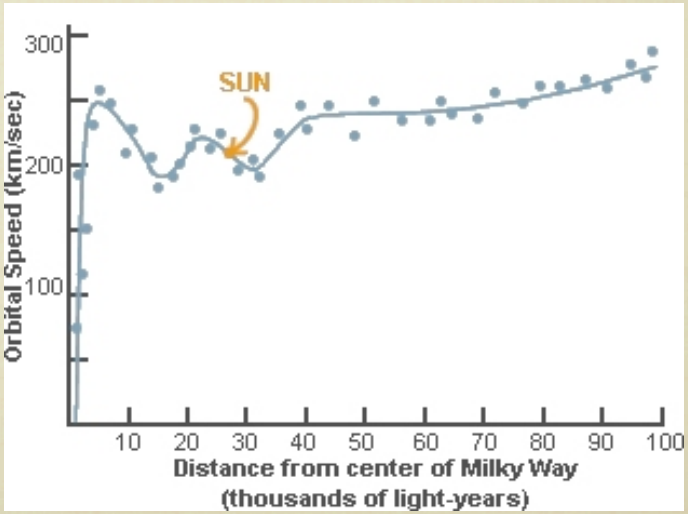
Usando la masa visible
se predice una dependencia $r^{-1/2}$

Sin embargo, los datos observacionales
no concuerdan con esa dependencia

Sugieren presencia de materia extra, oscura



Sistema Solar (una masa central)



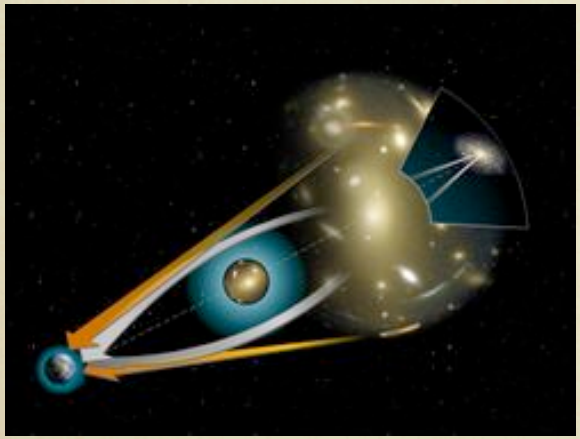
Galaxia (Vía Láctea)

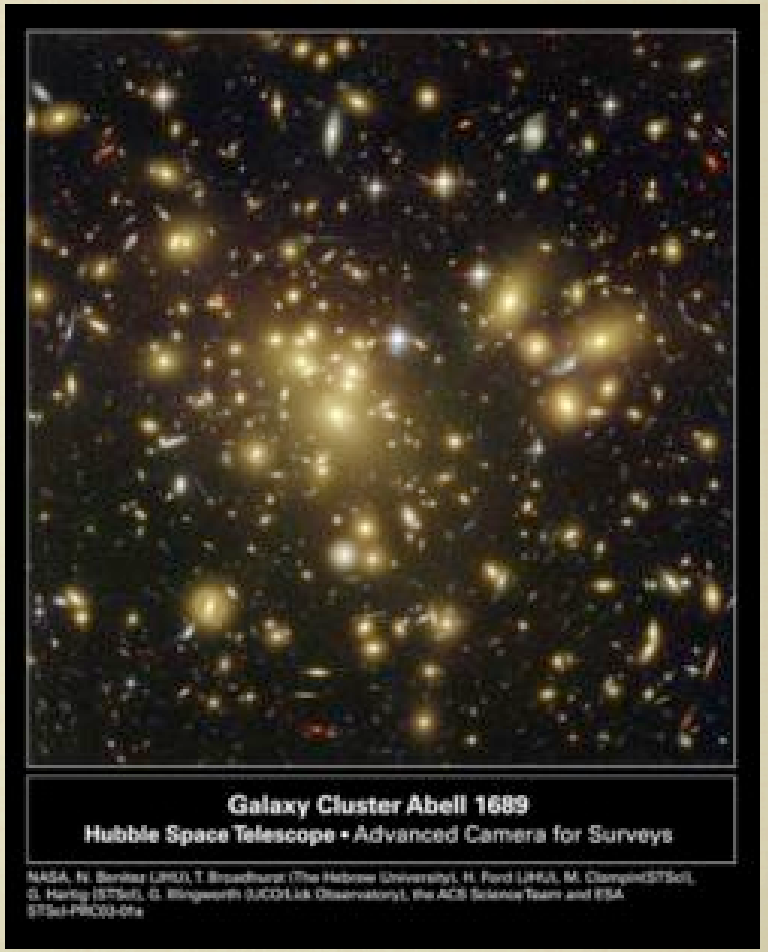
COSMOLOGÍA

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 Abell 1689
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, N. Benítez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin(STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA
STScI-PRC03-01a

COSMOLOGÍA

¡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

COSMOLOGÍA

1998

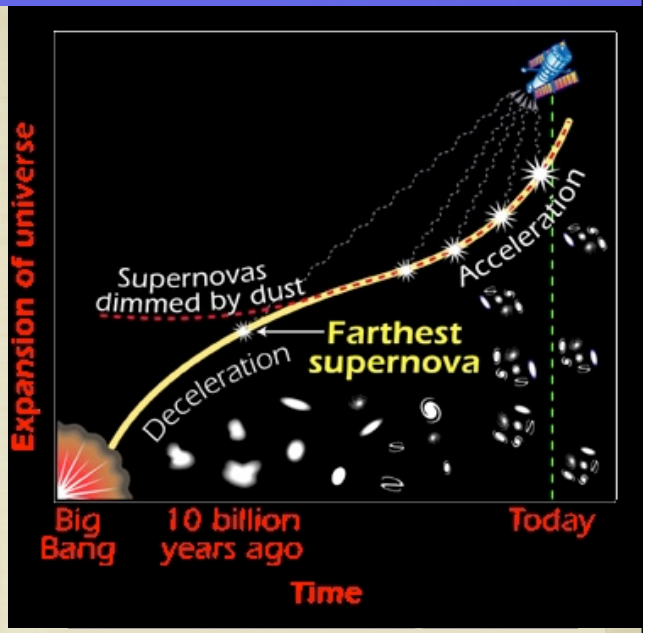
Evidencia de "Energía Oscura"

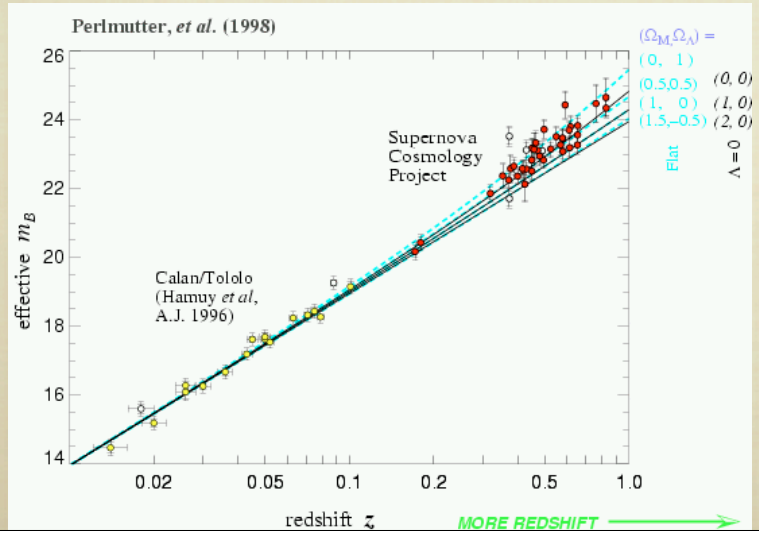
Medida de la expansión de Hubble

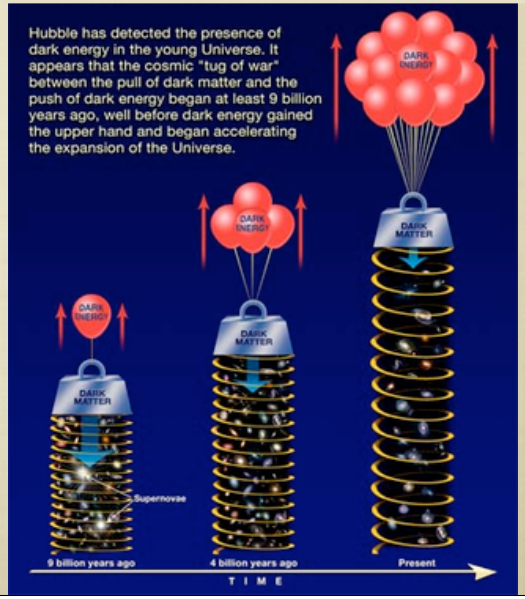
- El Universo ha pasado de una fase de deceleración a una fase de expansión acelerada

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

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







COSMOLOGÍA

~2005

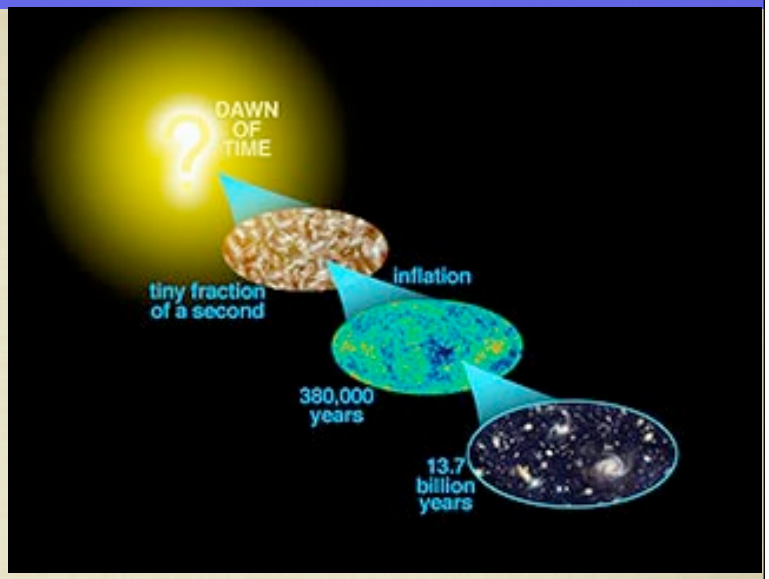
Formación de estructura:

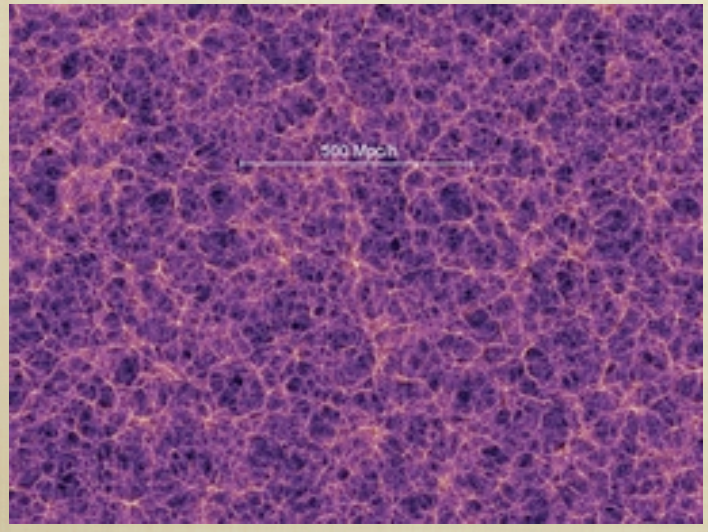
- Inhomogeneidades del CMB: fluctuaciones en la densidad del Universo para t=300.000 años

- Crecen y crecen, y terminan formando nubes de gas, estrellas, galaxias... al cabo de 10^9 años

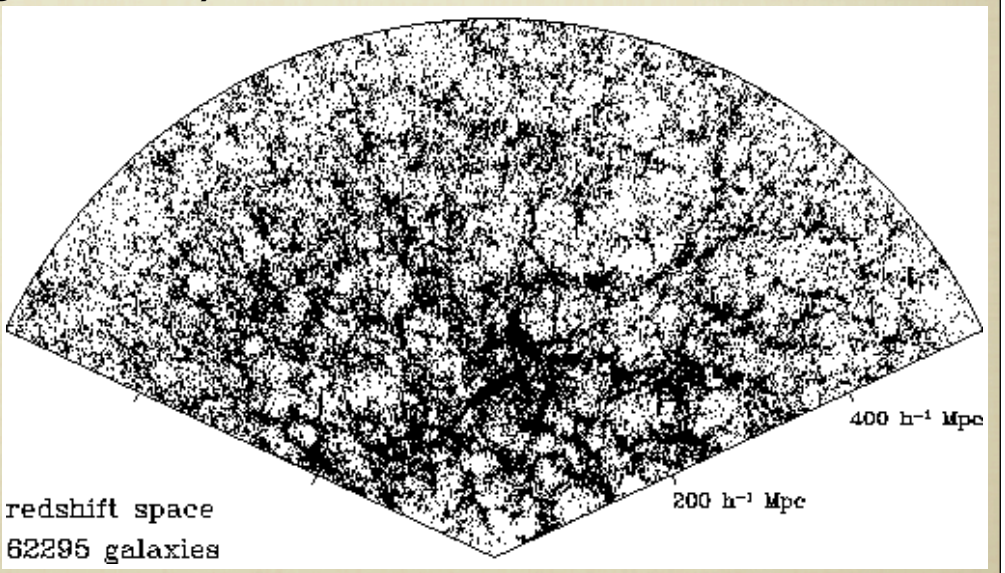
- Las simulaciones en superordenadores dan distribuciones de galaxias en buen acuerdo estadístico con los datos observacionales (!)

(crucial incluir materia oscura y energía oscura)





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

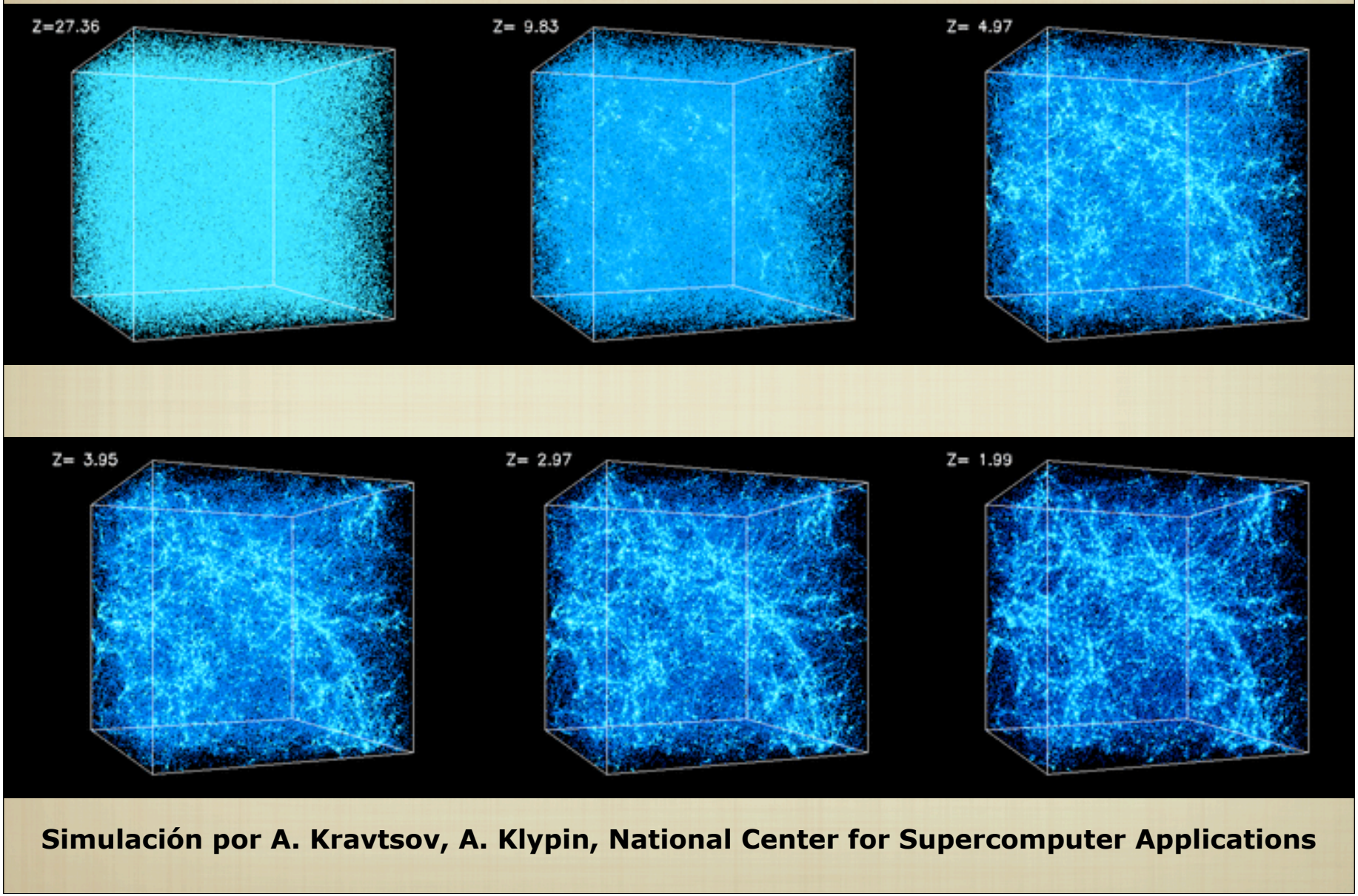


Sloan Digital Sky Survey, 2000

Formación de estructura

COSMOLOGÍA

~2005

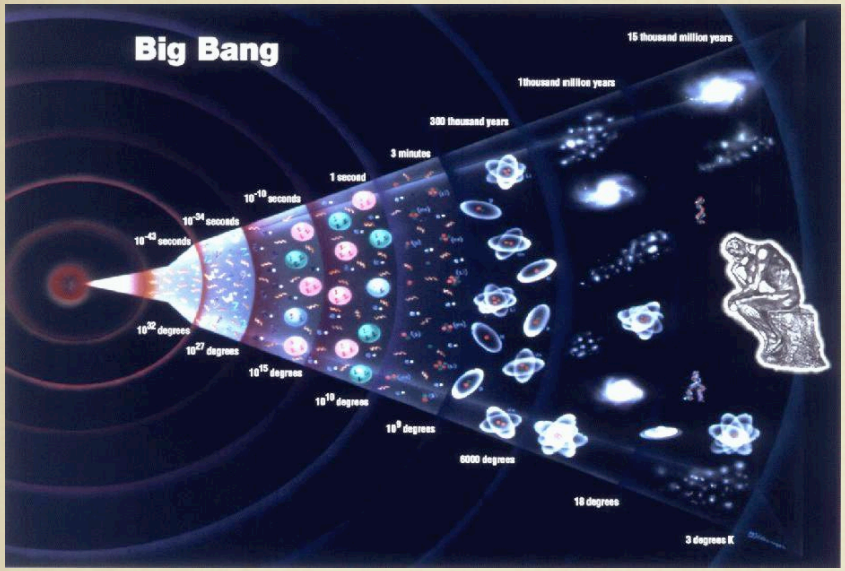


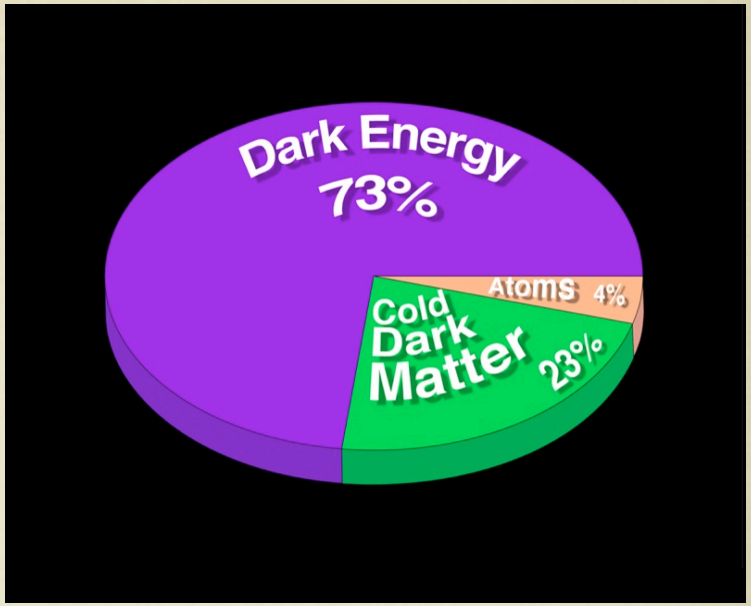
Simulación por A. Kravtsov, A. Klypin, National Center for Supercomputer Applications

COSMOLOGÍA

2008

El modelo estándar de la Cosmología (ΛCDM, "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")

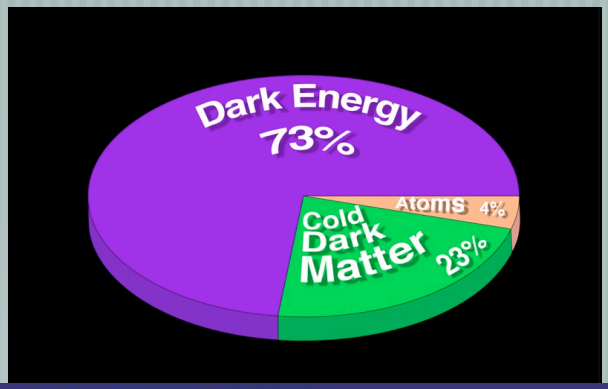
PREGUNTAS PARA EL s.XXI

¿Naturaleza del 96% de la energía del Universo?

- Materia oscura:

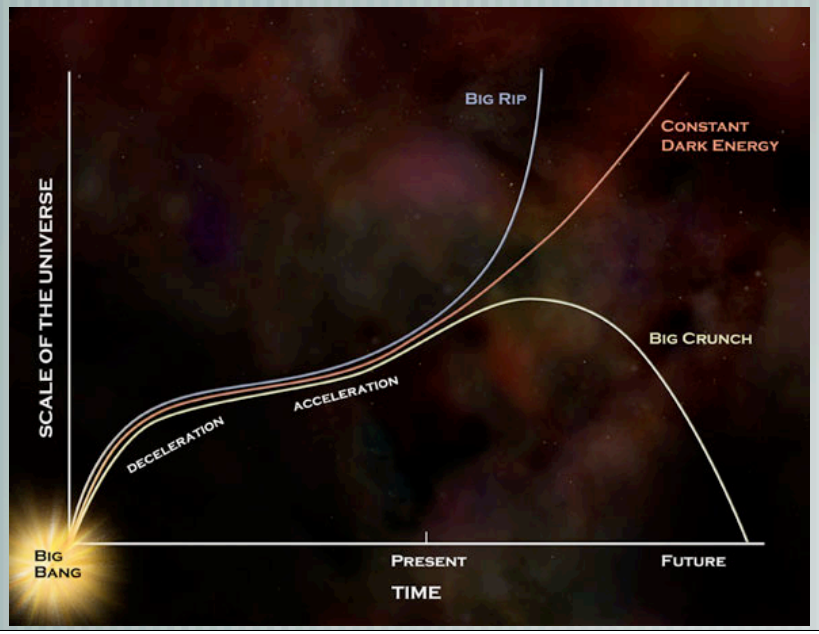
Partículas pesadas estables, reliquias primordiales
En supersimetría, partículas supersimétricas

- Búsqueda en detectores subterráneos o satélites
- Producción en LHC



-Energía oscura:

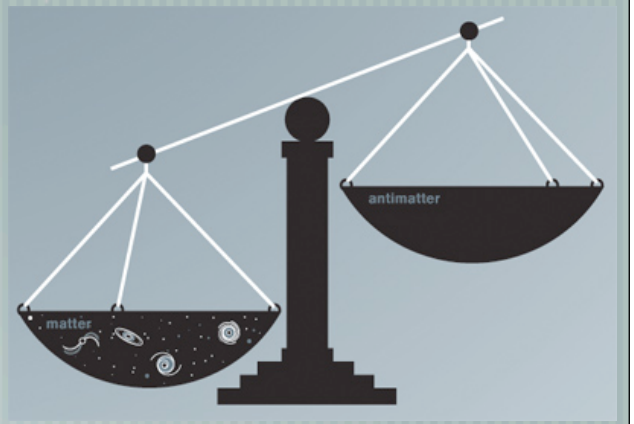
¿Constante cosmológica?
¿Un nuevo tipo de materia? ("quintaesencia")



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: $n_\gamma/n_b=10^9$



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

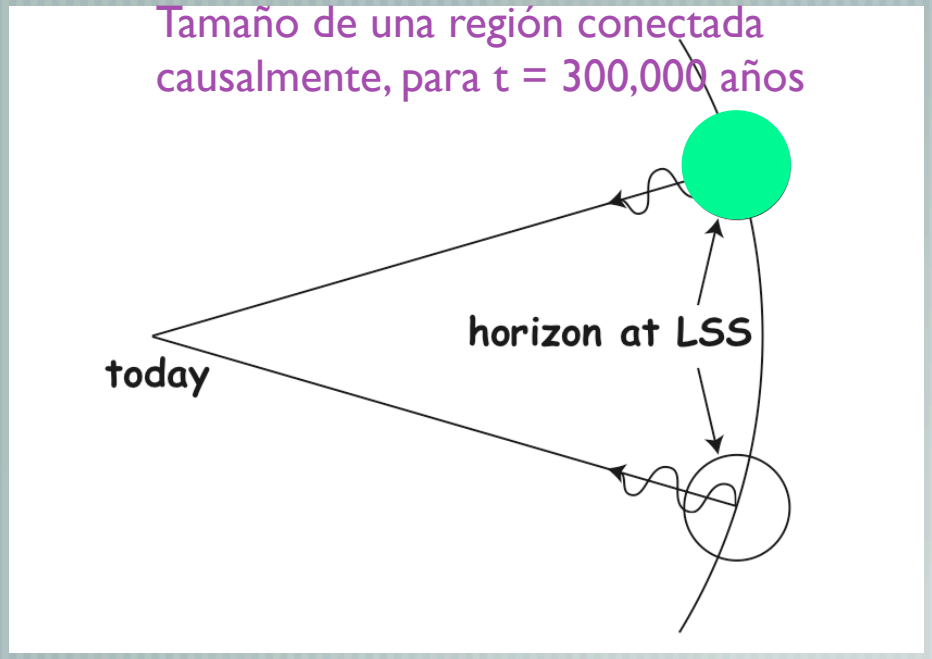
¿Nuevos procesos que no conservan CP? ⇒ Se buscarán en LHC

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

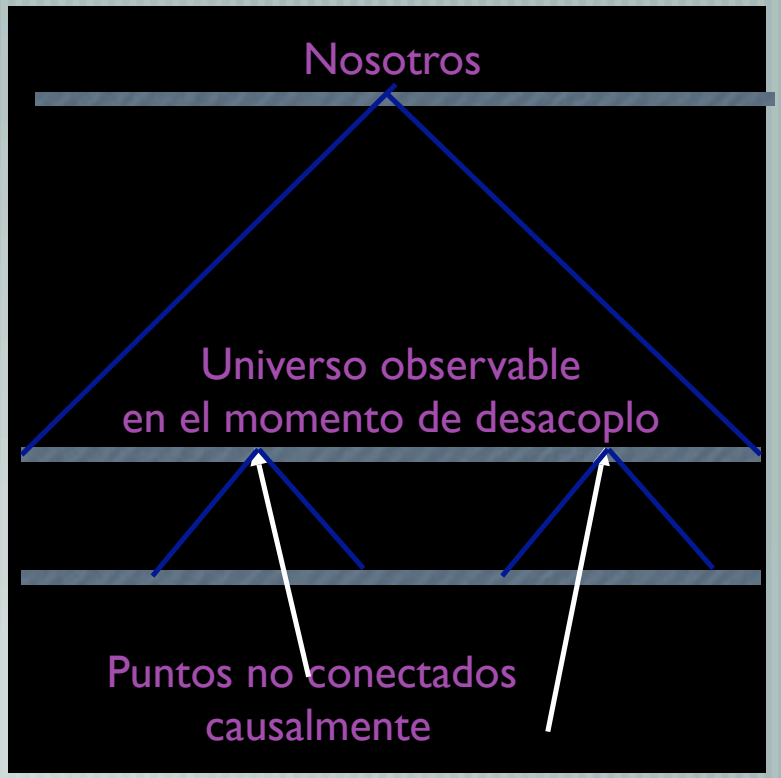
¿Cómo fueron los primeros instantes del Universo? Inflación

- ¿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?



$$\text{Ángulo} \sim \frac{10^3 \times 3.10^5}{14.10^9} \text{ rad} \sim 1°$$

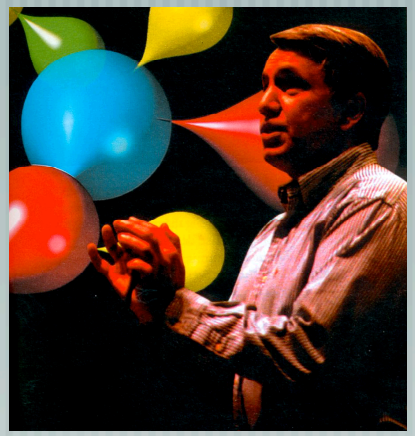


PREGUNTAS PARA EL s.XXI

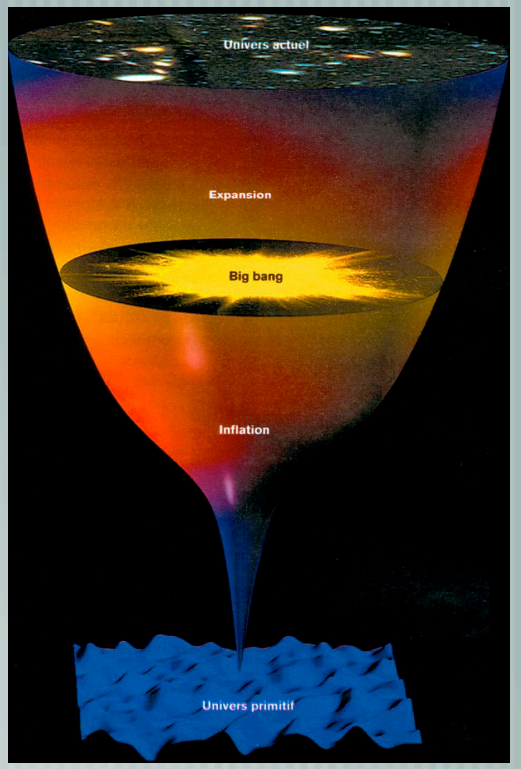
Inflación: Guth, Linde, 1980

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

COMIENZO DEL FUNCIONAMIENTO DEL LHC EN POCOS MESES

¡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?

¡Esta es la Física del s.XXI!