Un vistazo a la Cosmología, la Historia del Universo

Angel M. Uranga
Instituto de Física Teórica
UAM/CSIC
angel.uranga@uam.es

Cosmología y Física Fundamental

Preguntas fundamentales

¿De qué esta hecha la materia?

¿Cómo es el Universo?

¿Es eterno? ¿Tuvo principio? ¿Tendrá fin?

¿Cuáles son las leyes fundamentales del Universo?

¿...?

Curiosidad innata del ser humano

Progreso lleva a más preguntas a niveles más profundos

No motivada por aplicaciones prácticas directas

Aunque muchas aplicaciones derivadas...

Cosmología y Física Fundamental

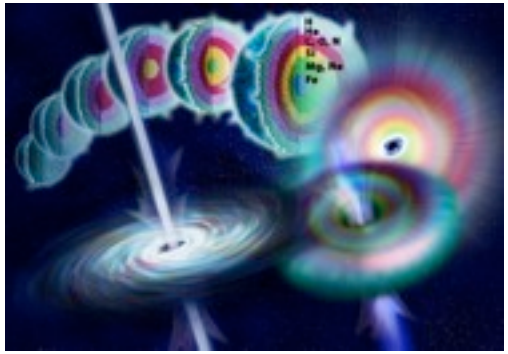
La visión del cielo nocturno, del Universo, mueve al ser humano hacia estas preguntas fundamentales

Antes del s. XX, el Universo se consideraba infinito, inmutable, y regido por la ley de la gravitación de Newton

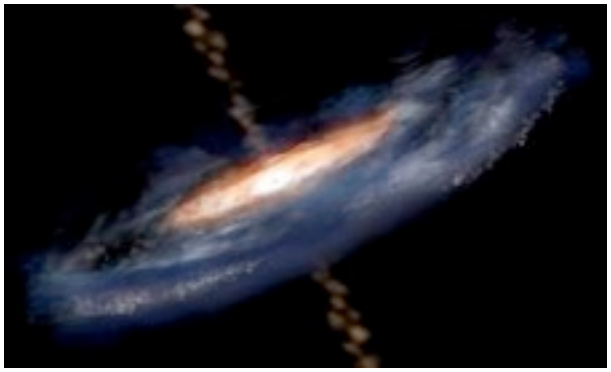
Un Universo muy activo: Astrofísica

Sin embargo, gran riqueza y actividad en el Cosmos

Las estrellas nacen, viven y mueren



Las galaxias son activas



etc... agujeros negros, estrellas de neutrones, ...

... que ejerce una fascinación sin límite en el ser humano

Cosmología: El Universo como un todo

El cambio más brutal en nuestra visión del Universo es cuando lo consideramos como un todo

Universo Observable

10^{26} m

M. García-Pérez

100000000000000000000000 m

Supercúmulos Locales

10^{24} m

100000000000000000000000 m

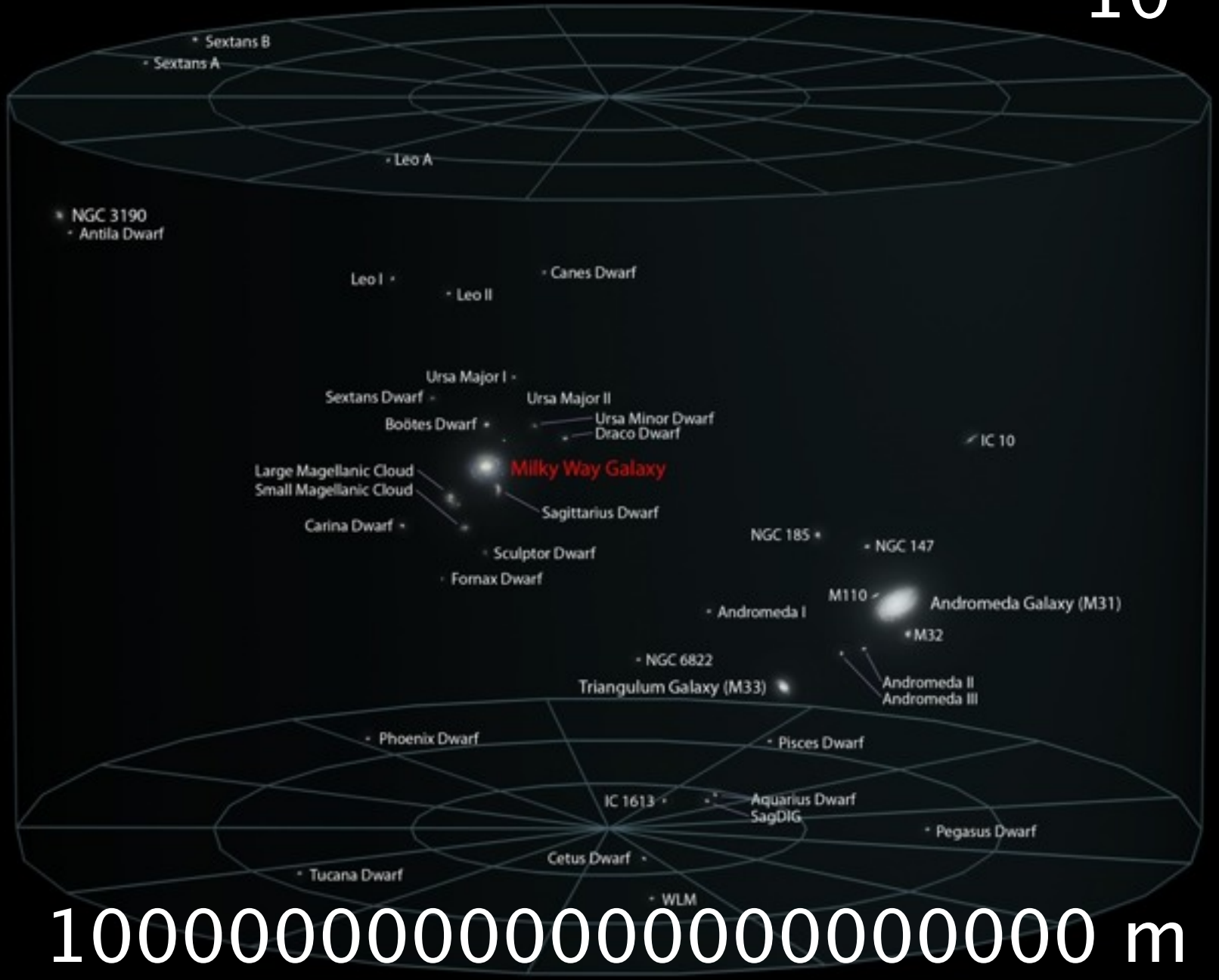
Supercúmulo Virgo

10^{23} m

100000000000000000000000 m

Grupo Local de galaxias

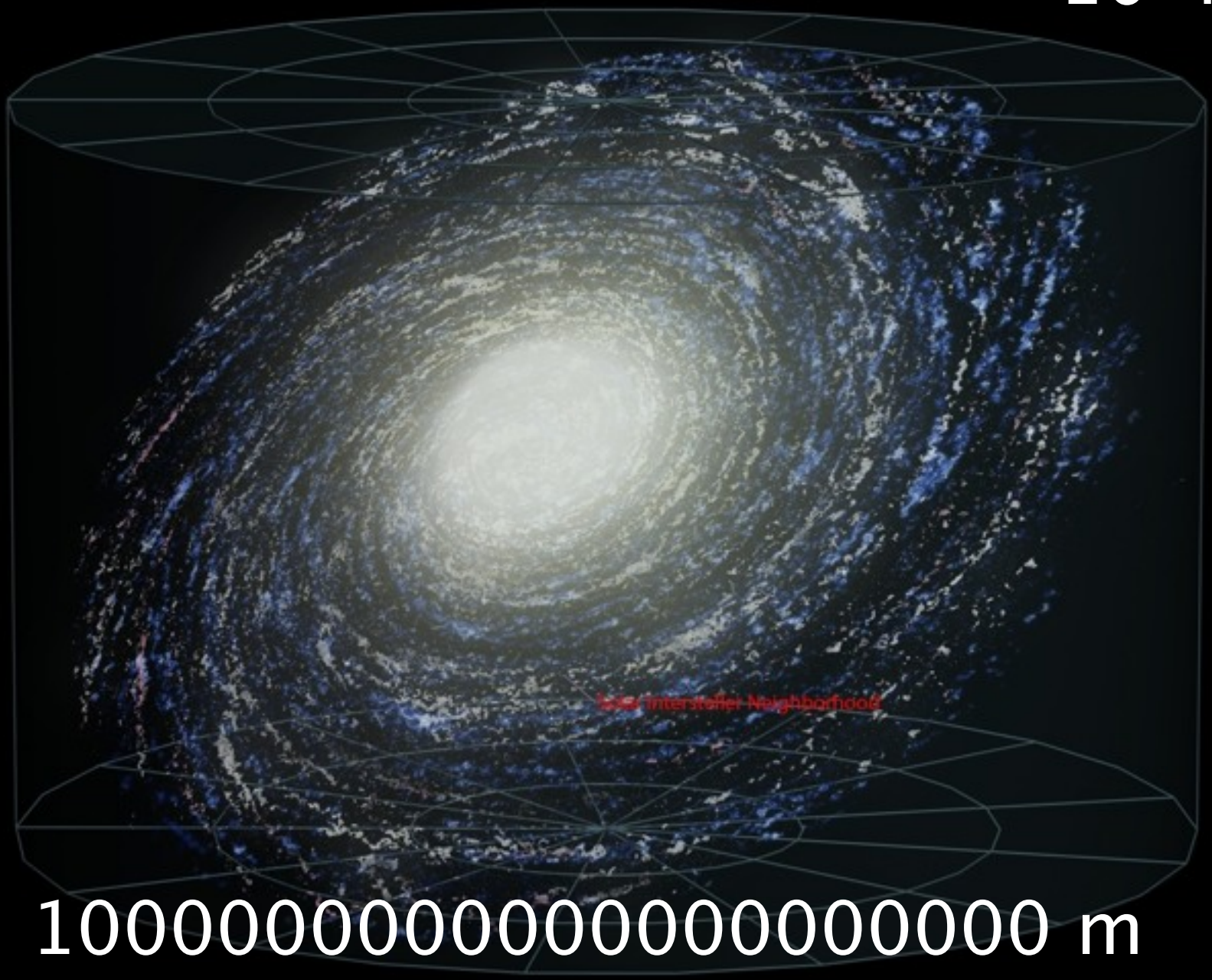
10^{22} m



100000000000000000000 m

Vía Láctea

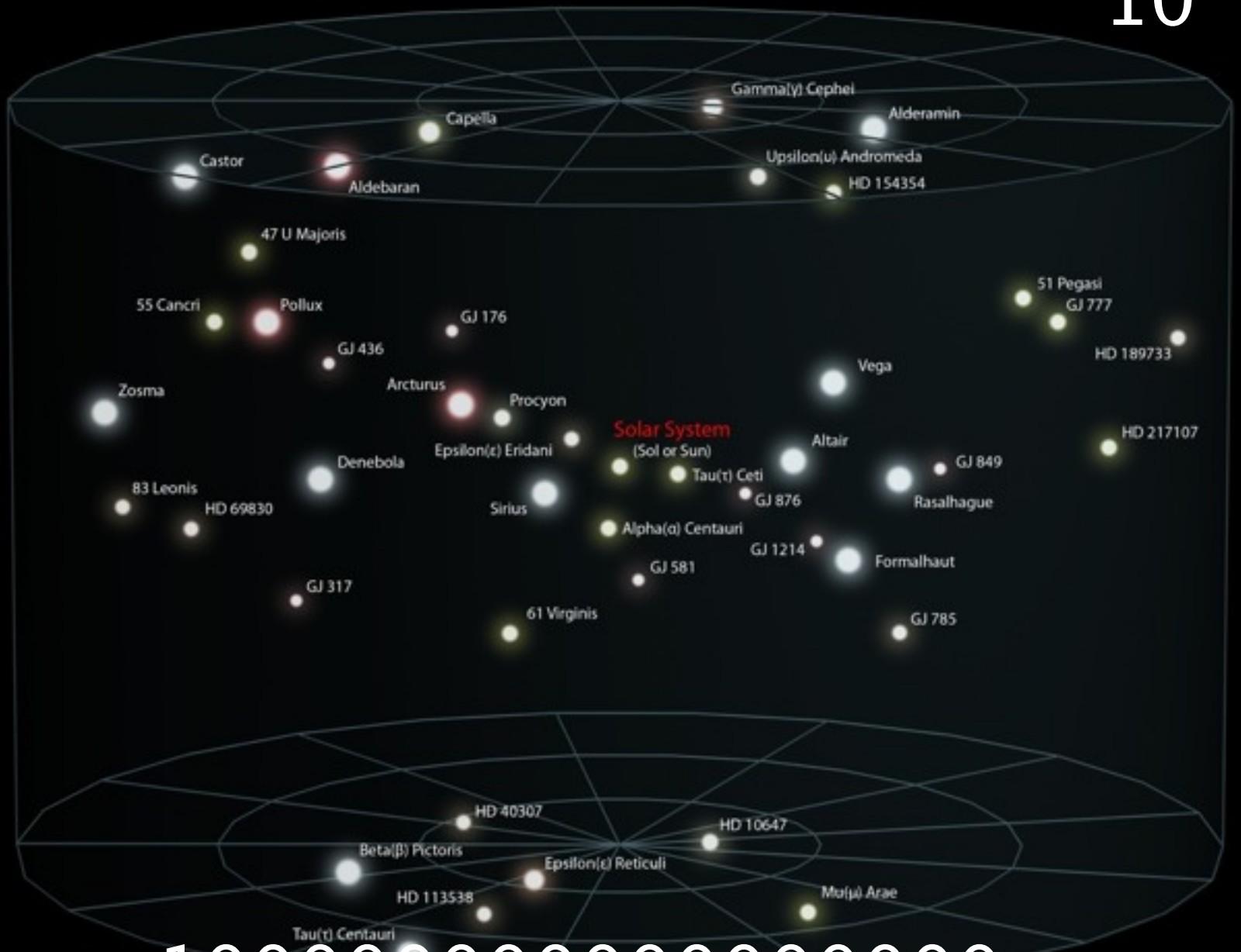
10^{21} m



100000000000000000000 m

Entorno Interestelar Solar

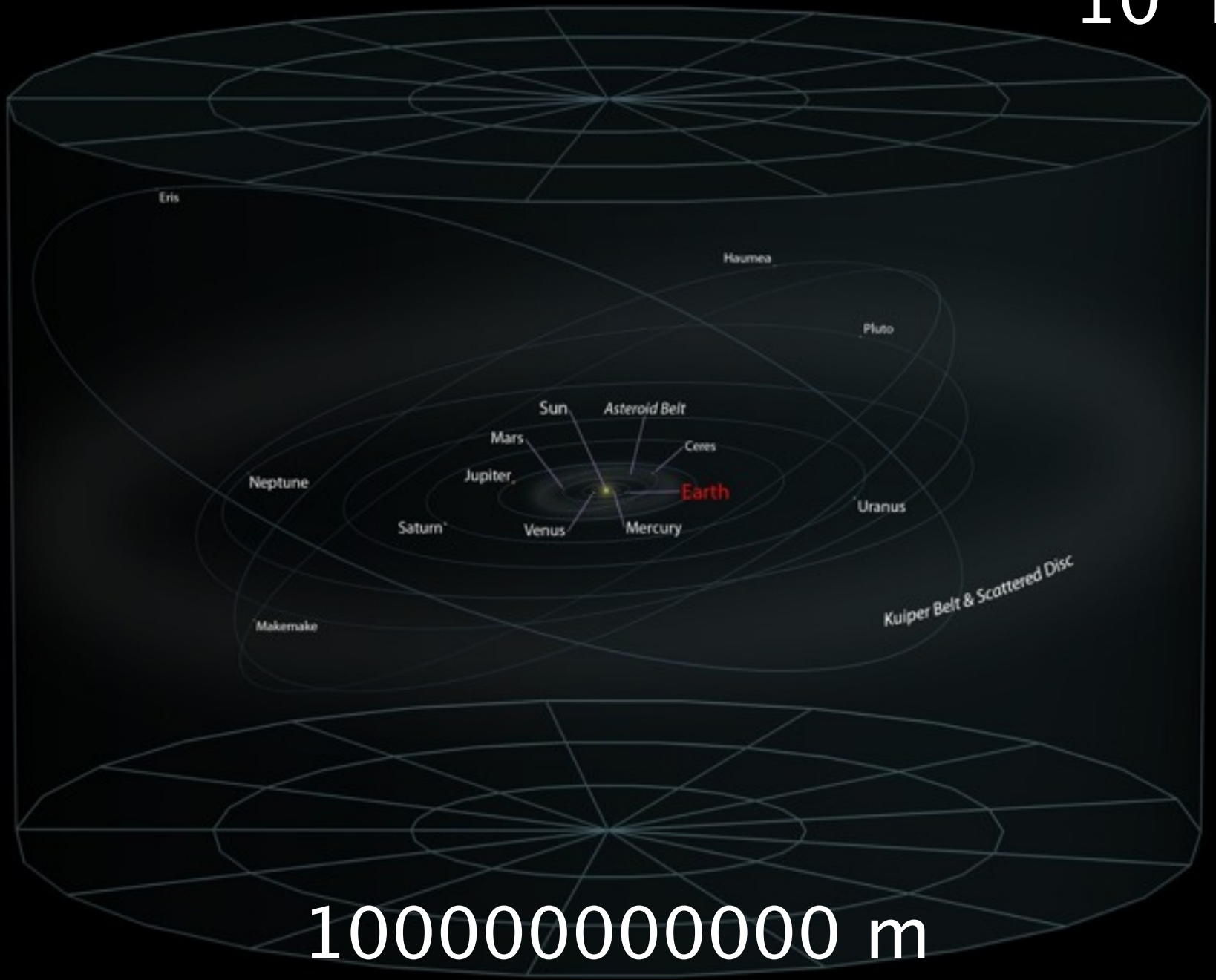
10^{17} m



10000000000000000 m

Sistema Solar

10^{11} m



100000000000 m

Tierra
10^{7} m
Image Landsat
Image IBCAO
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
10000000 m
Google earth
39°49'07.89" N 3°57'23.38" W eye alt 12114.65 km

10^6 m
1000000 m

10000 m

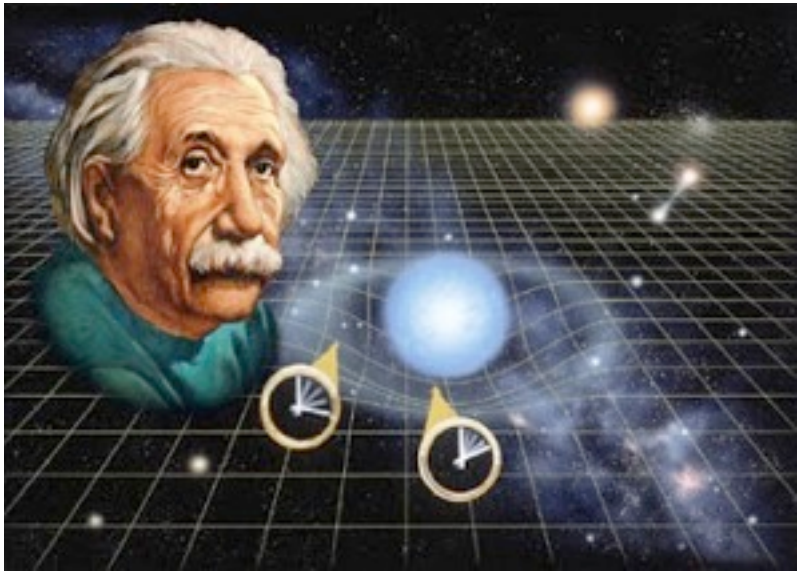
100 m

REGE CAROLO III
ANNO
MDCCLXXVIII
10 m

Cosmología: El Universo como un todo

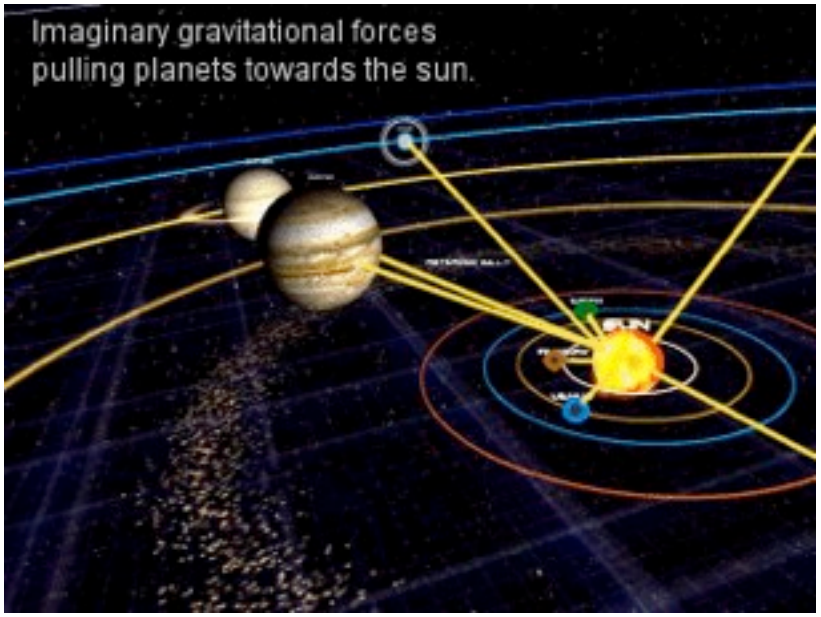
El cambio más brutal en nuestra visión del Universo es cuando lo consideramos como un todo

En el s. XX, hubo un cambio crucial en nuestra concepción del Universo, de la mano de la teoría de la relatividad general de Einstein



Teoría de la Relatividad General

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

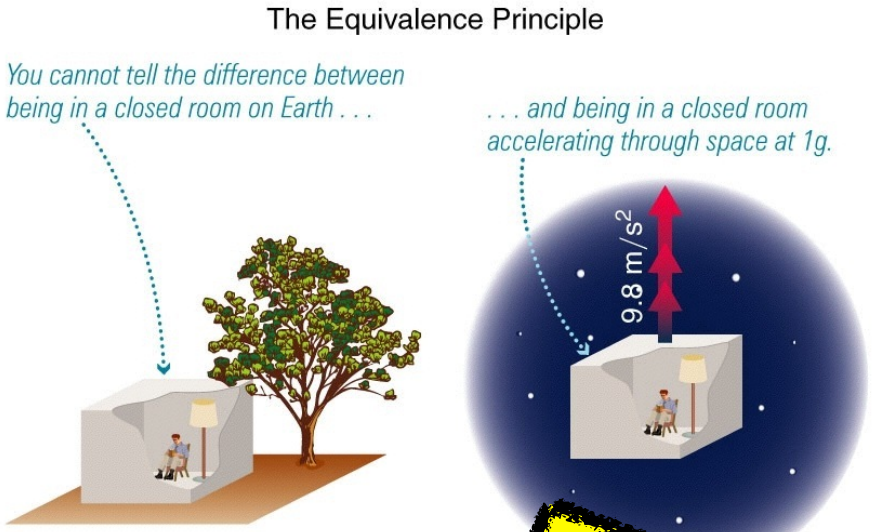
La gravedad de Newton es incompatible con la teoría de la relatividad

Teoría de la Relatividad General

Relatividad General: 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)



"El pensamiento más feliz de mi vida"

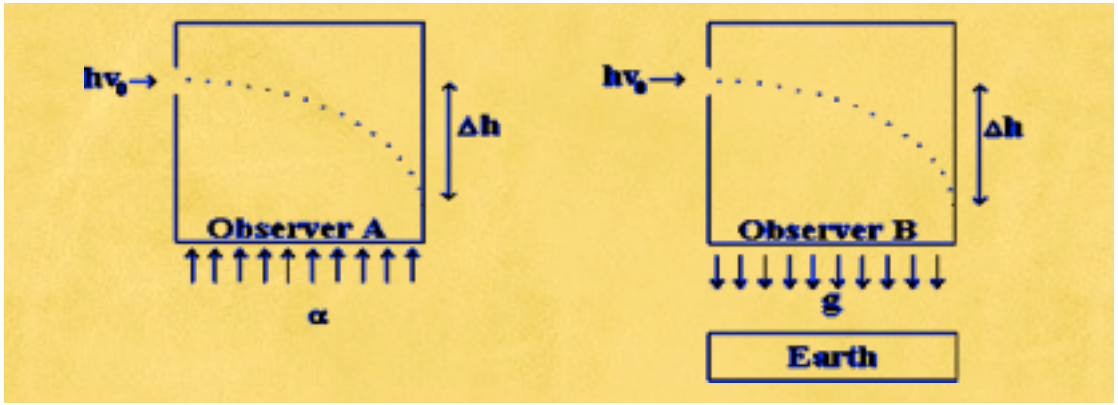
"The happiest thought of my life" (A. Einstein)

charla de Barbón

Teoría de la Relatividad General

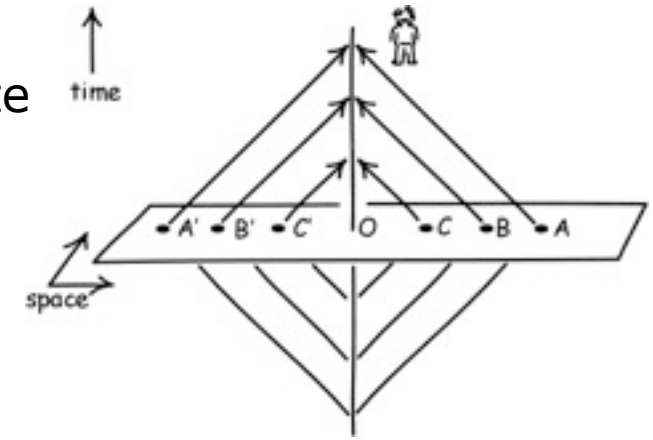
⇒ Las trayectorias de la luz

se curvan en campos gravitatorios



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

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



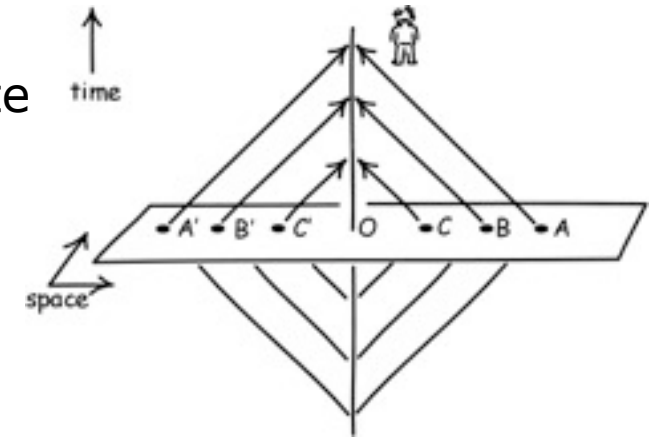
Espacio-tiempo

1907

Tomemos el espacio en un instante dado
(simplificamos a sólo una dimensión "x")

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

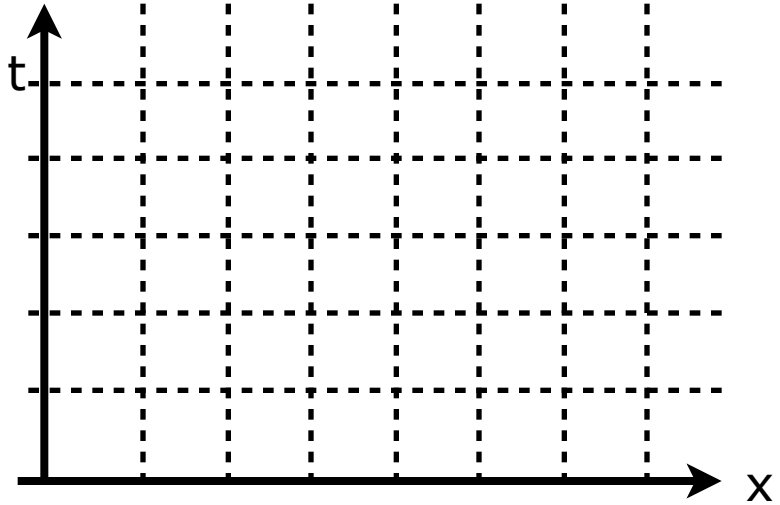
¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!



Espacio-tiempo

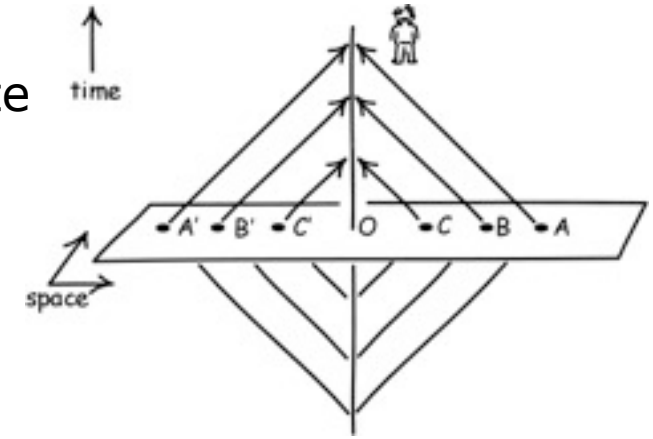
1907

Tomemos el espacio en un instante dado
(simplificamos a sólo una dimensión "x")
y dejémoslo evolucionar con el tiempo t



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

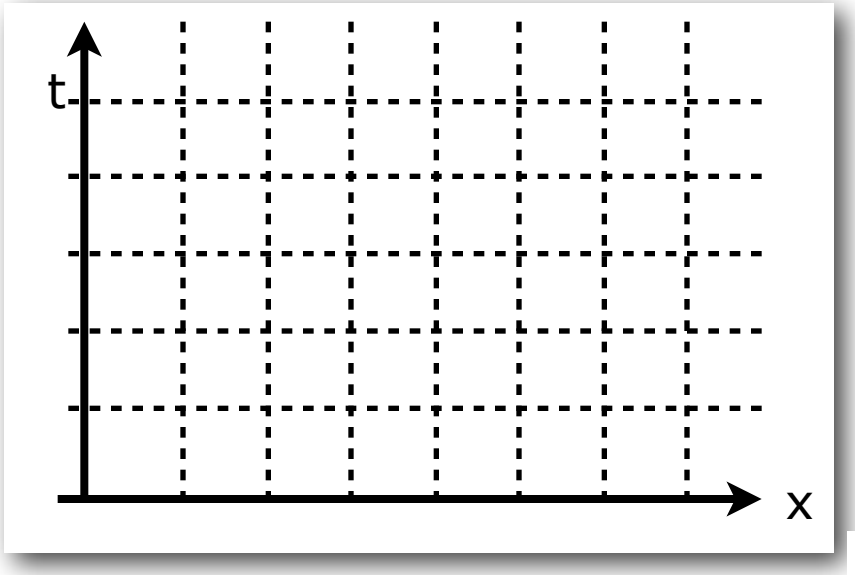
¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!



Espacio-tiempo

1907

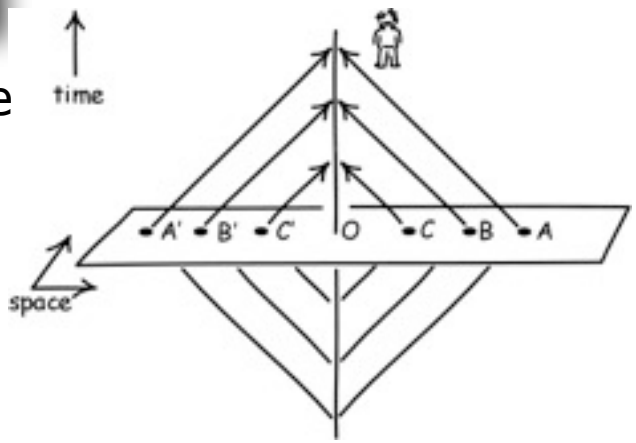
Tomemos el espacio en un instante dado
(simplificamos a sólo una dimensión "x")
y dejémoslo evolucionar con el tiempo t



¡Espacio-tiempo!

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

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

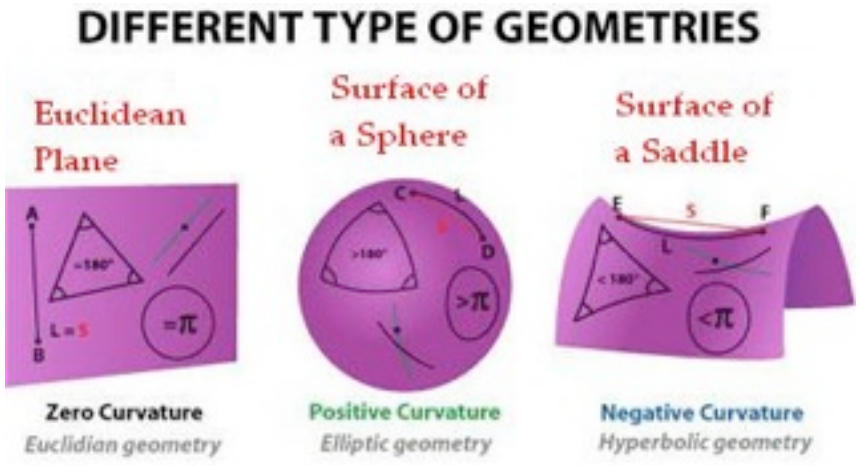


Teoría de la Relatividad General

¡ Nos lanzamos al estudio de espacios curvos !

Curvatura

Plana, curvatura positva o curvatura negativa



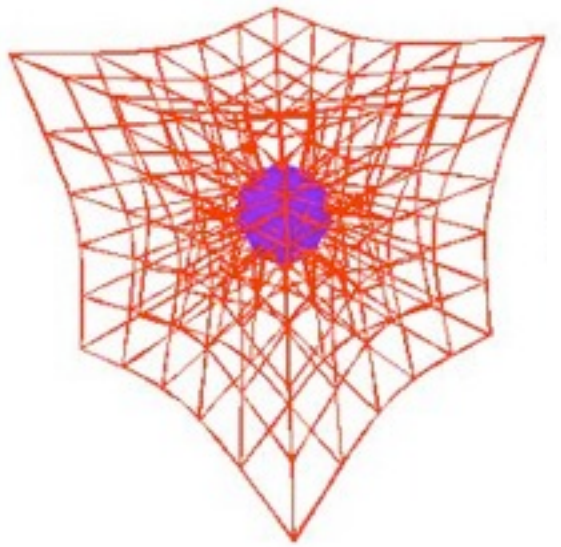
Carl Friedrich Gauss s.XIX

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

Líneas paralelas permanecen paralelas, o convergen, o divergen

Teoría de la Relatividad General

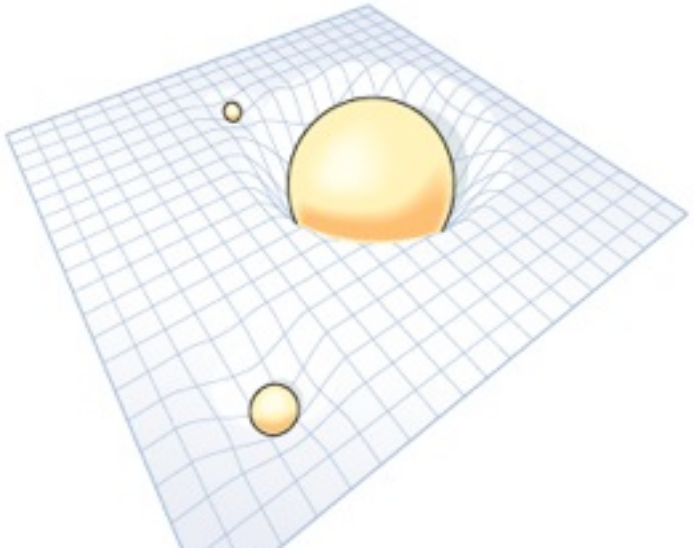
1915



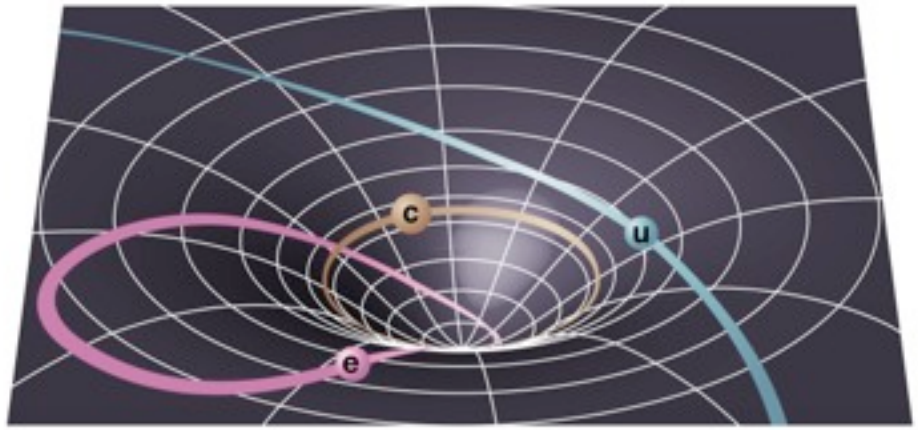
¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!

Ecuaciones de Einstein:

- La Materia dicta al Espacio cómo curvarse



- El Espacio dicta a la Materia cómo moverse

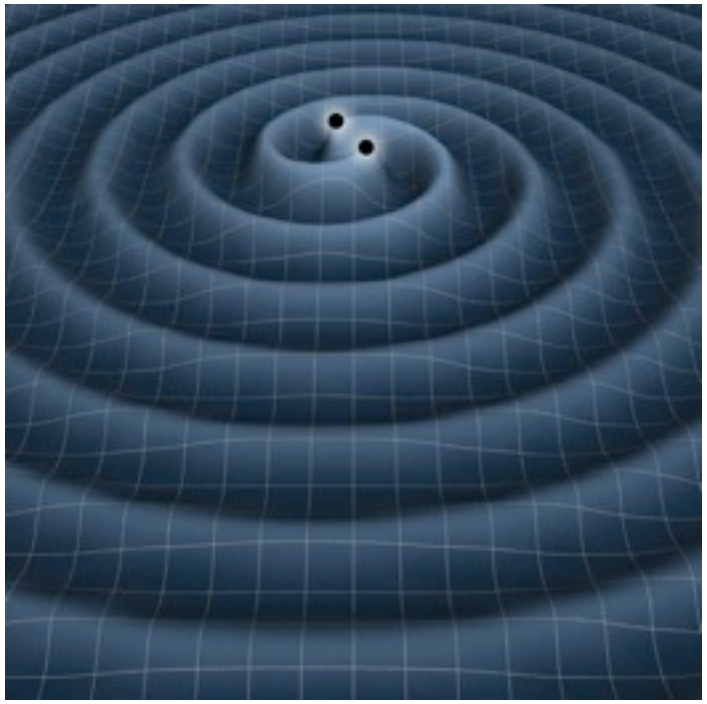


Copyright © Addison Wesley

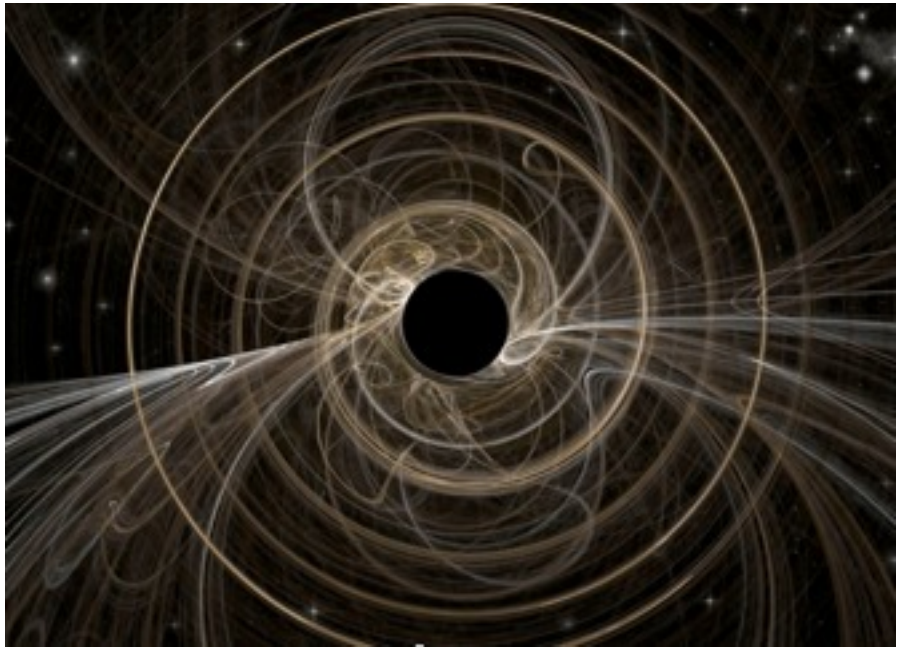
Teoría de la Relatividad General

Muchísimos tests la confirman:
Además predice fenómenos espectaculares:

Ondas gravitacionales



Agujeros negros



Relatividad General y Gravitación

Pero la más fascinante...

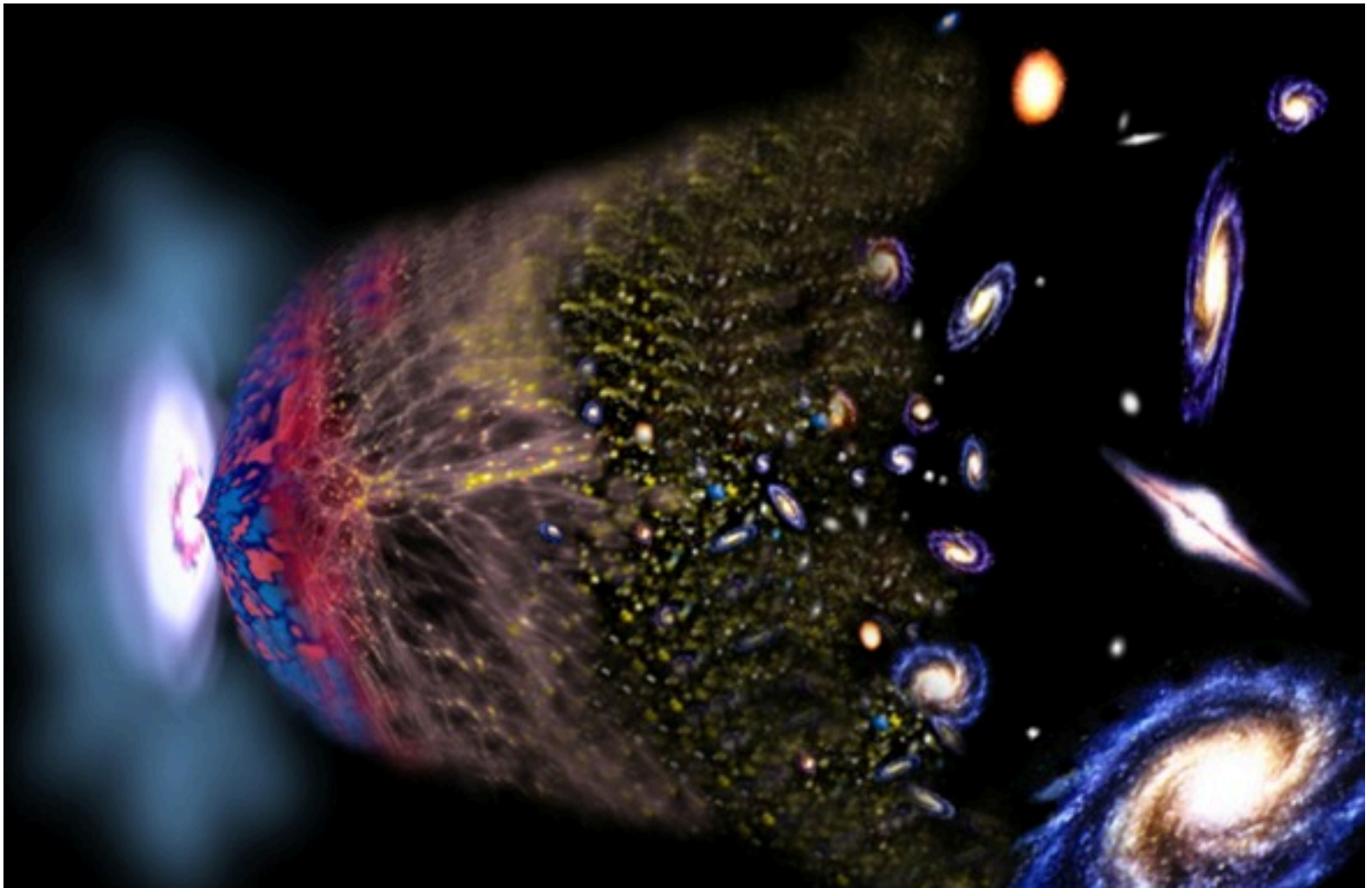
Aplicación a Universo dinámico y en evolución

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

Relatividad General y Gravitación

Pero la más fascinante...

Aplicación a Universo dinámico y en evolución

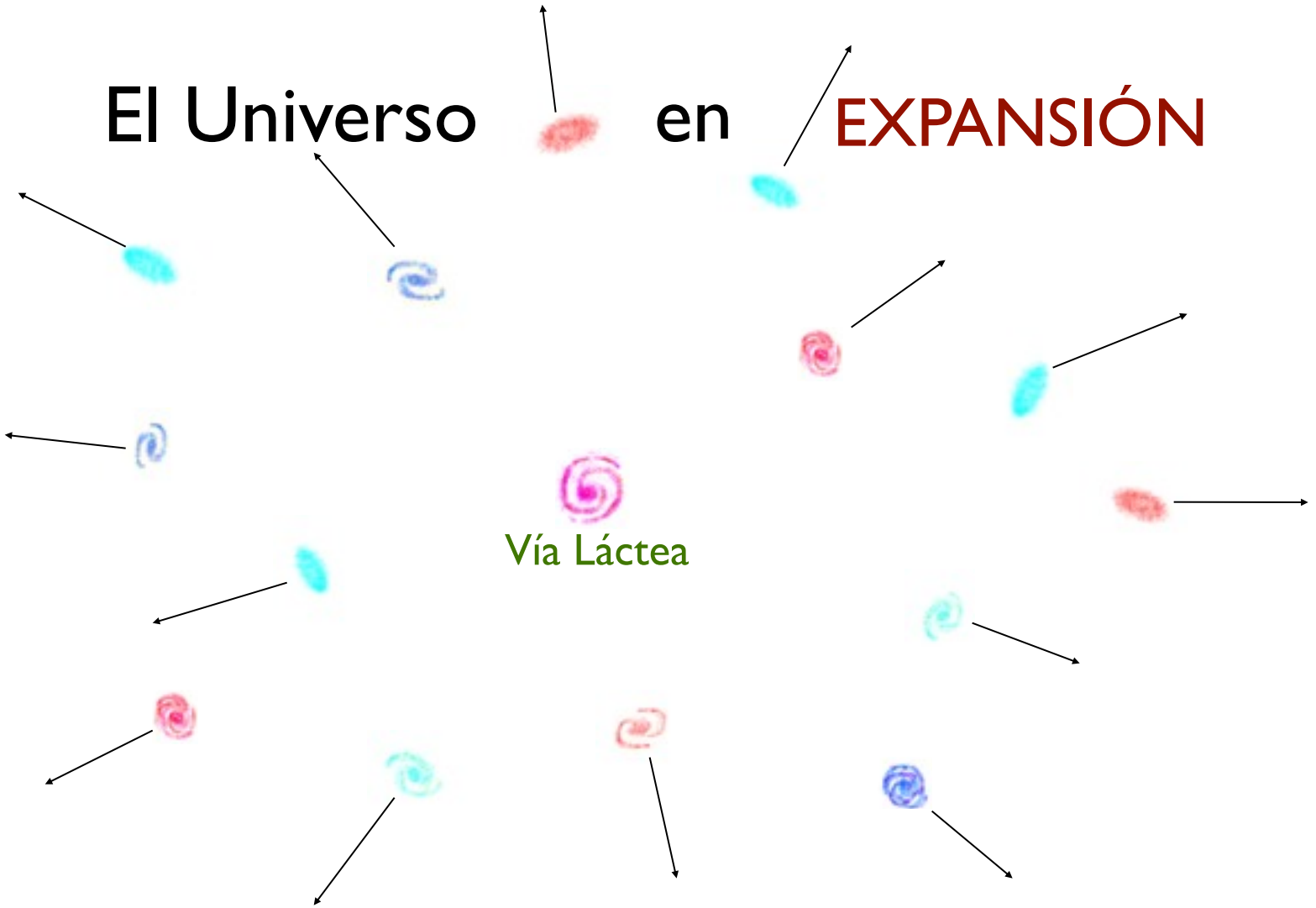


Cosmología

El Universo está en EXPANSIÓN

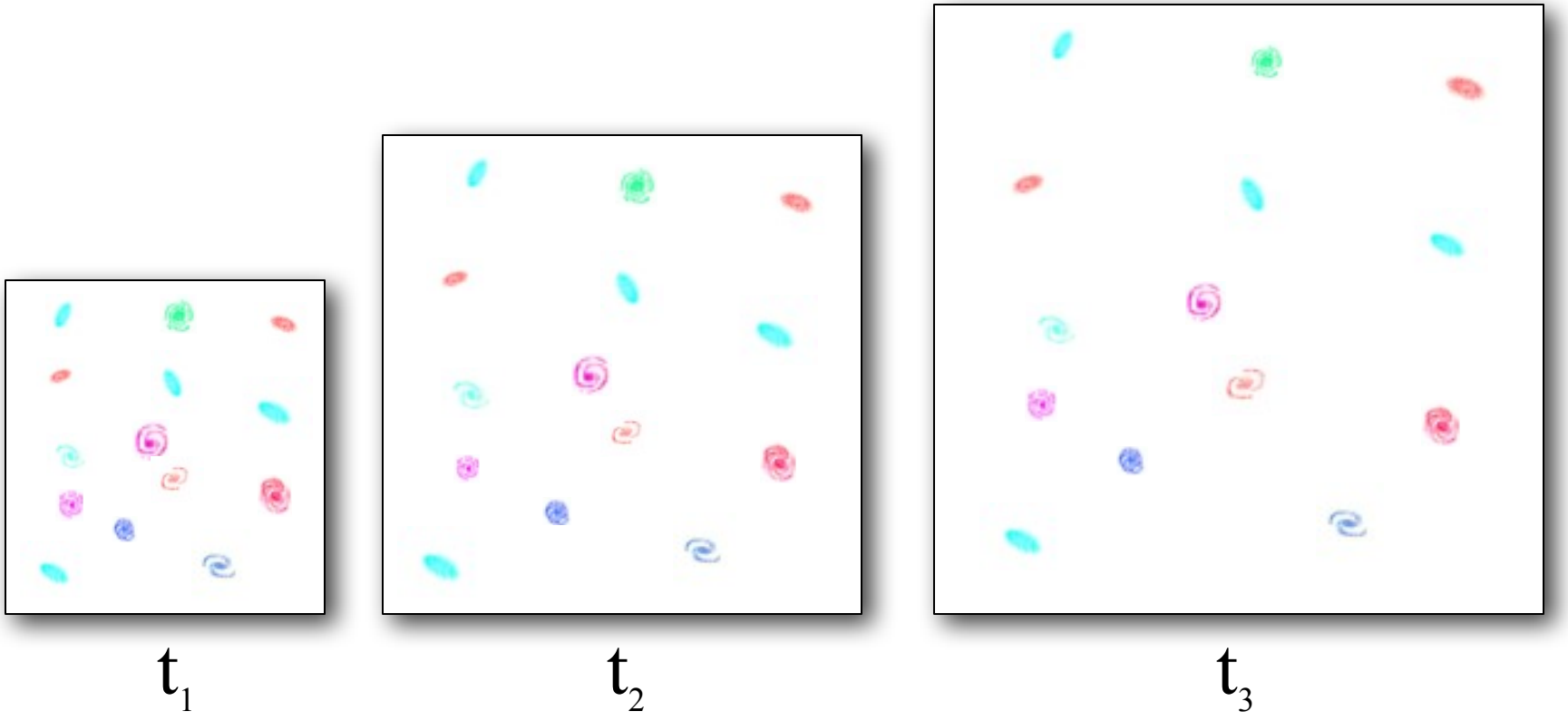
Cosmología

El Universo en EXPANSIÓN



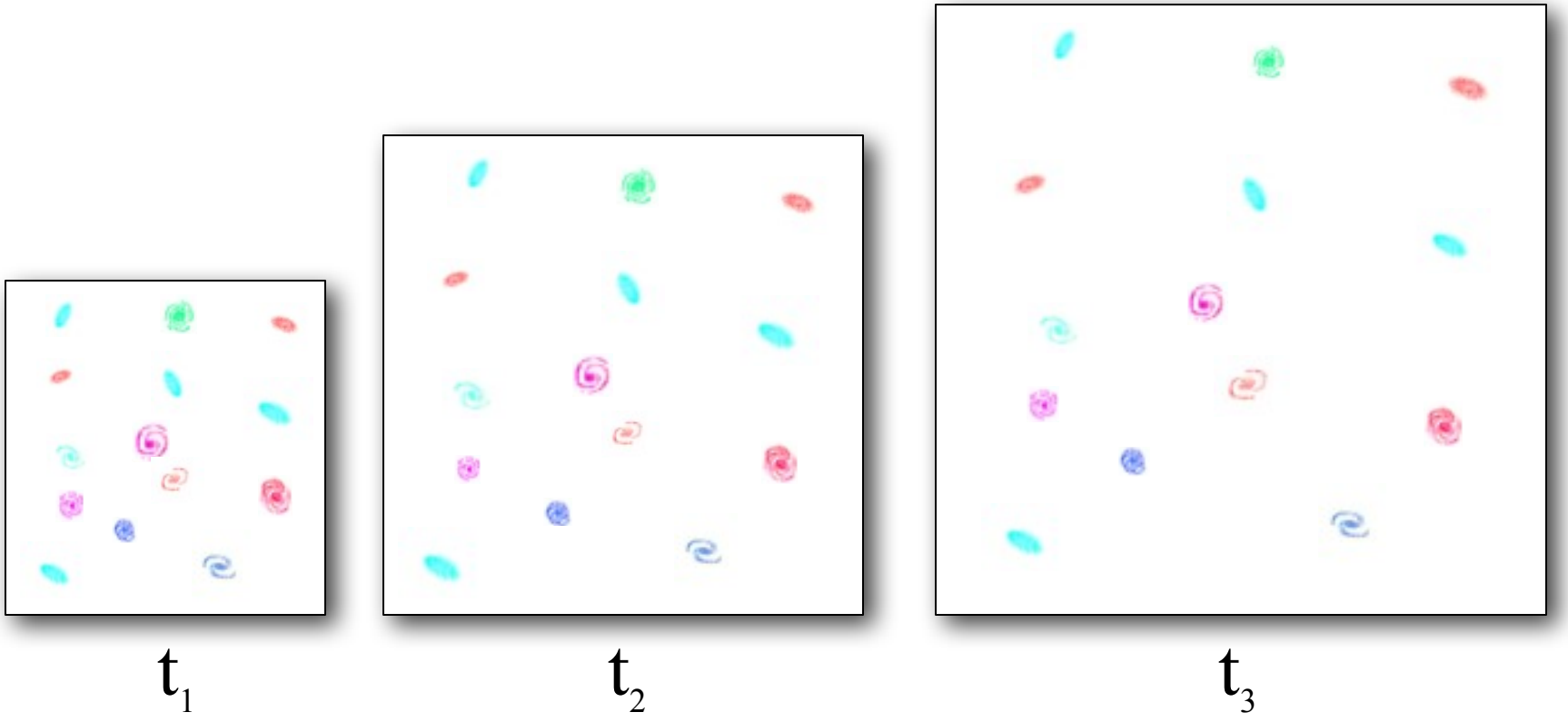
Cosmología

... pero nuestro punto de vista NO es privilegiado



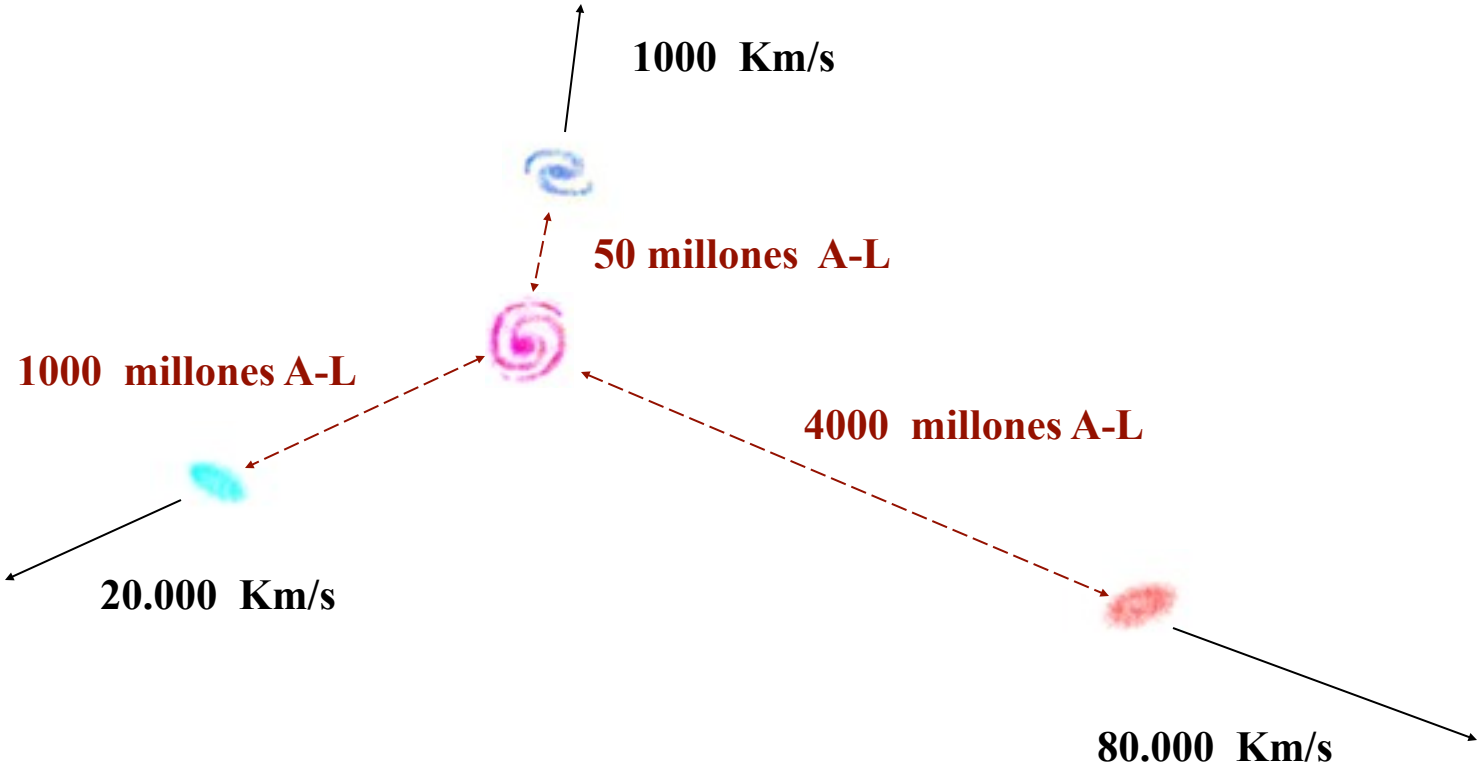
Cosmología

Expansión Homogénea e Isótropa



La velocidad de alejamiento es PROPORCIONAL a la distancia

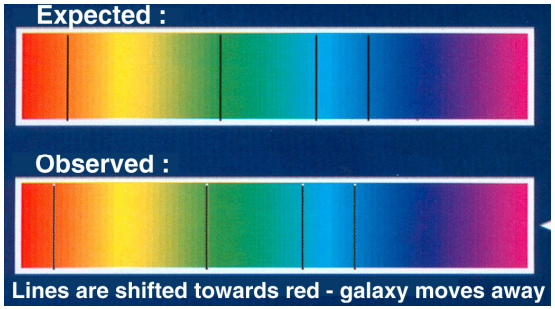
`constante' de Hubble ≈ 20 Km/s / Millón de años-luz



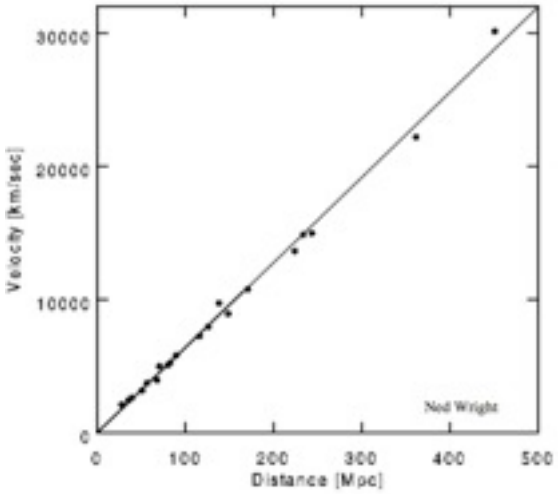
Cosmología

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

E, Hubble en el telescopio de Mt. Palomar



Corrimiento Doppler al rojo en el espectro de galaxias lejanas



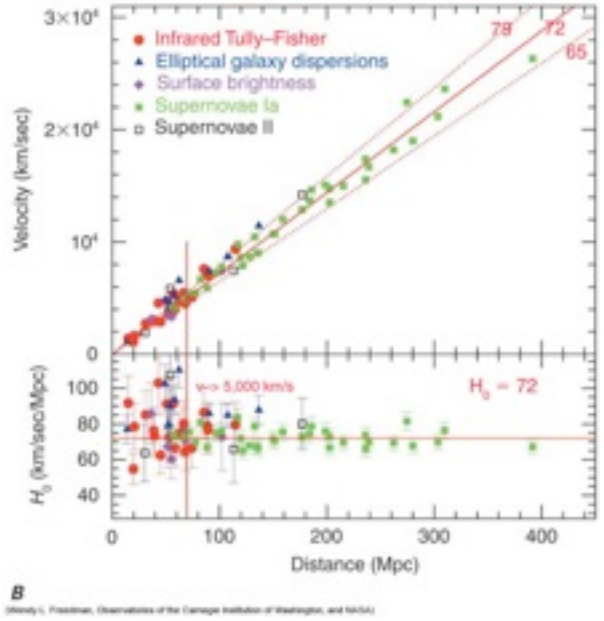
La velocidad de recesión de las galaxias aumenta con la distancia

¡El Universo está en expansión!

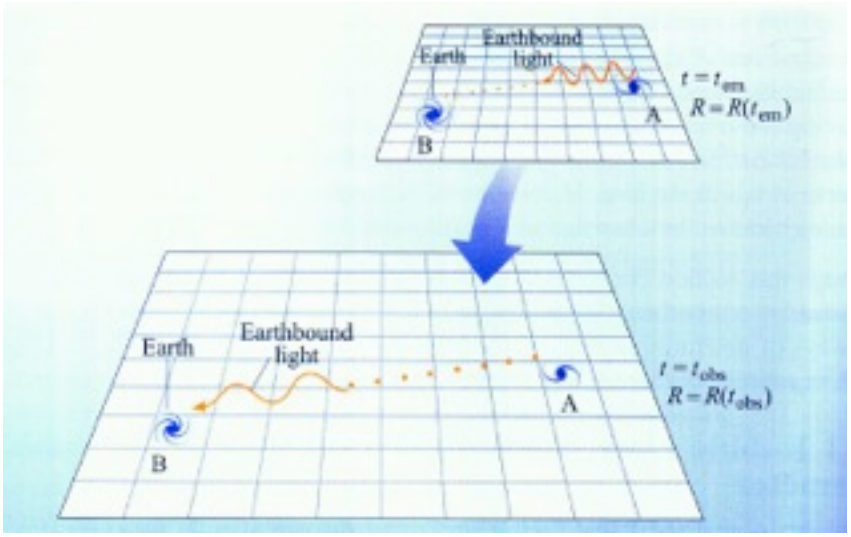
¿Cómo es el Universo?

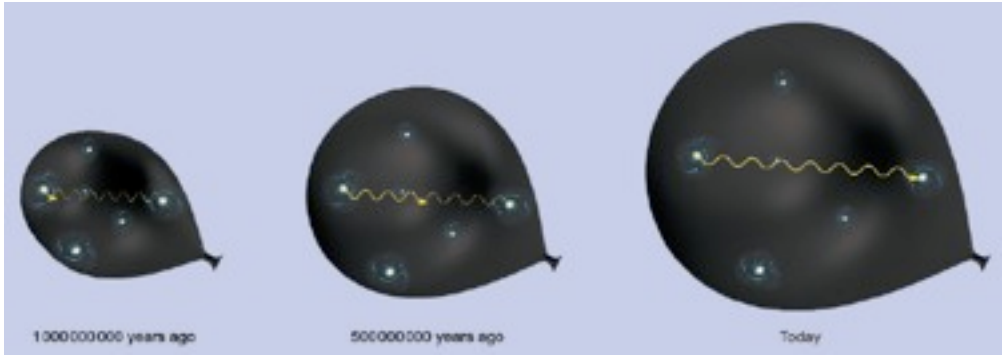
El Universo es dinámico y se expande con el tiempo

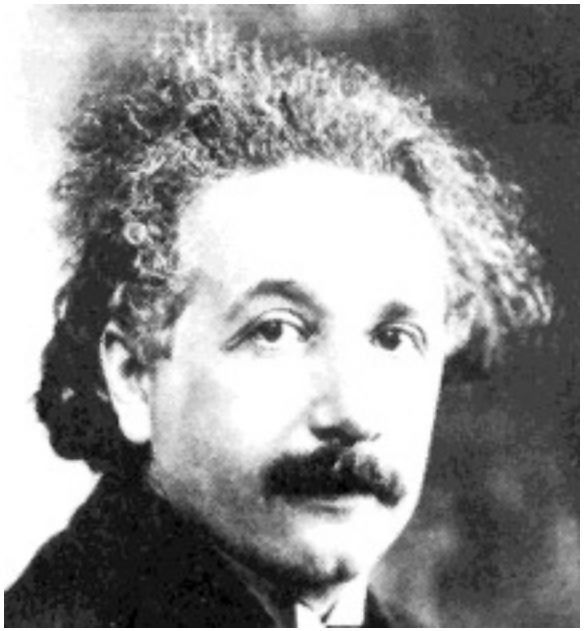
Hubble midió las velocidades
de alejamiento entre galaxias (1922):



¡El espacio entre galaxias se expande!







Albert Einstein

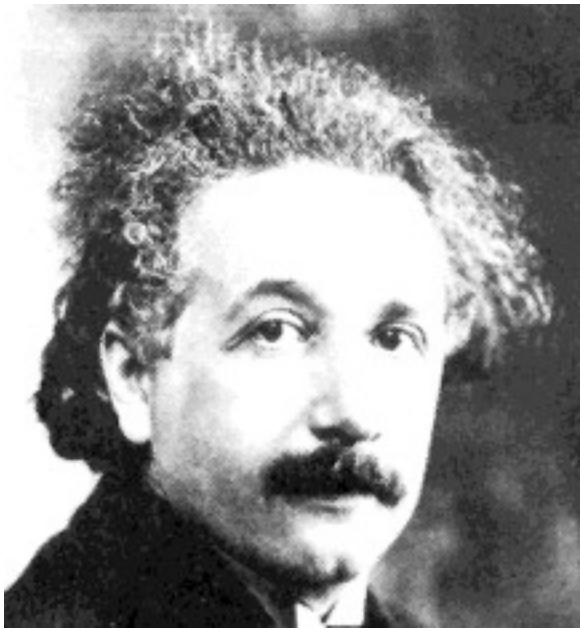
(1879-1955)

$$E = m c^2$$

(1905)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = T_{\mu\nu}$$

(1916)



Albert Einstein

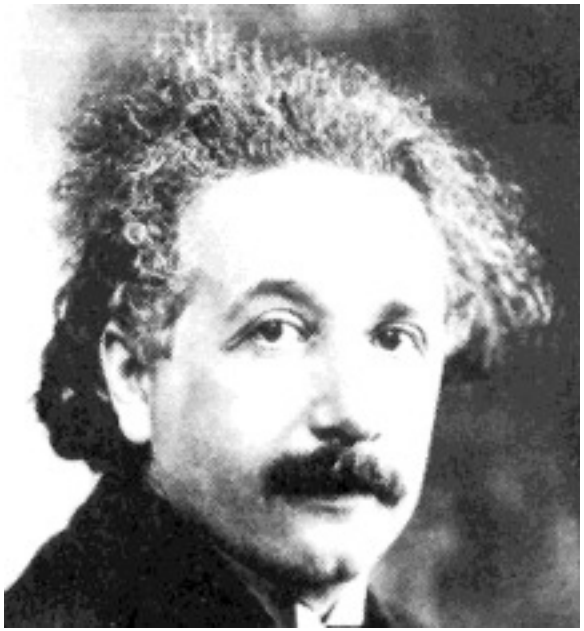
(1879-1955)

$$E = m c^2$$

(1905)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = T_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda$$

(1916)



Albert Einstein

(1879-1955)

$$E = m c^2$$

(1905)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = T_{\mu\nu}$$

(1916)

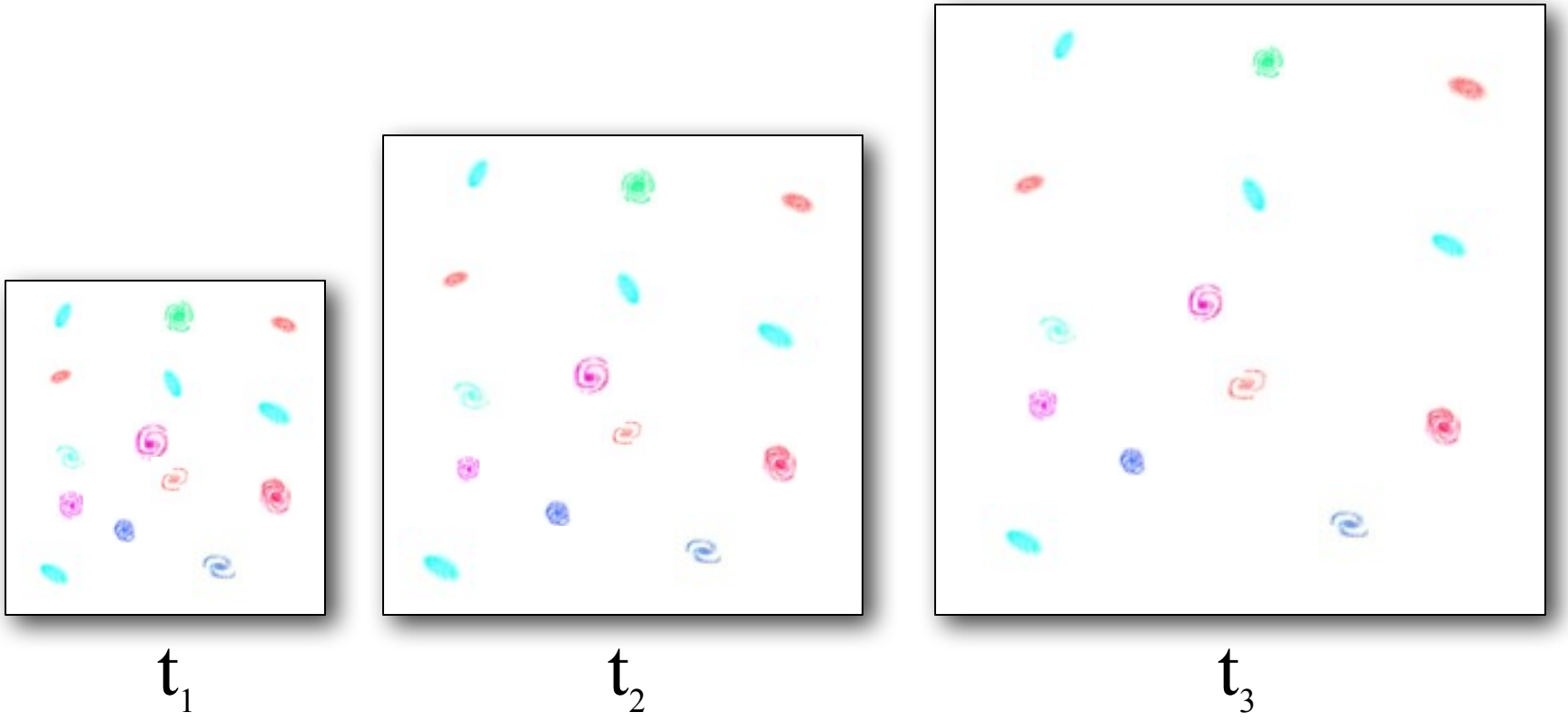
Barbón

En total, hay 20 formas independientes de "deformar" el espa
en las proximidades de un suceso. Es decir, la curvatura del espacio-tiem
de cuatro dimensiones tiene 20 "radios de curvatura" diferentes

La curvatura del espacio-tiempo tiene componentes puramente espaciales,
pero en la práctica las más importantes son las componentes **temporales**

La componente temporal de la curvatura del espacio-tiempo
es análoga a la curvatura de la historia de una partícula

Simplificación: Expansión Homogénea e Isótropa

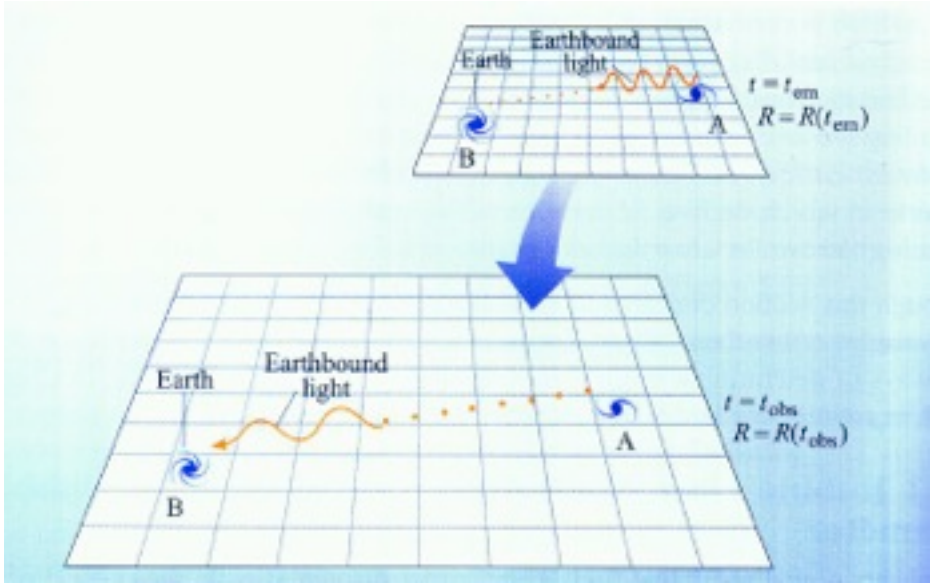


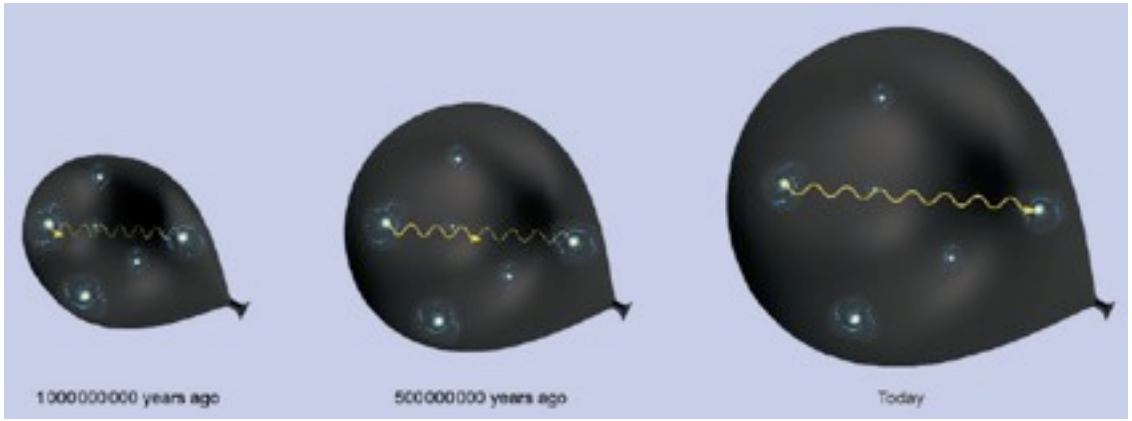
Universo aproximadamente homogéneo.
Su evolución se describe mediante el **factor de escala a(t)**

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

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

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

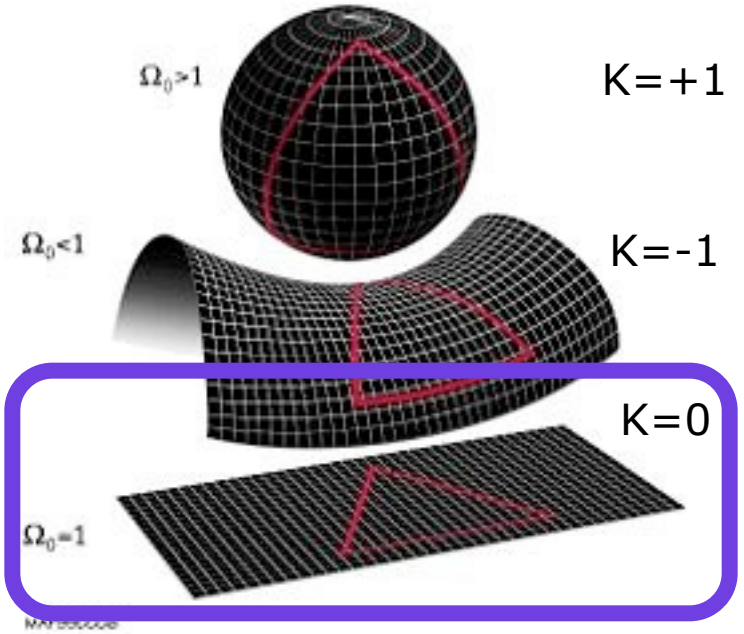




Densidad crítica

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

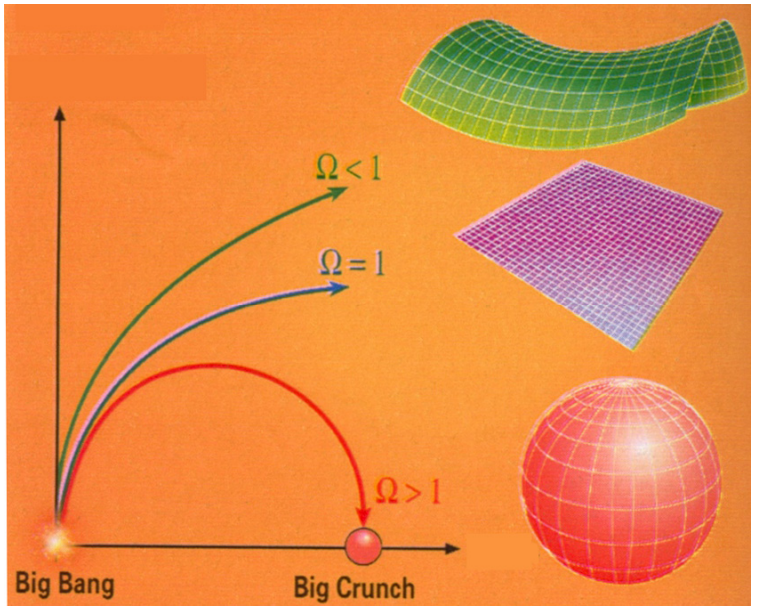
$$\rho_c = \frac{3}{8\pi G} H^2$$



Densidad crítica y evolución del Universo

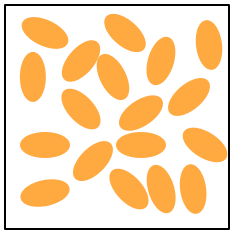
En ausencia de lo que hoy se conoce como energía oscura:

- **Densidad sub-crítica:**
  Universo cerrado que colapsa
- **Densidad super-crítica:**
  Universo abierto en eterna expansión (decelerada)
- **Densidad crítica:**
  Universo plano en eterna expansión

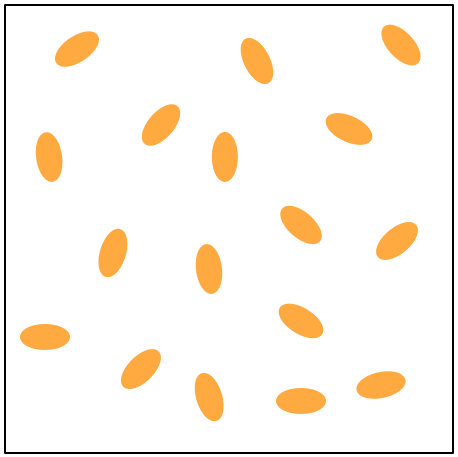


(Advertencia: esta conclusión se modifica en presencia de energía oscura, ver charla 2)

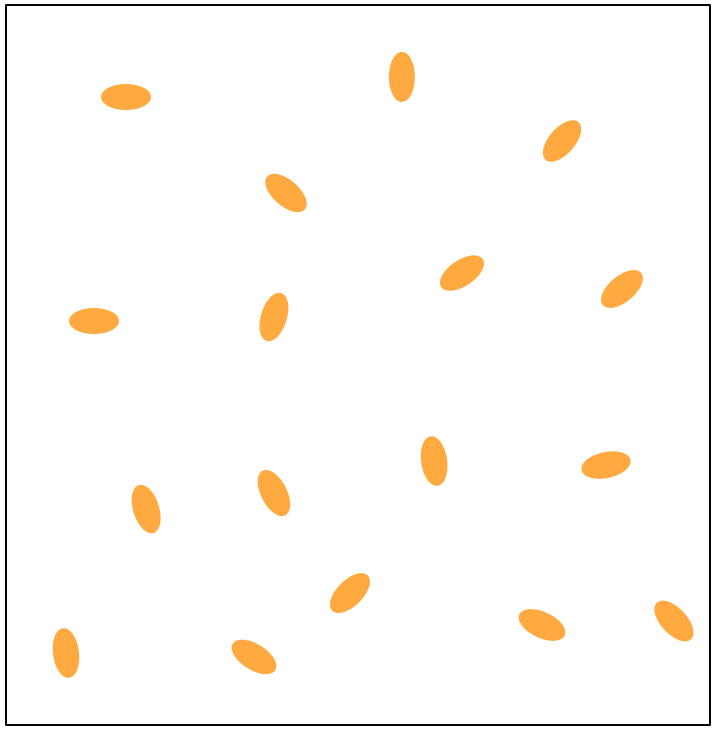
Hace 13.700
millones de años



Hace 10.000
millones de años



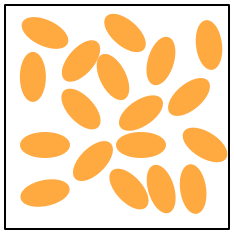
Hace 5.000
millones de años



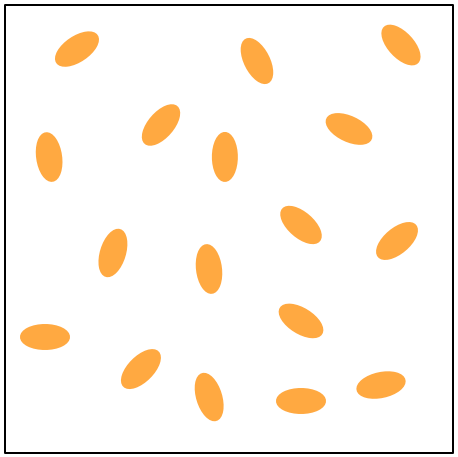
Ahora

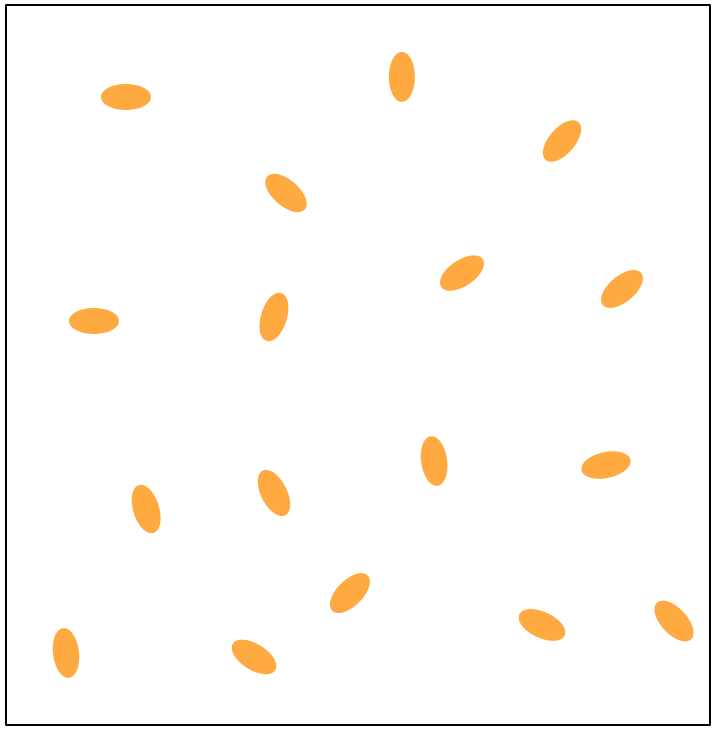
¿Dónde ocurrió el BIG-BANG ?

Hace 10.000
millones de años

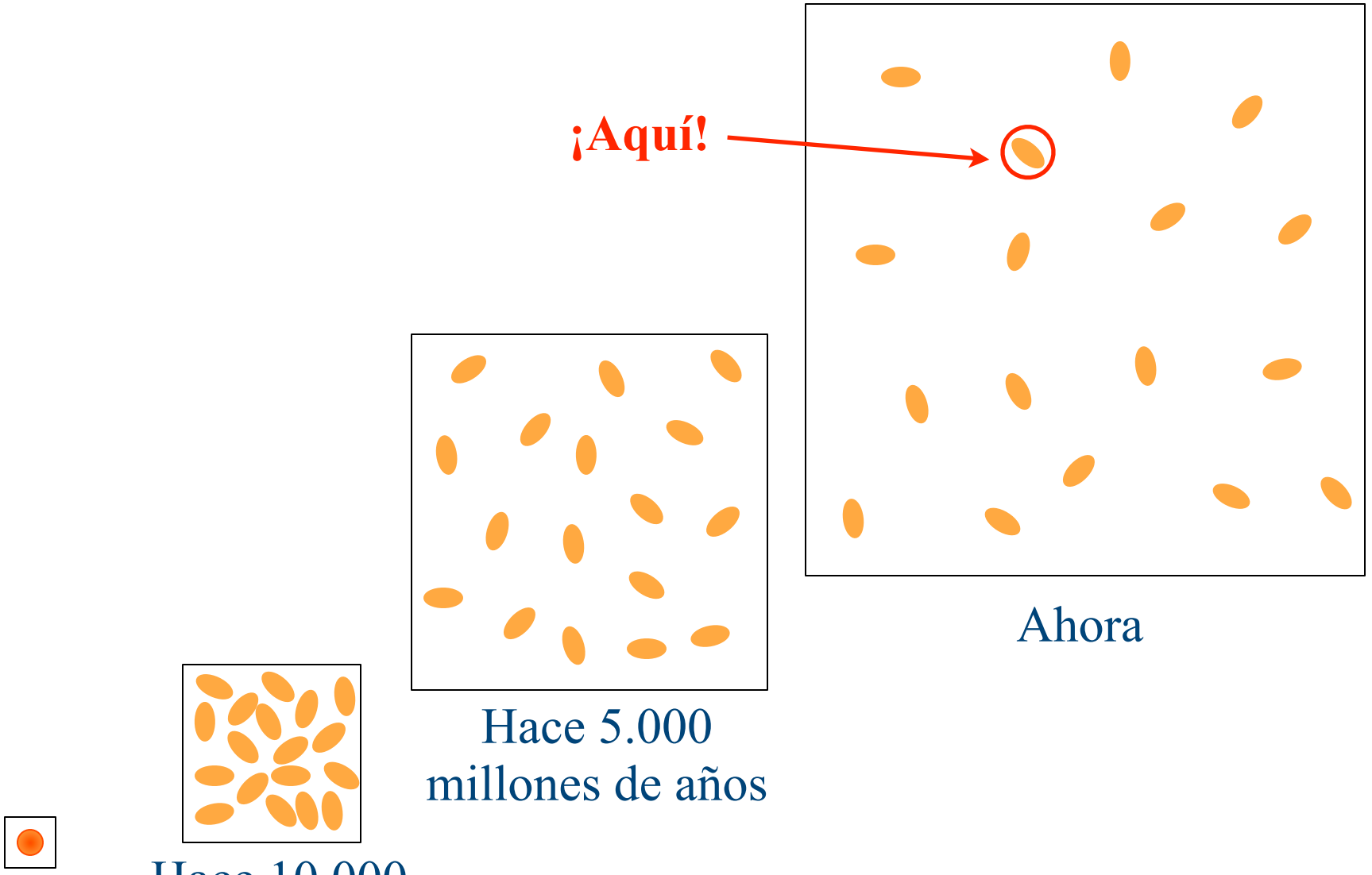


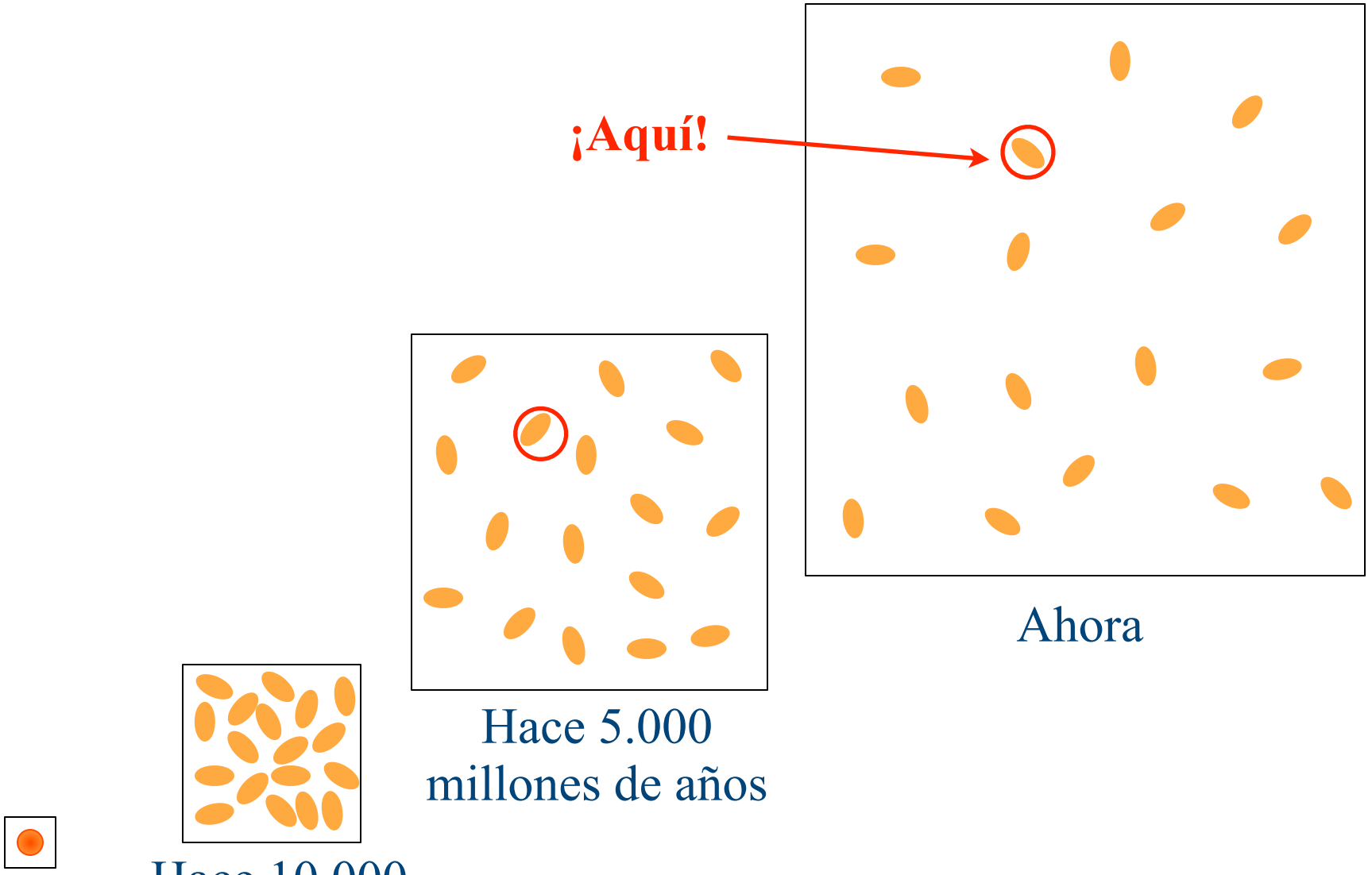
Hace 5.000
millones de años

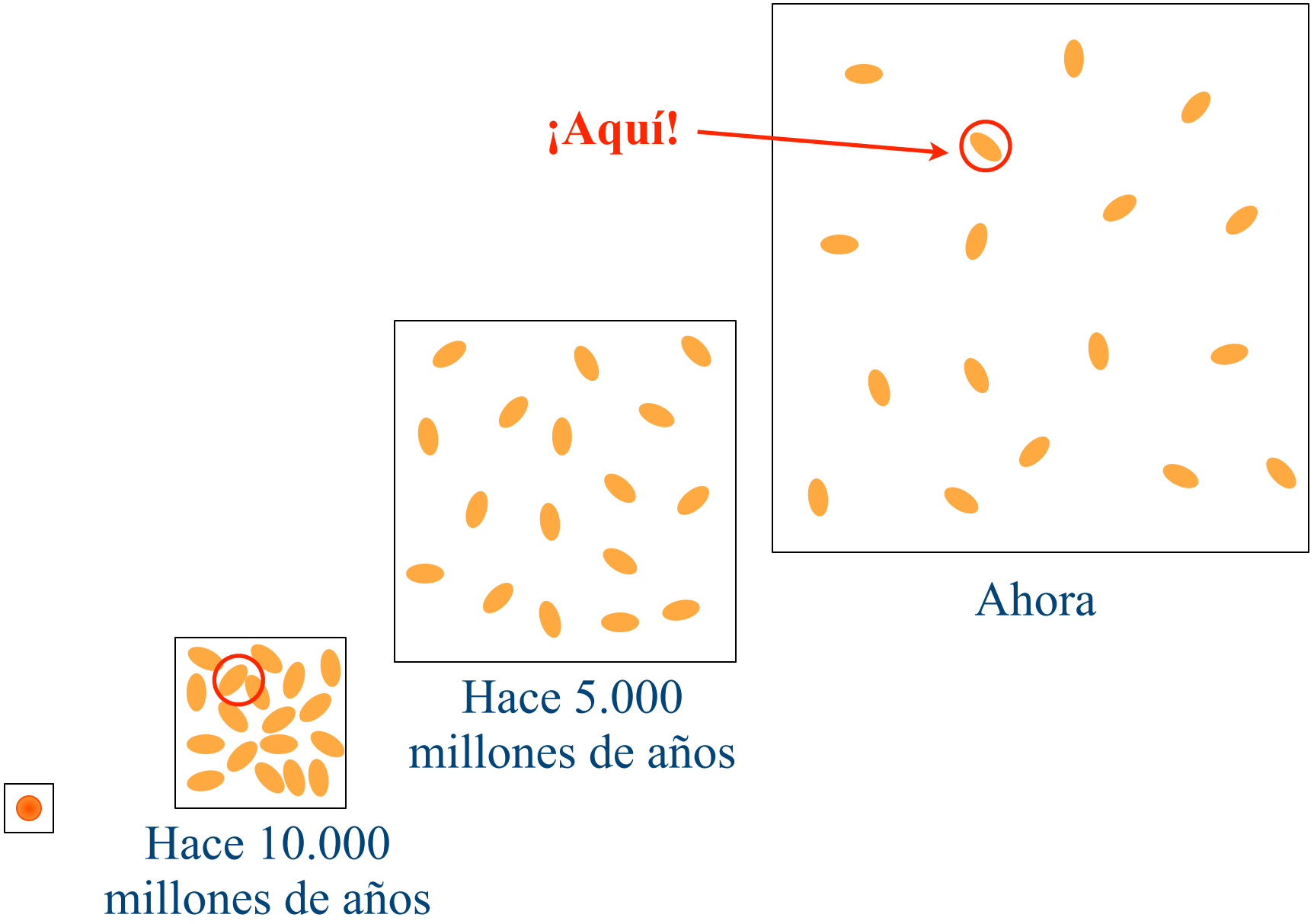


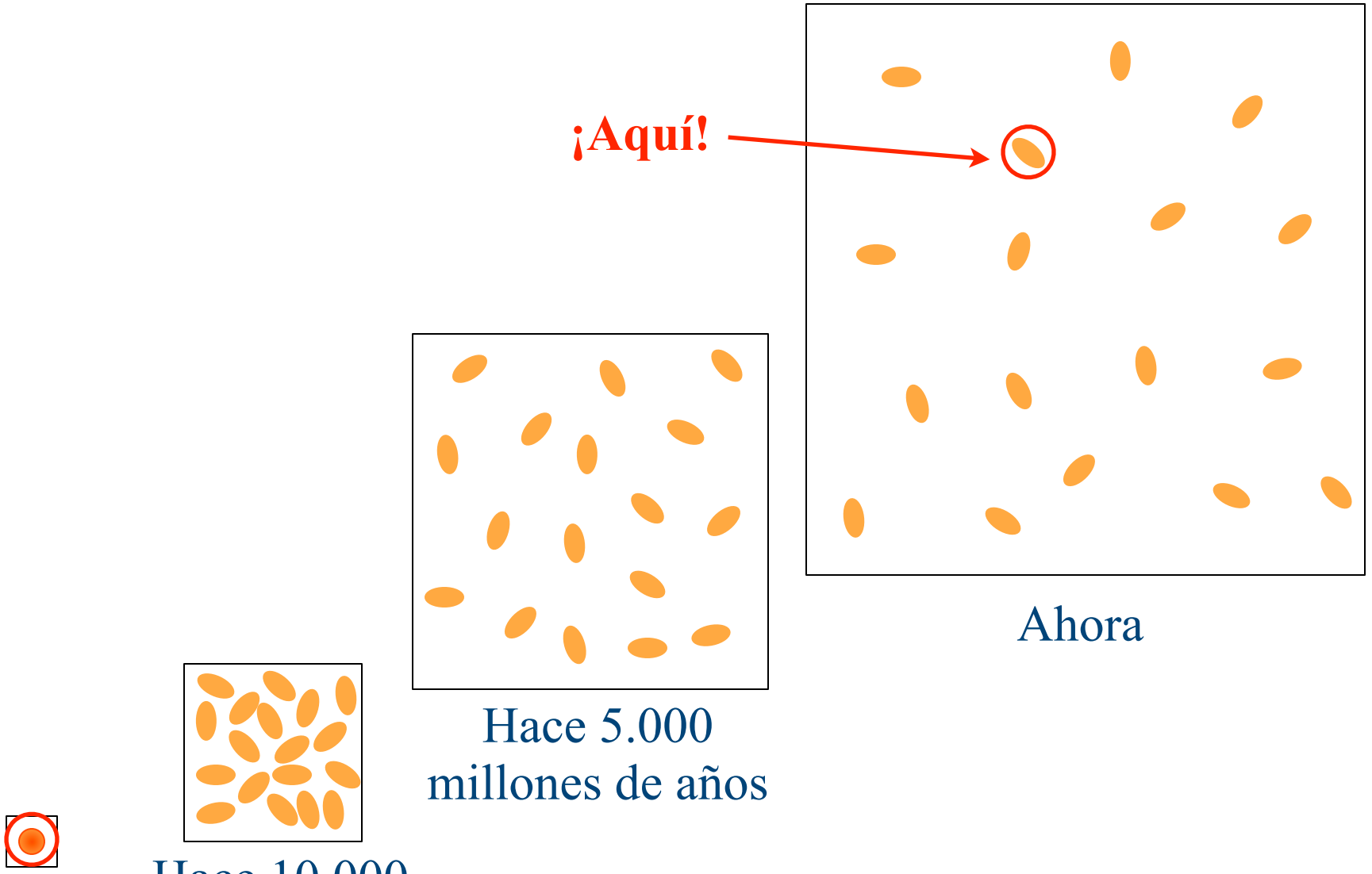


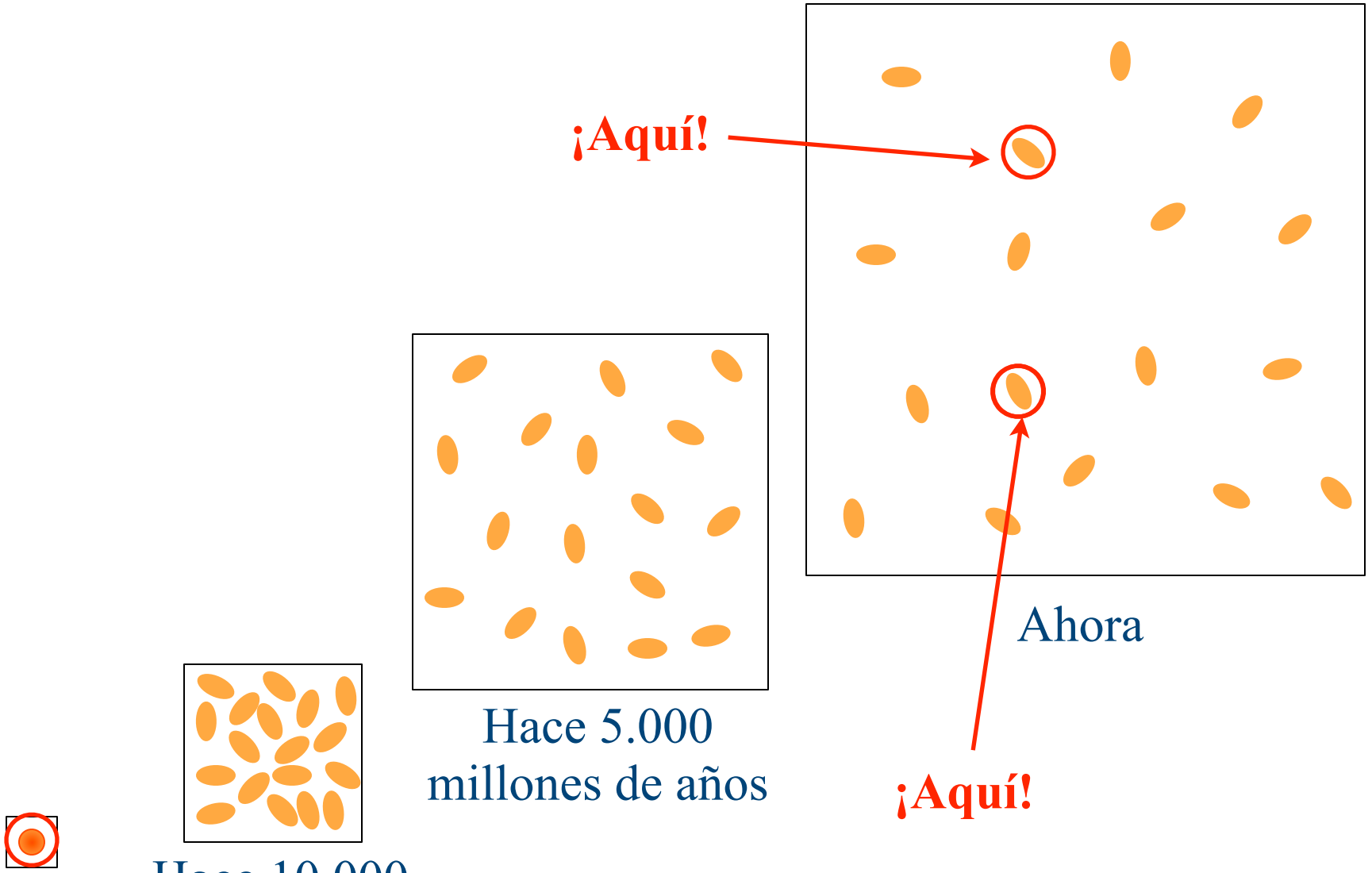
Ahora

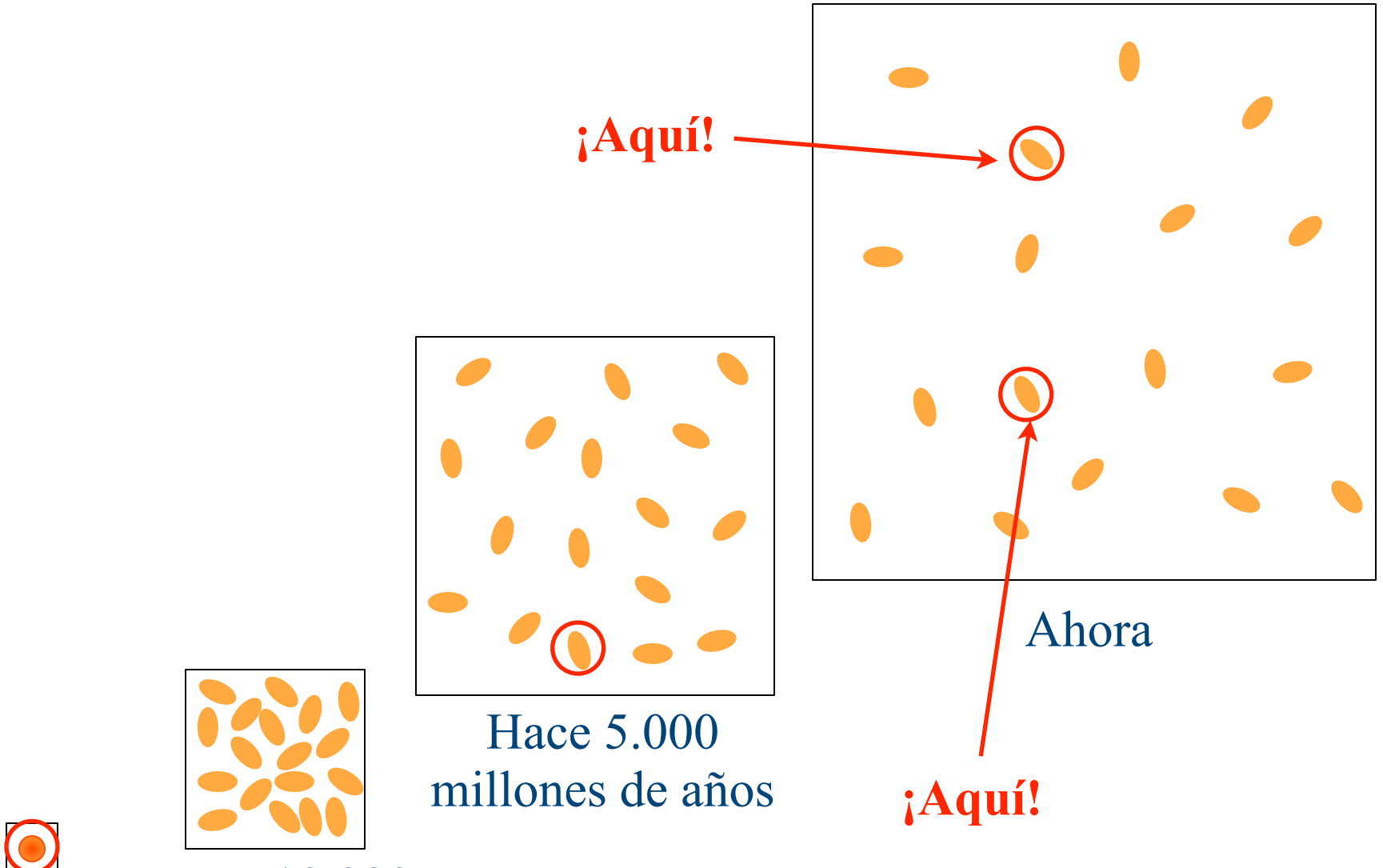

¡Aquí!
Ahora
Hace 5.000
millones de años
Hace 10.000
millones de años

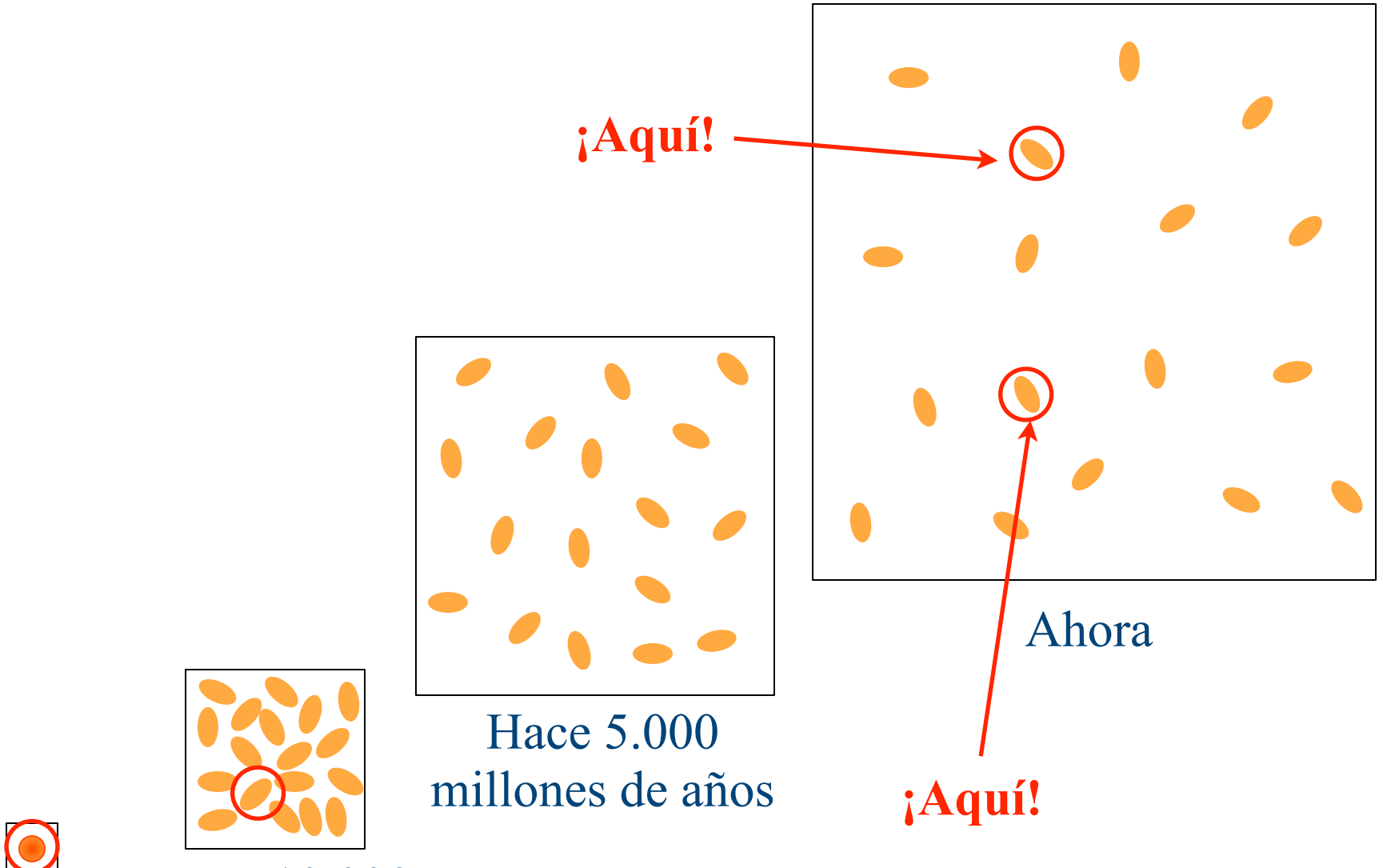

¡Aquí!
Ahora
Hace 5.000
millones de años
Hace 10.000
millones de años

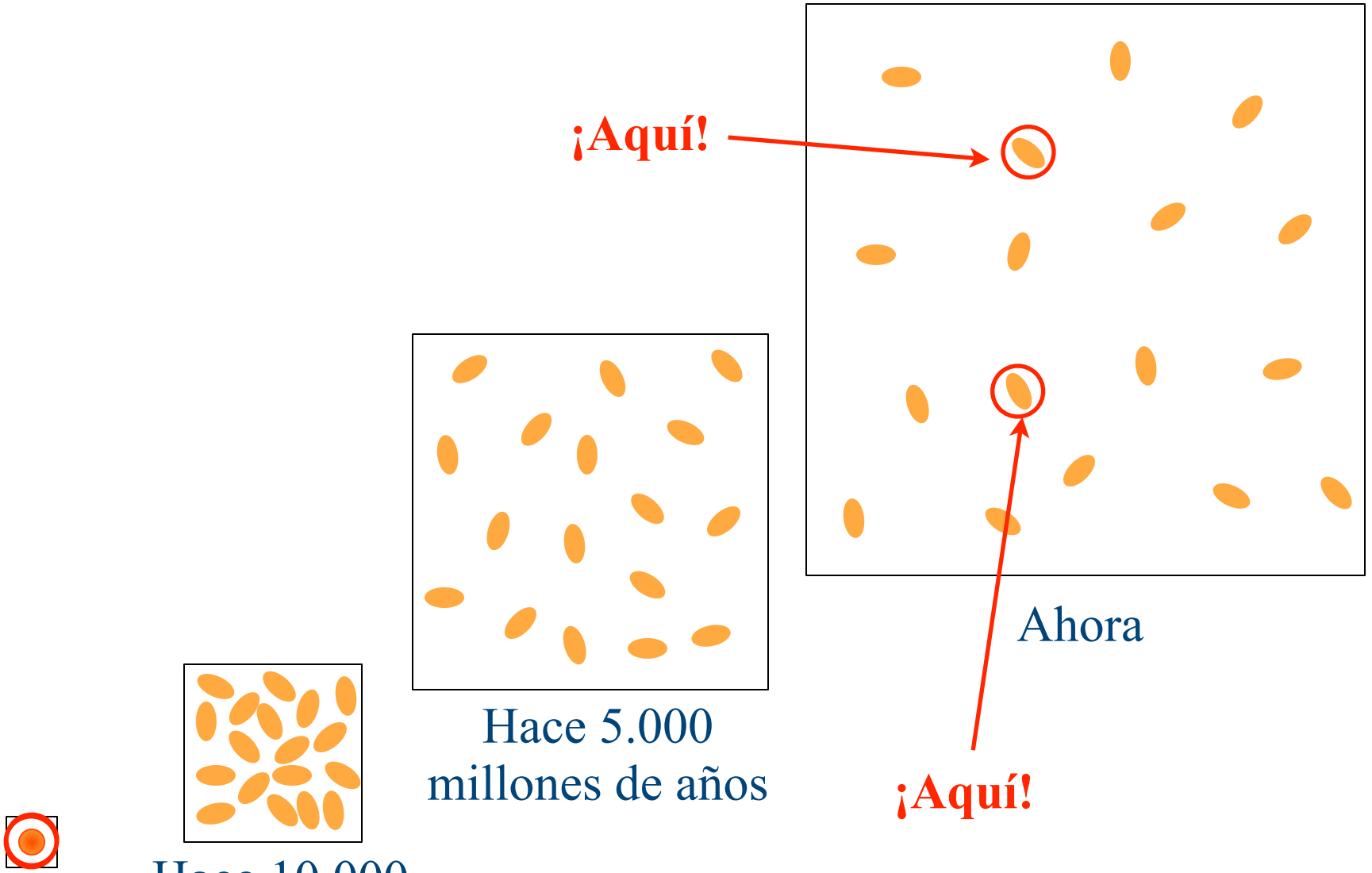

¡Aquí!
Ahora
Hace 5.000
millones de años
Hace 10.000
millones de años

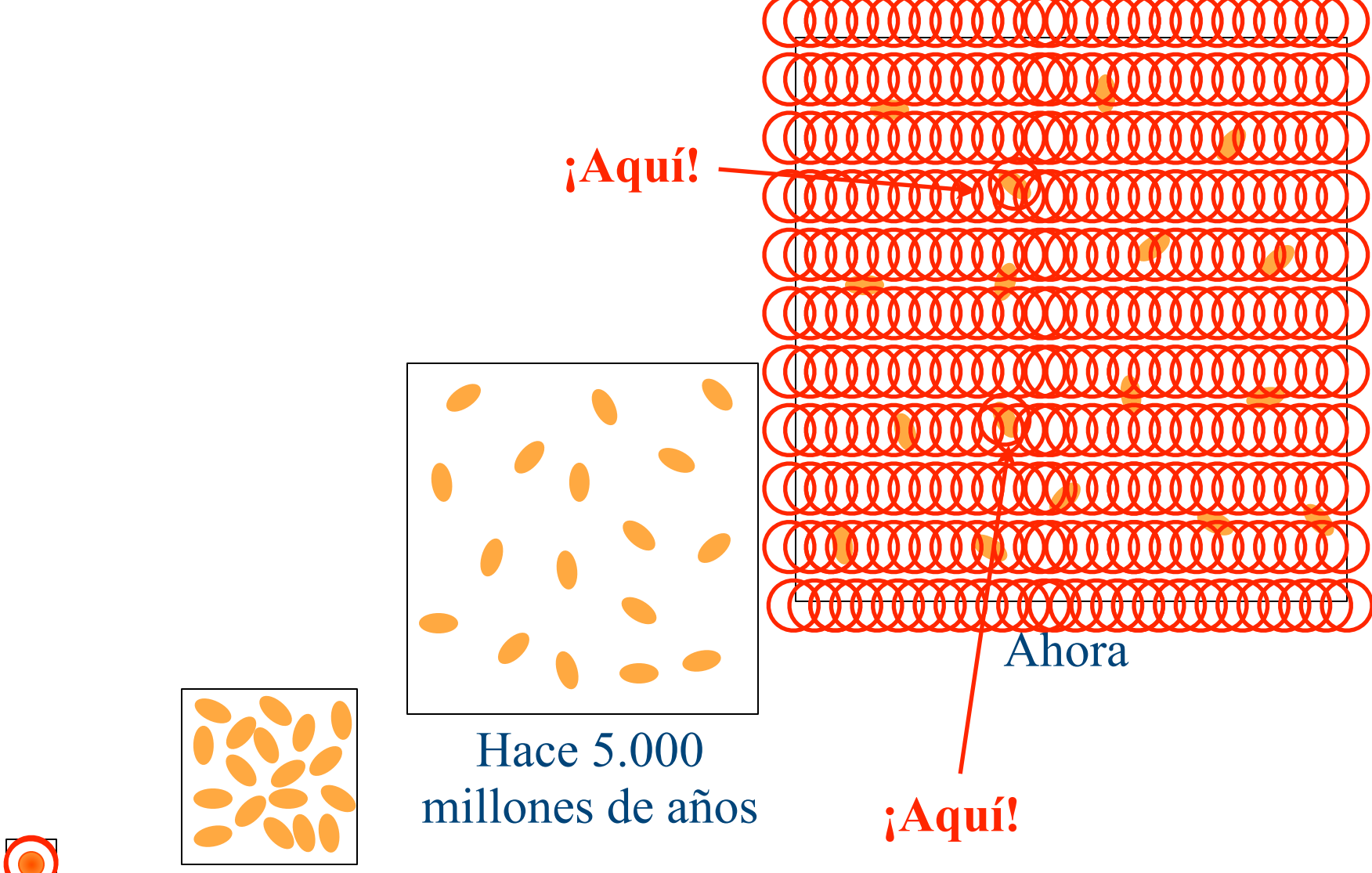

¡Aquí!
Ahora
Hace 5.000
millones de años
Hace 10.000
millones de años


¡Aquí!
Ahora
¡Aquí!
Hace 5.000
millones de años
Hace 10.000
millones de años


¡Aquí!
Ahora
¡Aquí!
Hace 5.000
millones de años
Hace 10.000
millones de años


¡Aquí!
Ahora
¡Aquí!
Hace 5.000
millones de años
Hace 10.000
millones de años


¡Aquí!
Ahora
¡Aquí!
Hace 5.000
millones de años
Hace 10.000
millones de años



¡El Big Bang ocurrió en todas partes!

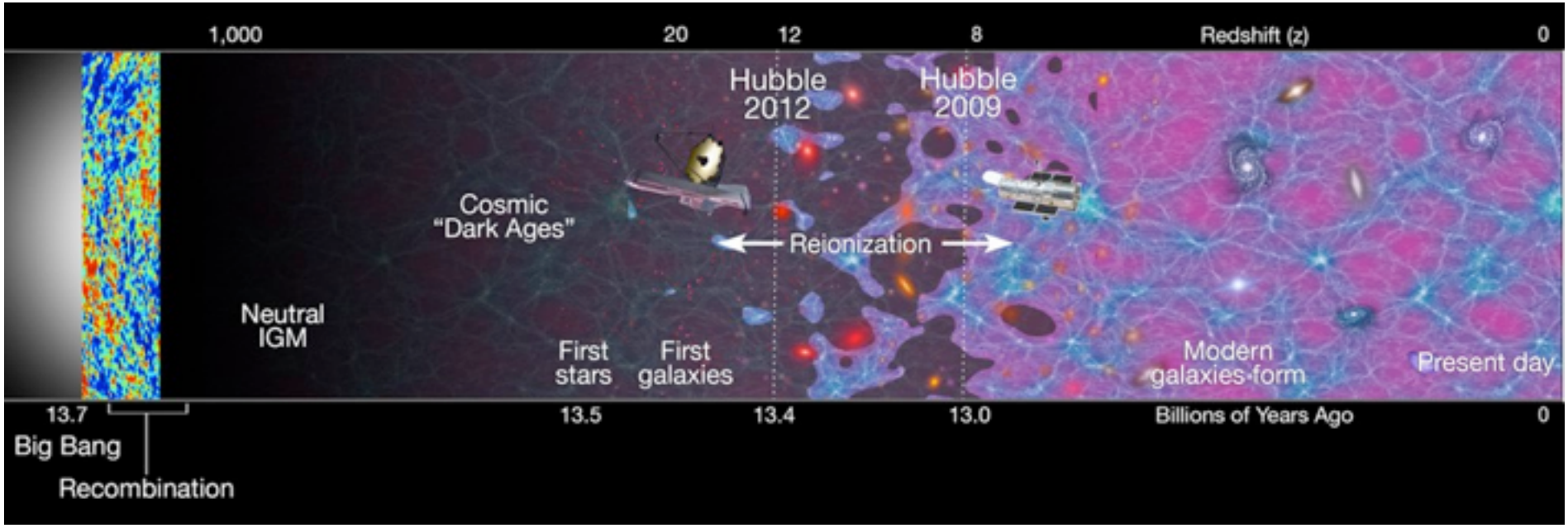
https://www.youtube.com/watch?v=g1JBnX7XMq8

Escala de tiempo "Redshift"

Factor de corrimiento al rojo ("redshift")

$$1 + z = \frac{a_{\text{now}}}{a_{\text{then}}}$$

Se utiliza como reloj cósmico

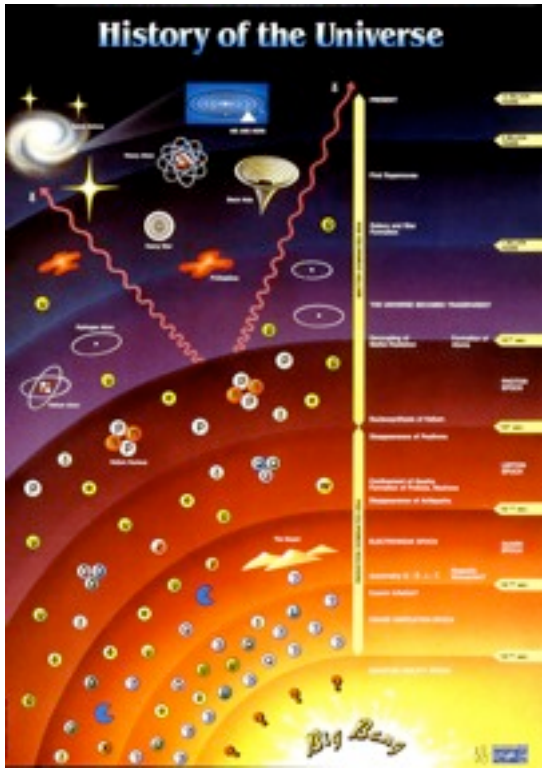


Modelo del Big Bang

Principio del Universo hace aprox. 13.000.000.000 años
Big Bang: Explosión primigenia en la que está concentrado todo el Universo conocido

G. Gamov

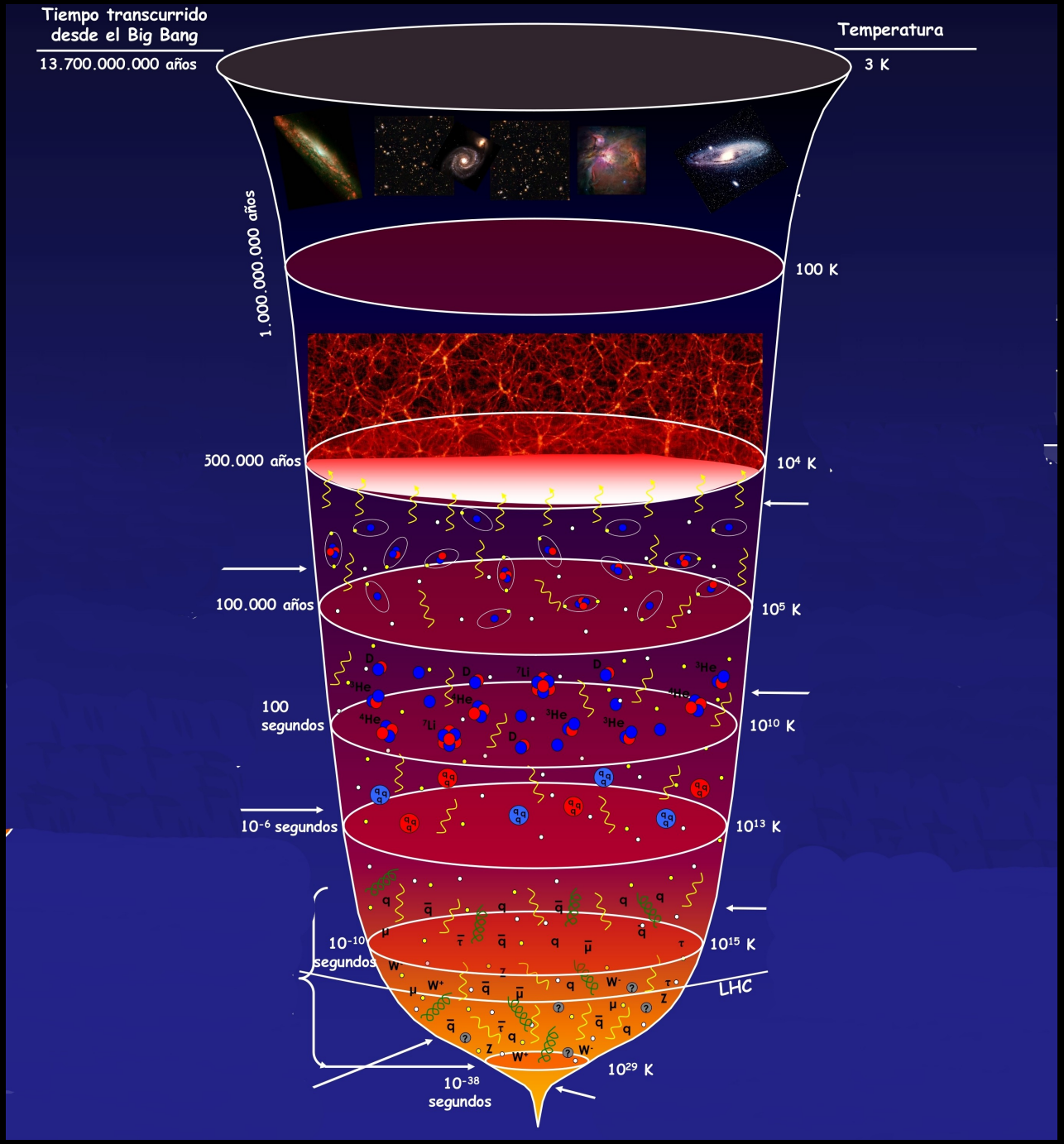
- Primeras fases, pura radiación (fotones).
- Posteriormente aparecen las partículas (protones, neutrones, electrones).
- Con el progresivo enfriamiento se formaron núcleos, luego los átomos, etc hasta finalmente estructuras astronómicas (estrellas, galaxias)



Predicciones claras y correctas:

- **Nucleosíntesis primordial**:
- **Radiación de fondo de microondas**
- **Formación de estructura**

¡Fascinante nueva visión del Universo!


Tiempo transcurrido desde el Big Bang
13.700.000.000 años
Temperatura
3 K
1.000.000.000 años
100 K
500.000 años
10^4 K
100.000 años
10^5 K
100 segundos
10^{10} K
10^{-6} segundos
10^{13} K
10^{-10} segundos
10^{15} K
LHC
10^{-38} segundos
10^{29} K

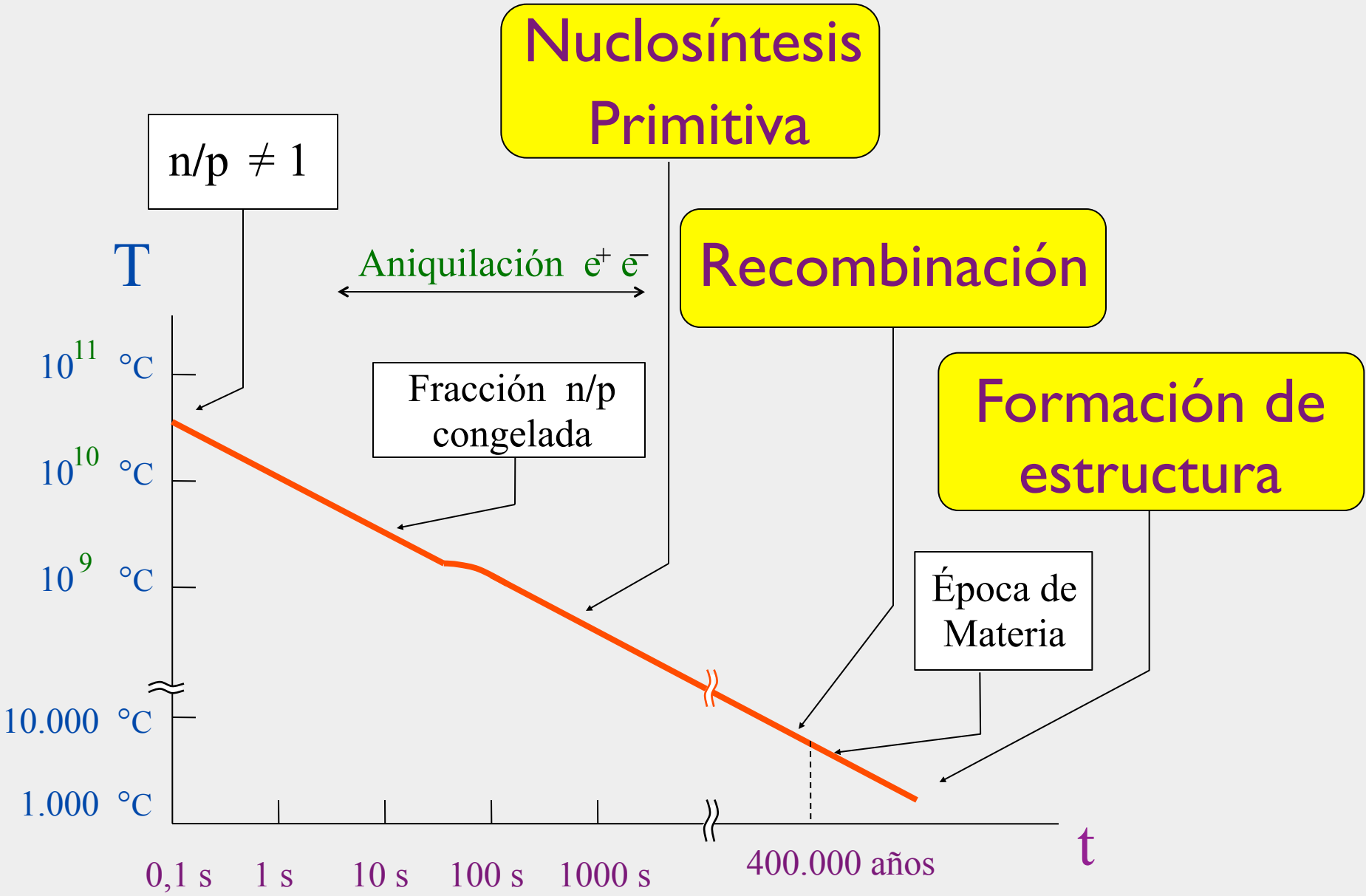
Teoría del Big-Bang

El universo primitivo estaba

muy caliente

Todos los objetos estaban derretidos en sus

componentes más fundamentales

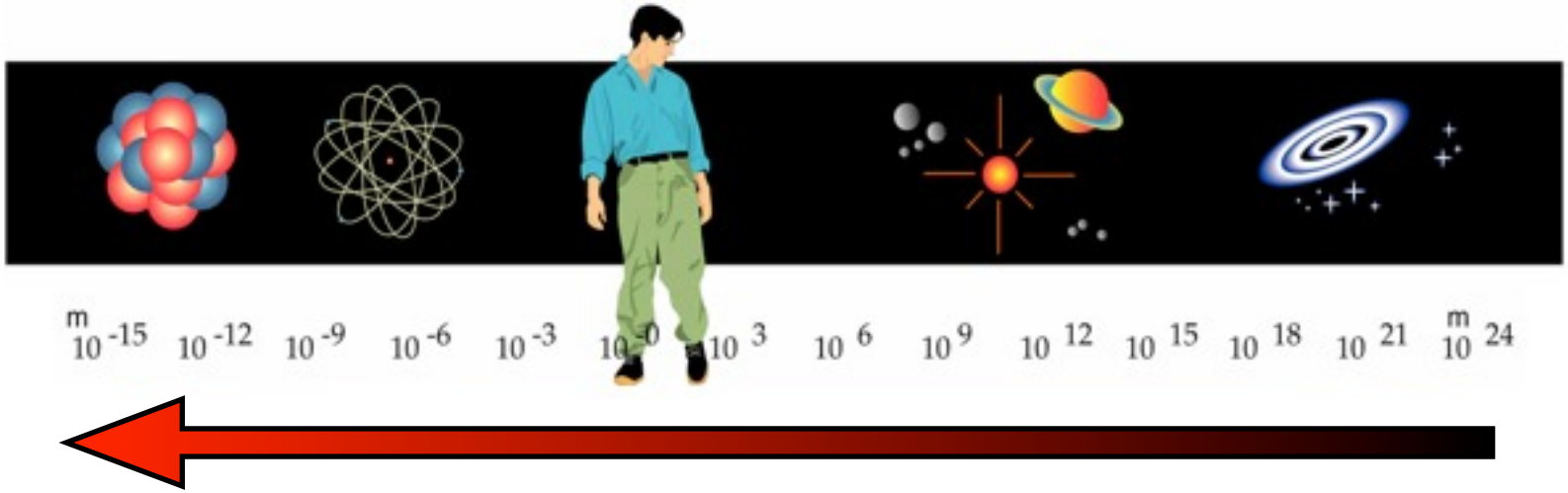

Nuclosíntesis Primitiva
n/p ≠ 1
T
Aniquilación e+ e−
Recombinación
10^11 °C
Fracción n/p congelada
Formación de estructura
10^10 °C
10^9 °C
Época de Materia
10.000 °C
1.000 °C
t
0,1 s
1 s
10 s
100 s
1000 s
400.000 años

THE TWO FRONTIERS OF PHYSICS

LAS DOS FRONTERAS DE LA FISICA

La física de partículas estudia la materia en sus dimensiones más diminutas

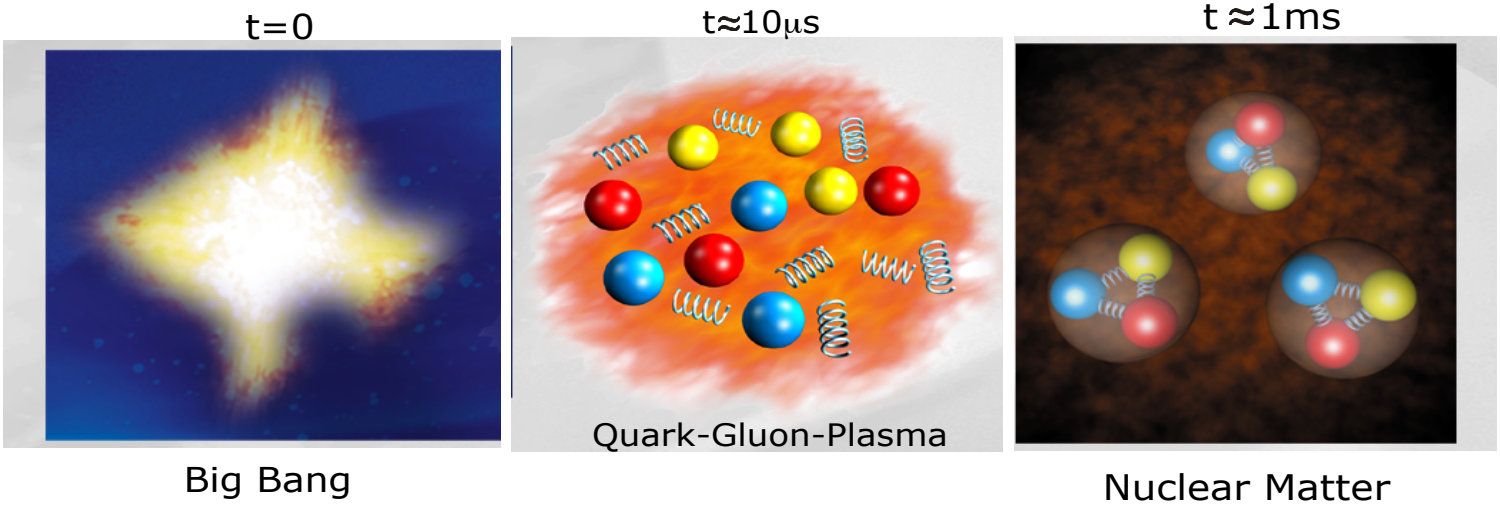
La astrofísica y la cosmología estudian la materia en sus dimensiones más grandes



¡ Ambas fronteras están relacionadas !

Física de Partículas y Cosmología

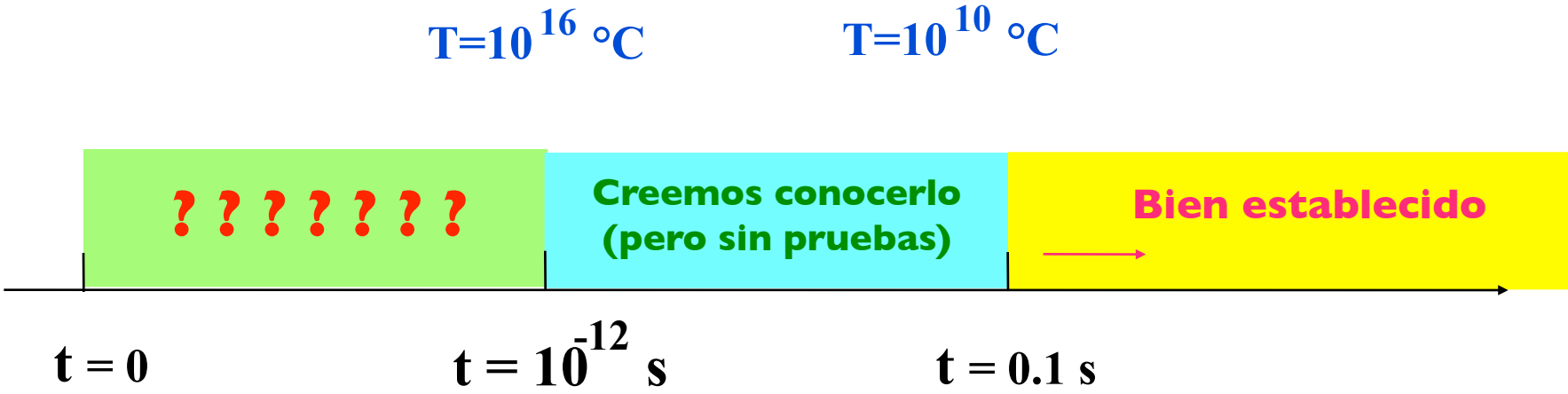
La Física de Partículas empuja las fronteras del conocimiento hacia etapas más y más tempranas en la evolución del Universo



Estrecha relación entre preguntas en ambos campos

- Materia oscura ⇔ Partículas supersimétricas
- Inflación ⇔ Campos escalares similares al Higgs
- Asimetría materia-antimateria ⇔ violación CP, núm. bariónico
- ...

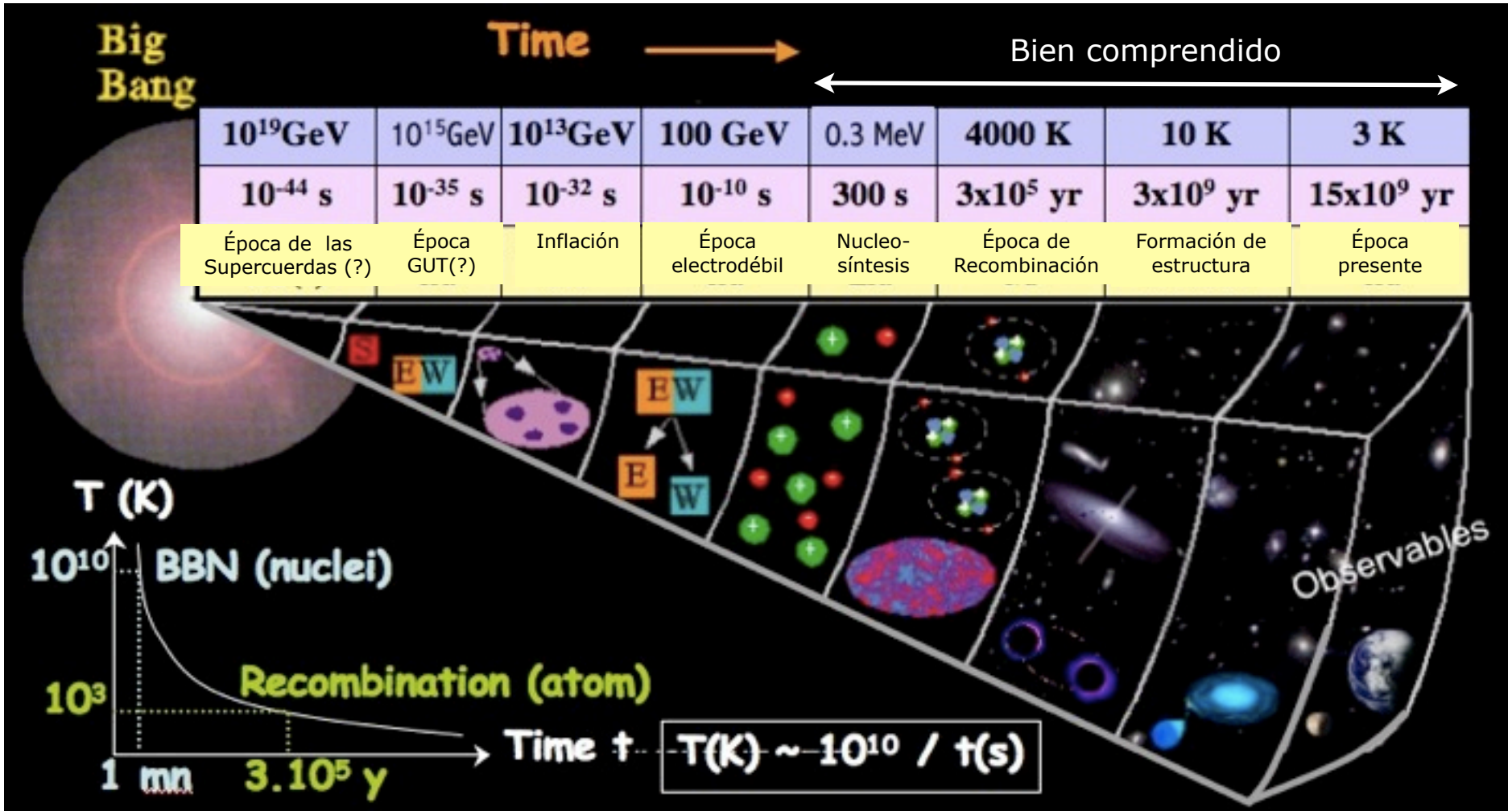
¿Es **FIABLE** la descripción del Big-Bang hasta el preciso instante inicial?



Terra incognita

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

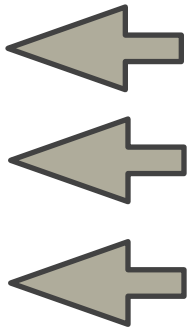
Pero nos proporcionan una imagen bastante detallada de la evolución del Universo a partir de las primeras fracciones de segundo



Terra incognita

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



Predicciones del Modelo del Big Bang

$t = 10^{-35}$ s

Fluctuaciones de densidad (¿inflación?)

t ~ 1 mn

Nucleosíntesis

Abundancias de núcleos ligeros

observable

t ~ 300000 yrs

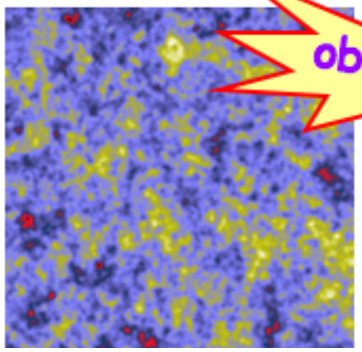
Recombinación p+e-> H

Materia:
Colapso gravitatorio

Fotones:
Propagación libre

observable

Estrellas, galaxias, cúmulos



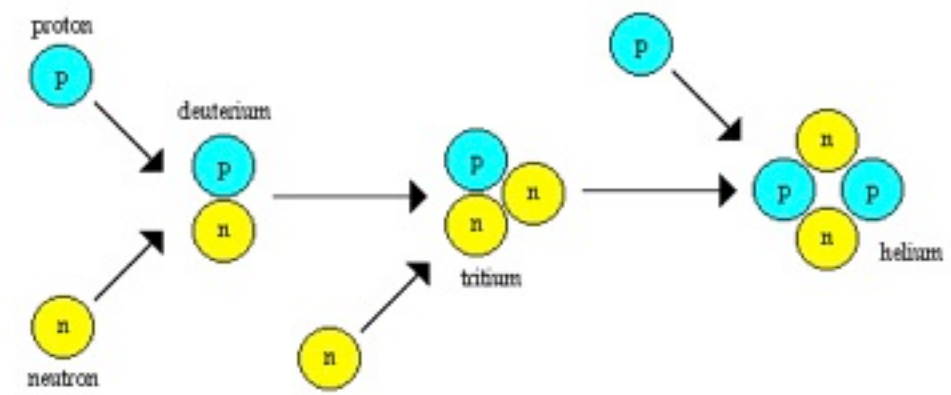
observable

Fondo de radiación

$t \approx 100\ s$

$T = 10^9\ °C$

1. Nucleosíntesis primordial
Abundancias de núcleos ligeros



Nucleosíntesis primordial

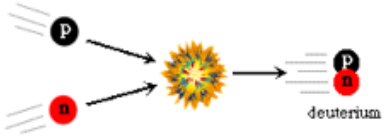
En los primeros minutos, el Universo lleno de fotones, protones, neutrones, electrones, en equilibrio térmico

Temperatura tan alta que los núcleos están disociados

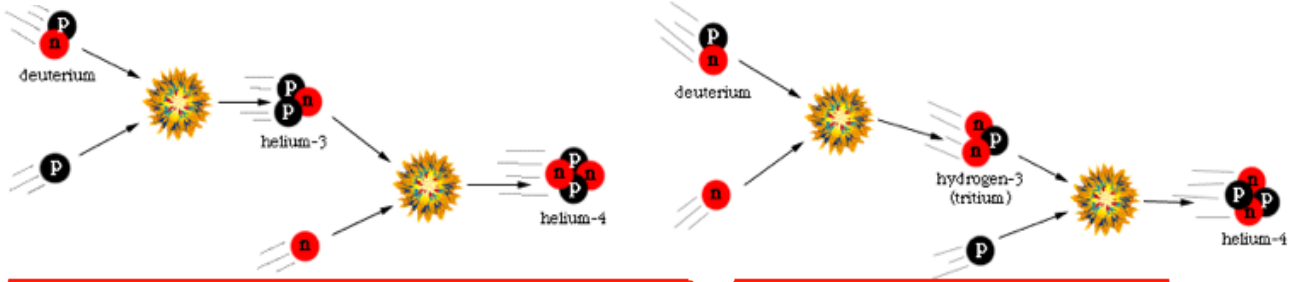
Al enfriarse hasta T~0.3 MeV, los protones y neutrones cristalizan en núcleos

- 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

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

Sus abundancias han permanecido casi sin modificación hasta hoy

¡ Buen acuerdo con las medidas astronómicas !

Hidrógeno (^{1}H) ~ 75 %

Helio (^{4}He) ~ 25 %

Deuterio (^{2}H) ~ $3 / 10^{5}$

Helio-3 (^{3}He) ~ $1 / 10^{5}$

Litio (^{7}Li) ~ $5 / 10^{10}$

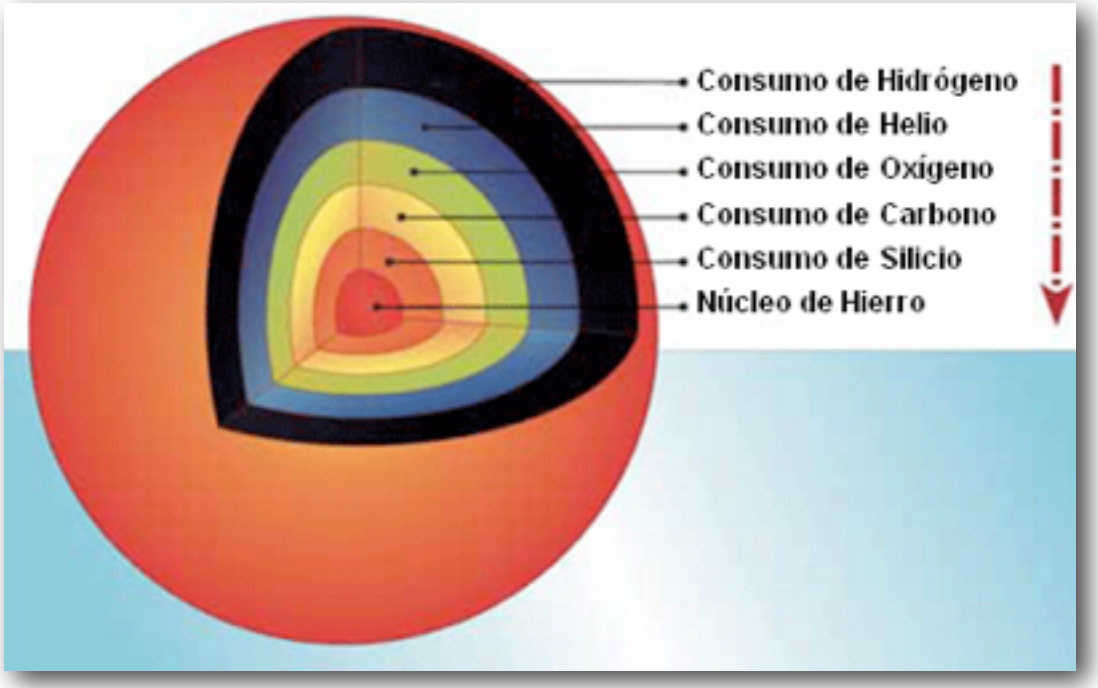
Nucleosíntesis estelar

¿Y el oxígeno que respiramos, el carbono de nuestros cuerpos...?
¿De dónde salen todos los núcleos más pesados que el helio?

Nucleosíntesis estelar

¿Y el oxígeno que respiramos, el carbono de nuestros cuerpos...?
¿De dónde salen todos los núcleos más pesados que el helio?

El resto de elementos más pesados se formó íntegramente en la combustión de una primera generación de estrellas que explotaron como supernovas y regaron el Universo con esos elementos



Nucleosíntesis estelar

¿Y el oxígeno que respiramos, el carbono de nuestros cuerpos...?
¿De dónde salen todos los núcleos más pesados que el helio?

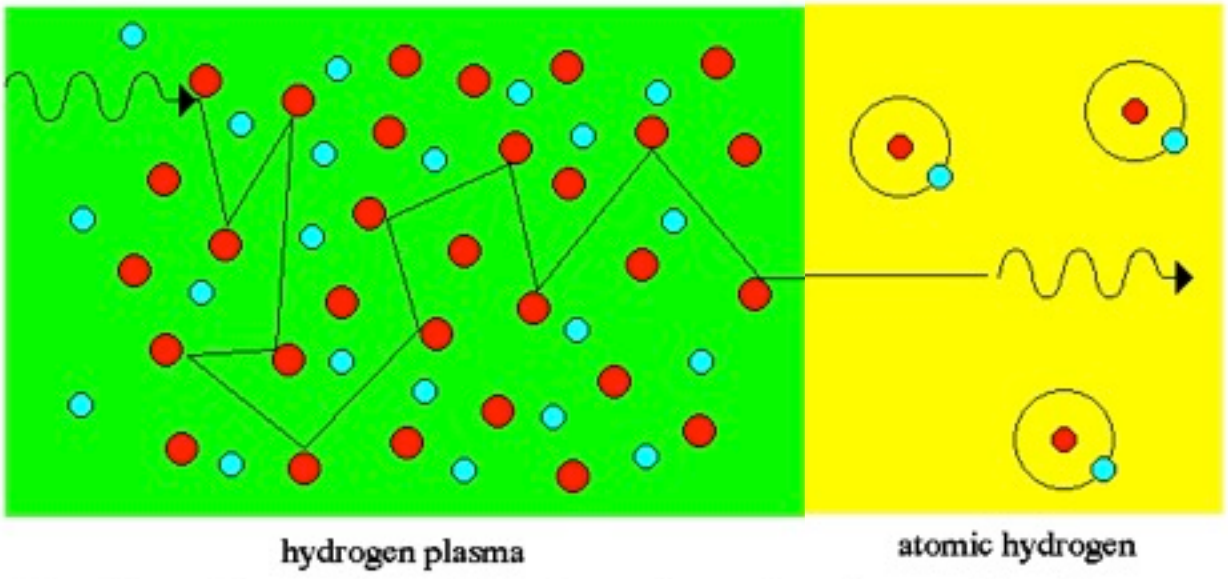
El resto de elementos más pesados se formó íntegramente en la combustión de una primera generación de estrellas que explotaron como supernovas y regaron el Universo con esos elementos

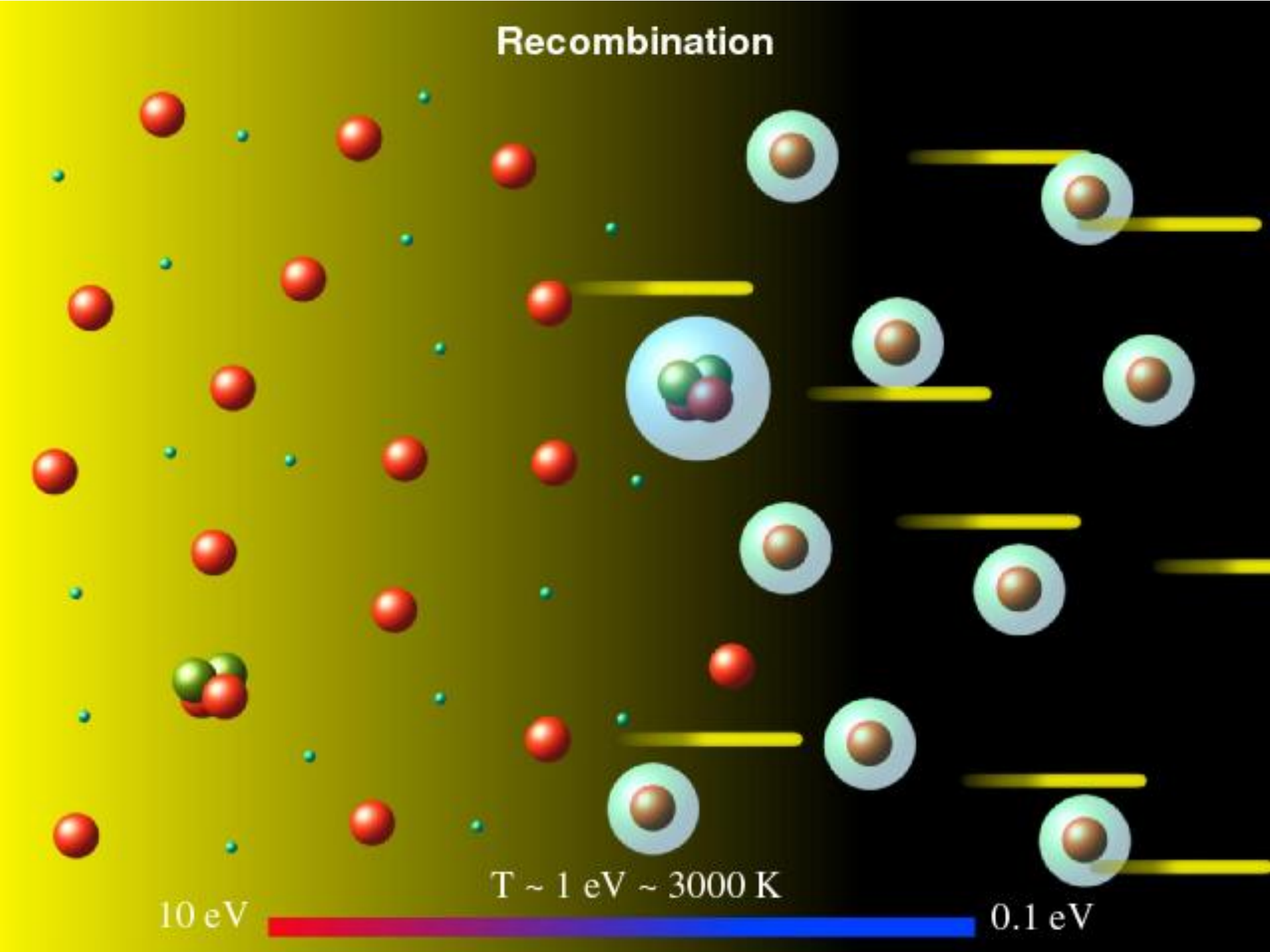
"Somos polvo de estrellas muertas"

t ≈ 380.000 años

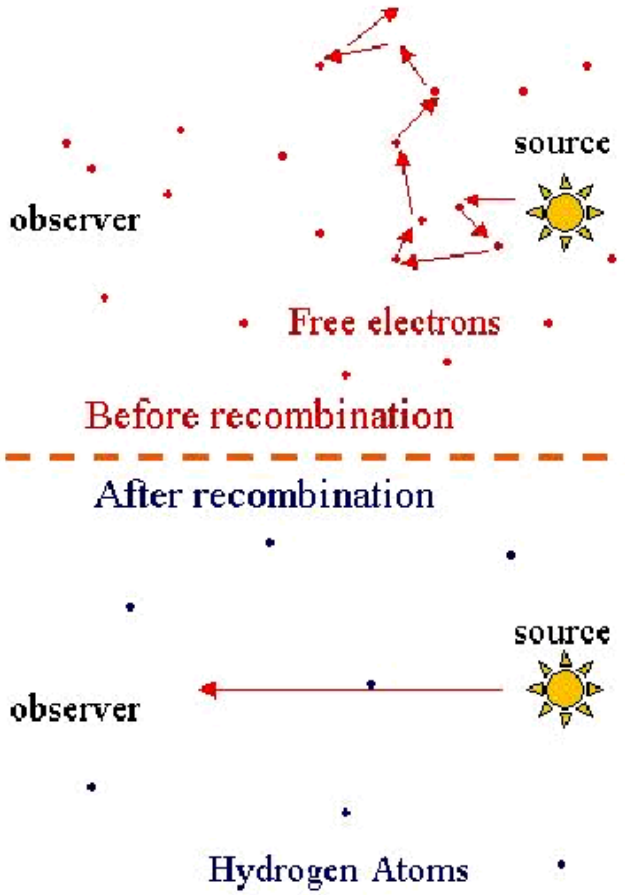
T = 4000°C

2. Formación de átomos y Fondo de Radiación de Microondas




Recombination
T ~ 1 eV ~ 3000 K
10 eV
0.1 eV

Fondo de radiación de microondas



- 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

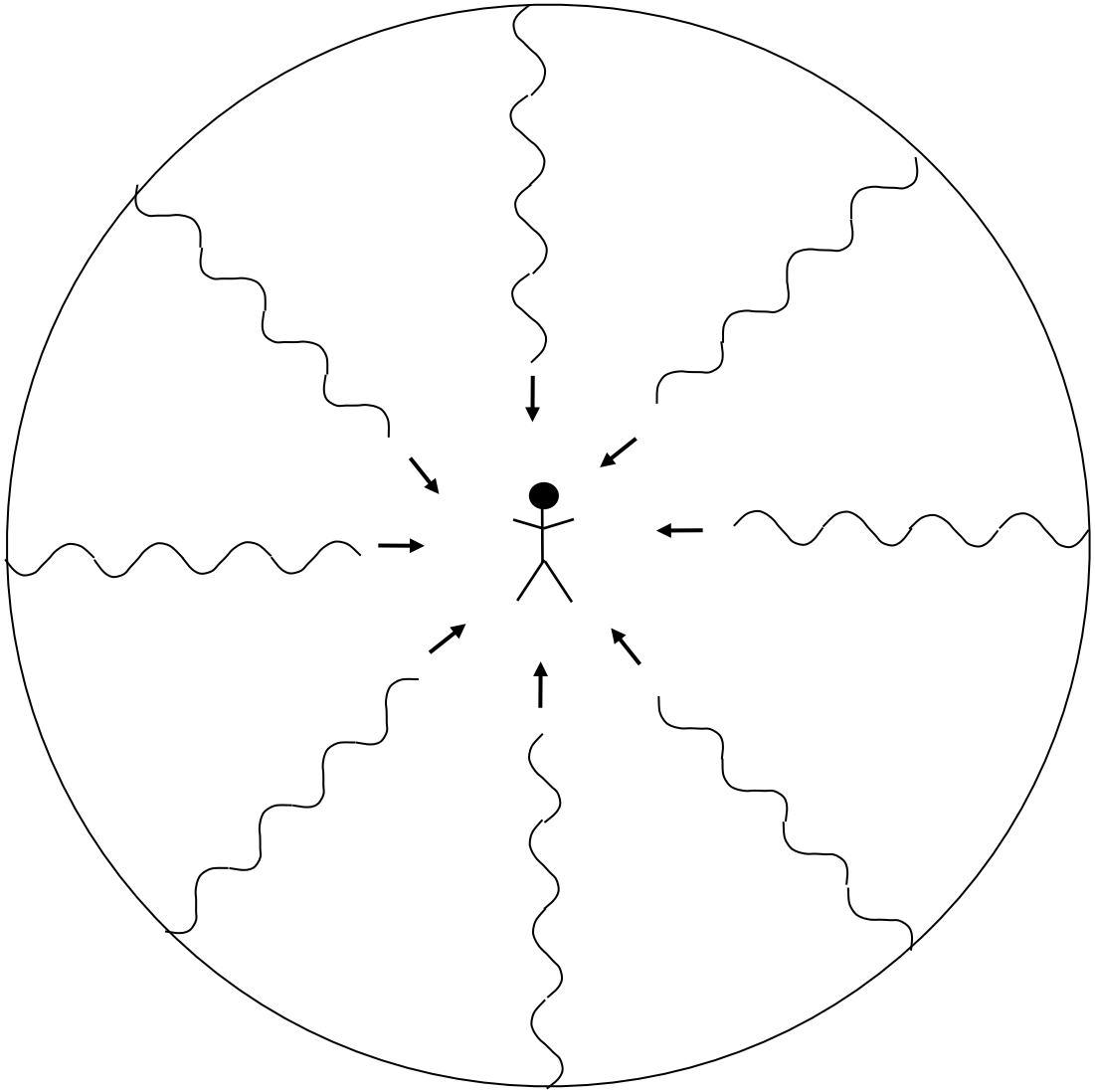
- Al enfriarse hasta T~0.4 eV=4000K, los núcleos y electrones cristalizan en átomos

- Los átomos son neutros ⇒ El Universo se convierte en transparente a los fotones.

Radiación reliquia llena el Universo

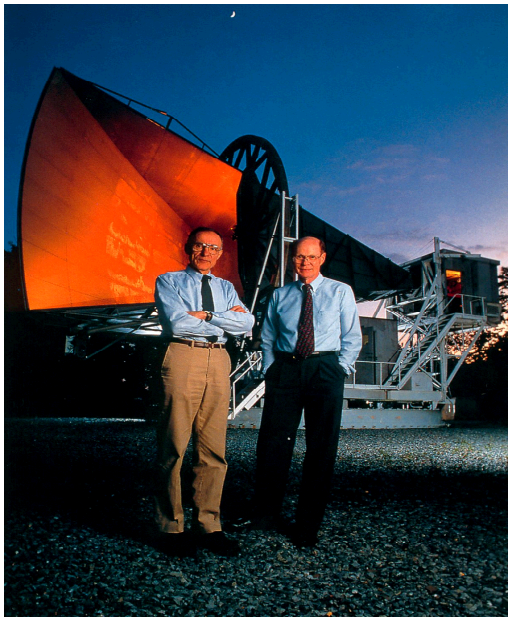
Hoy el Universo es 1100 veces más viejo, la frecuencia y temperatura han corrido al rojo un factor ~1100, hasta **T=2.7K**

Fondo de radiación de microondas

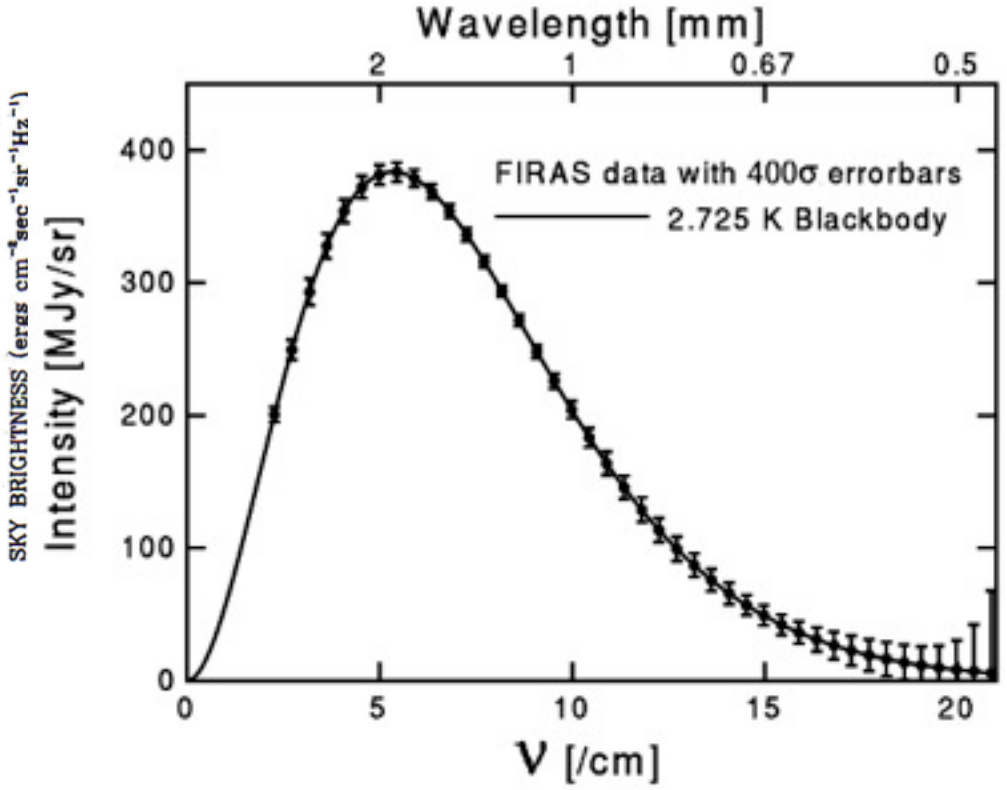


Fondo de radiación de microondas

Descubrimiento del fondo de radiación de microondas
'Cosmic Microwave Background' (CMB) en 1965



A. Penzias y R. Wilson



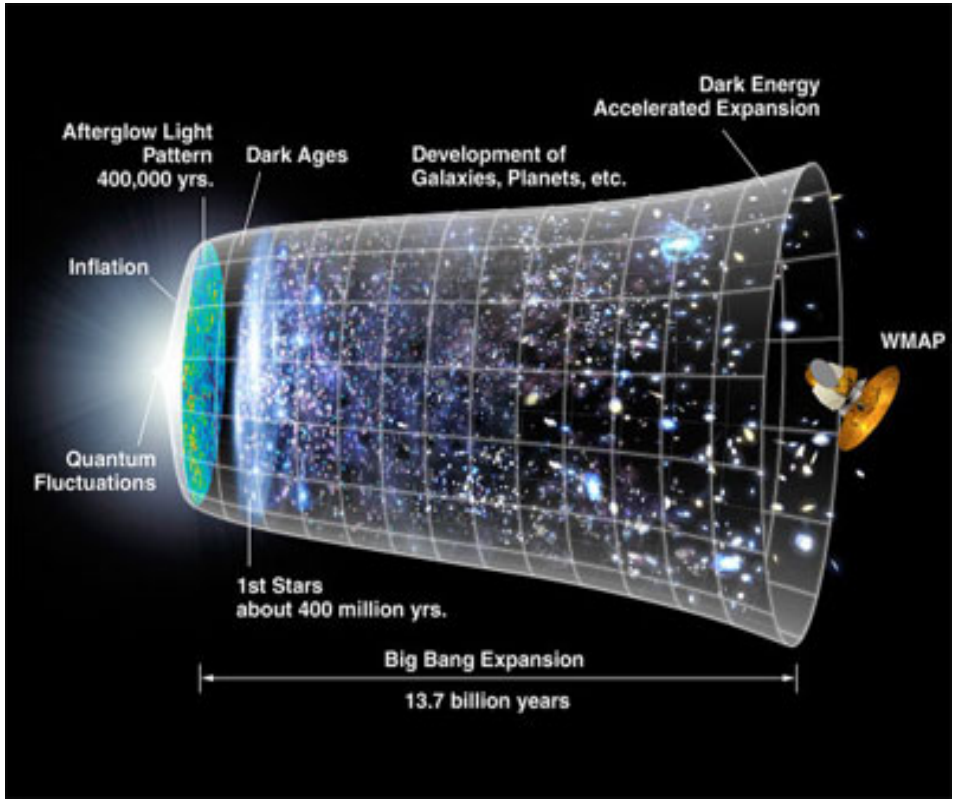
Radiación con espectro de cuerpo negro a temperatura de 3K

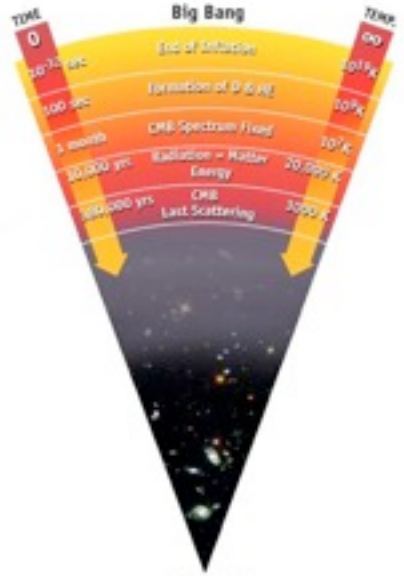
Fondo de radiación de microondas

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

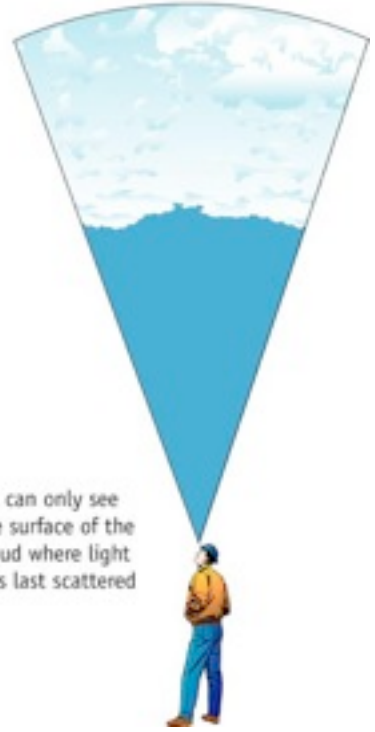
Fotografía del Universo cuando tenía 300.000 años (hace 13.000.000.000 años)

Nuestra imagen más precisa del Universo primitivo



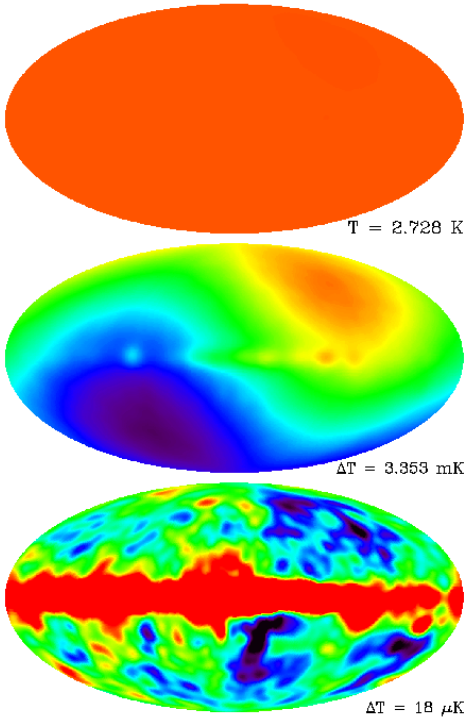


The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



Fondo de radiación de microondas

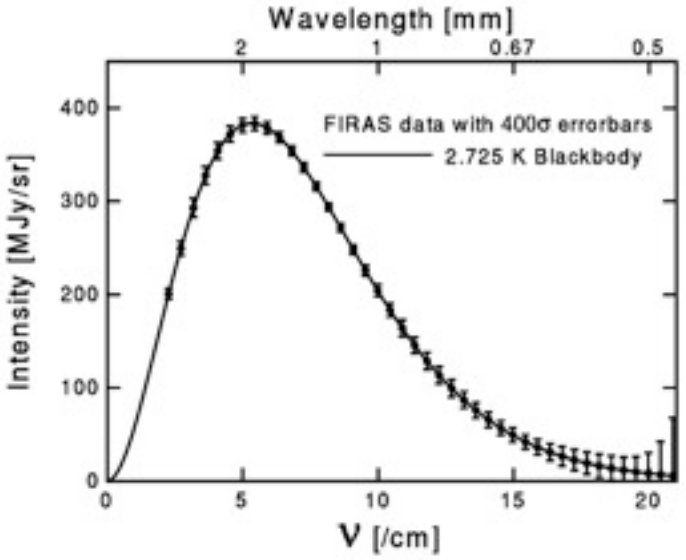
Estudio del fondo de radiación de microondas por el satélite COBE



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

Fondo de radiación de microondas

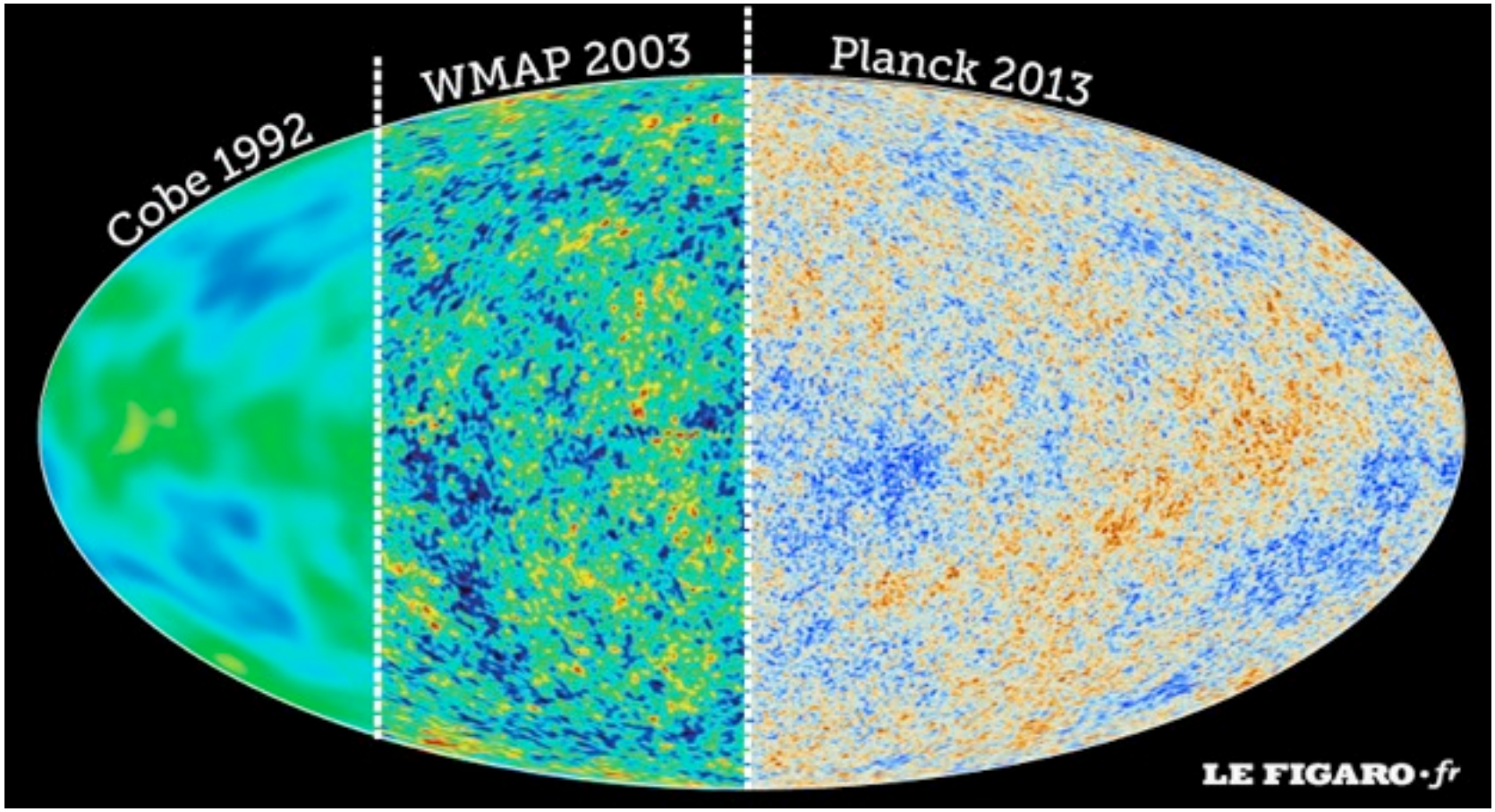


Foto del Universo primitivo por el satélite Planck

Extremadamente homogéneo, irregularidades de una parte en 100.000 (0.001%)

Fondo de radiación de microondas

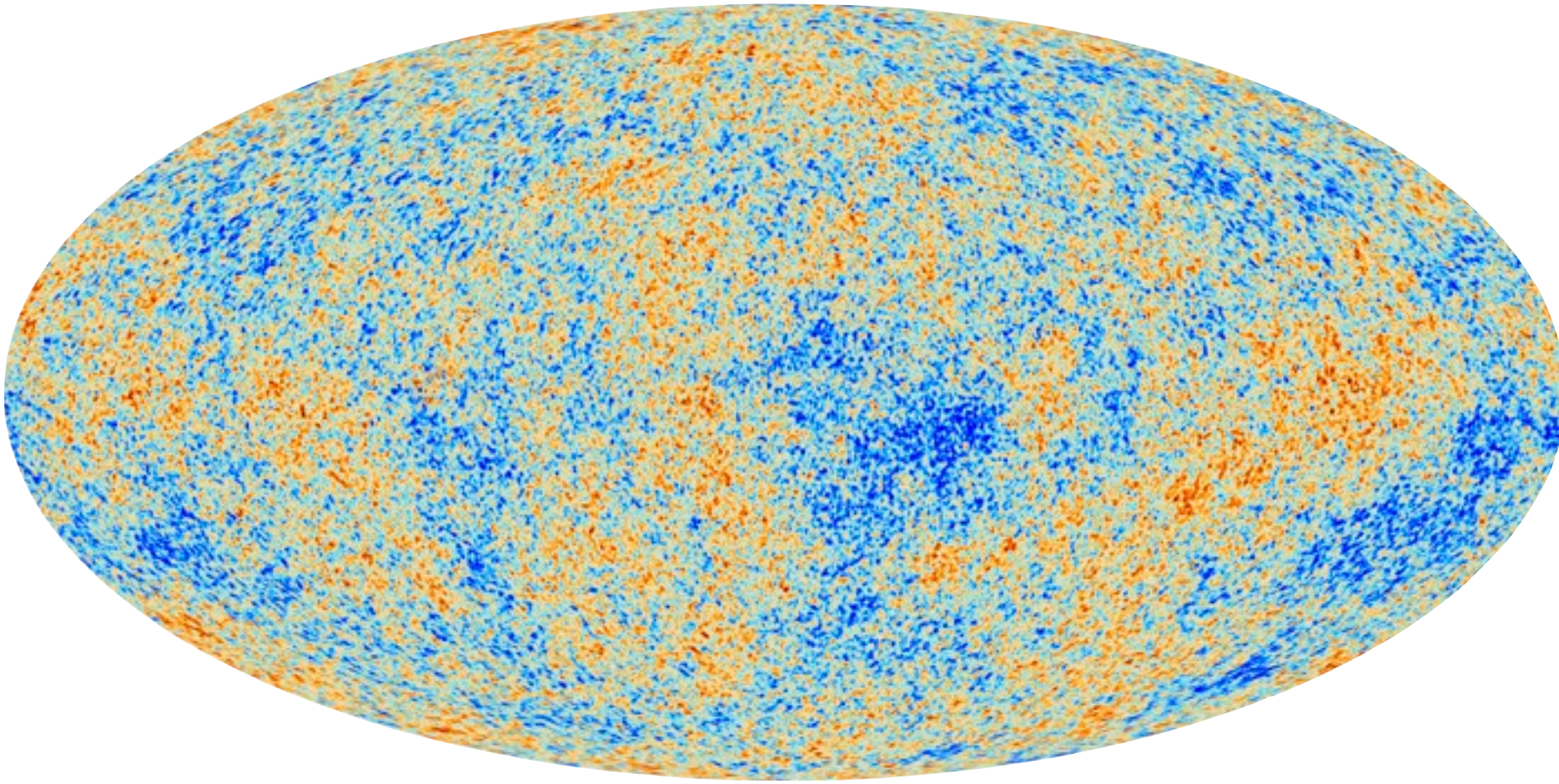
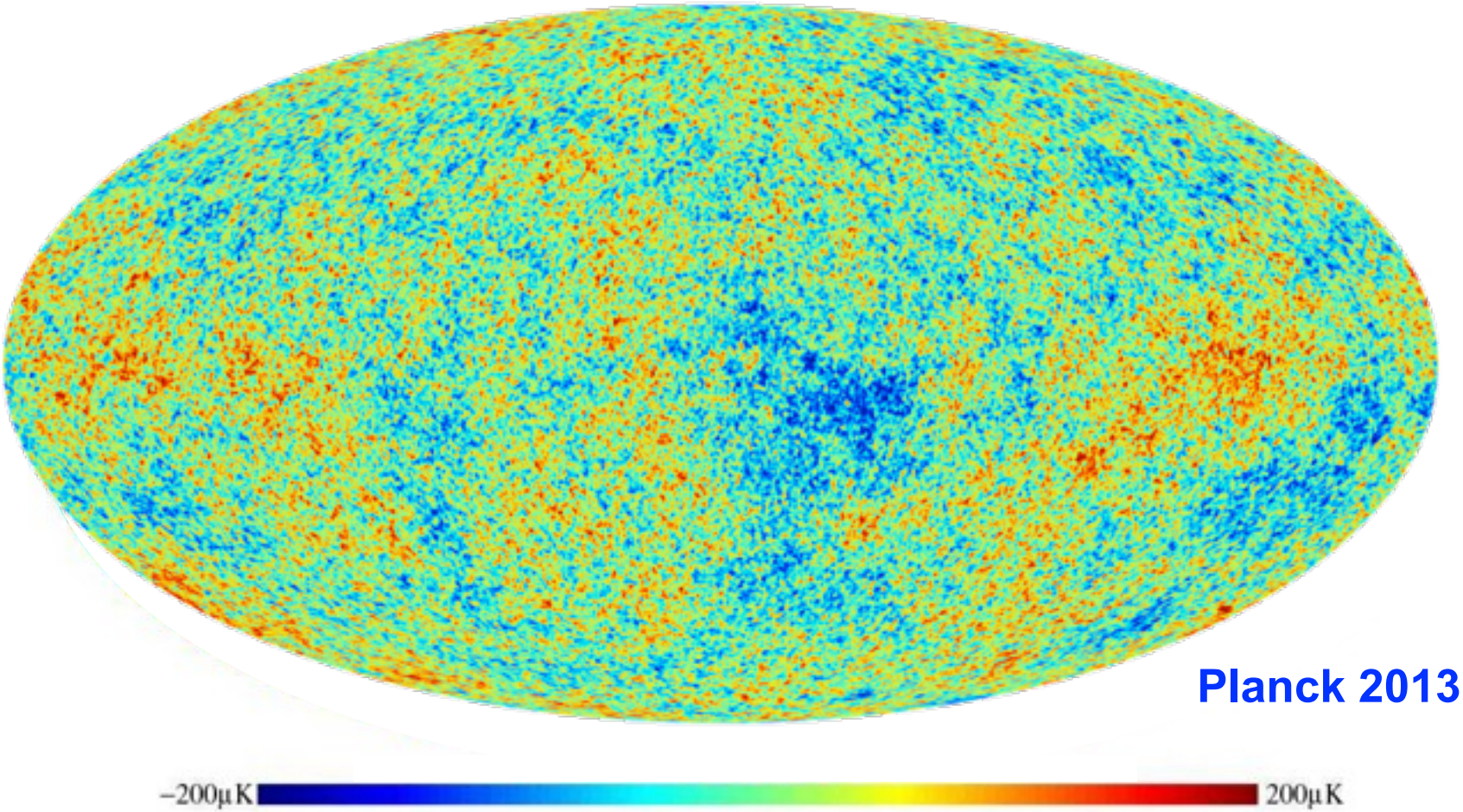


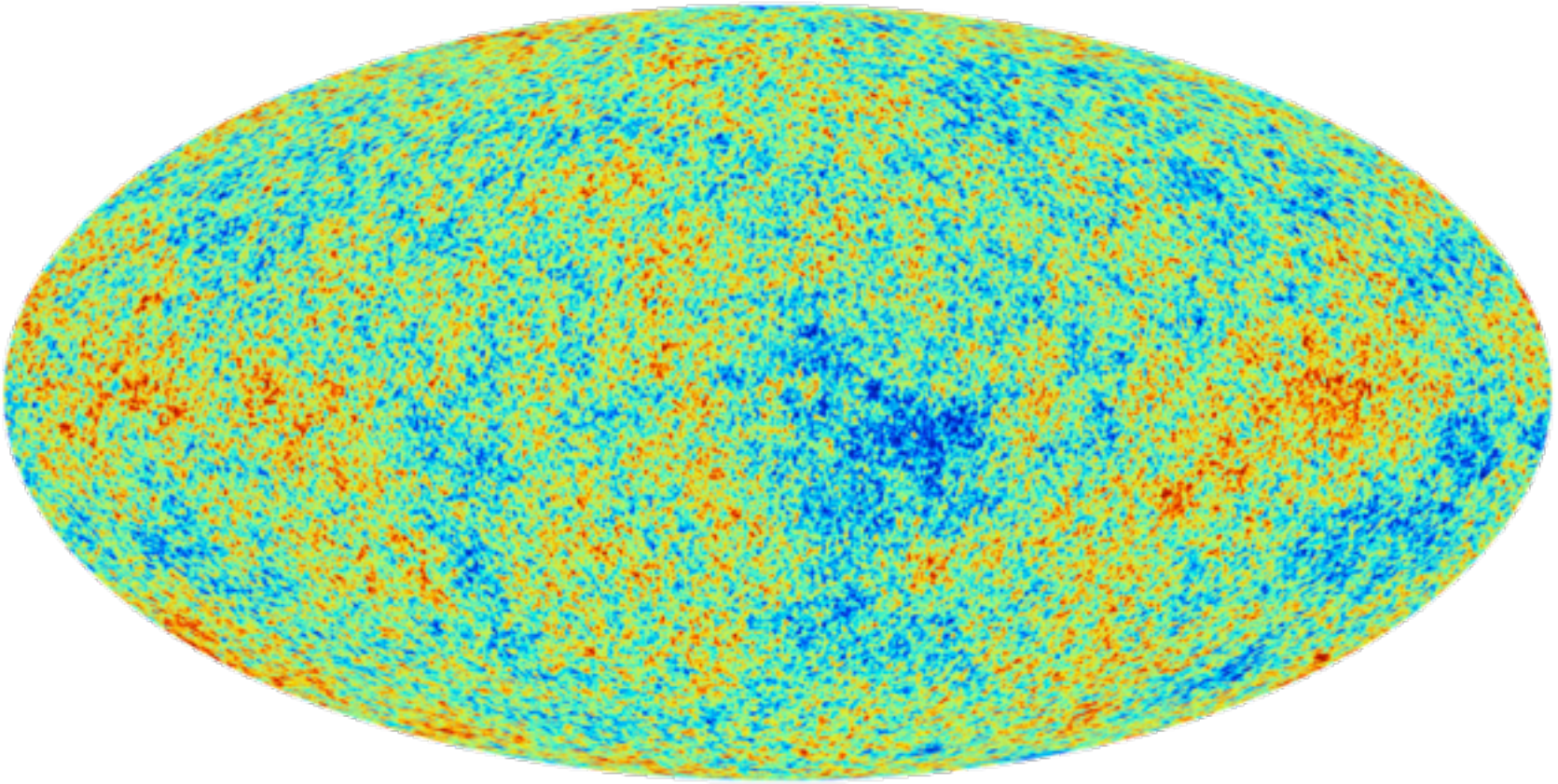
Foto del Universo primitivo por el satélite Planck

Extremadamente homogéneo, irregularidades de una parte en 100.000 (0.001%)

https://www.youtube.com/watch?v=_pDZW-RAXcc



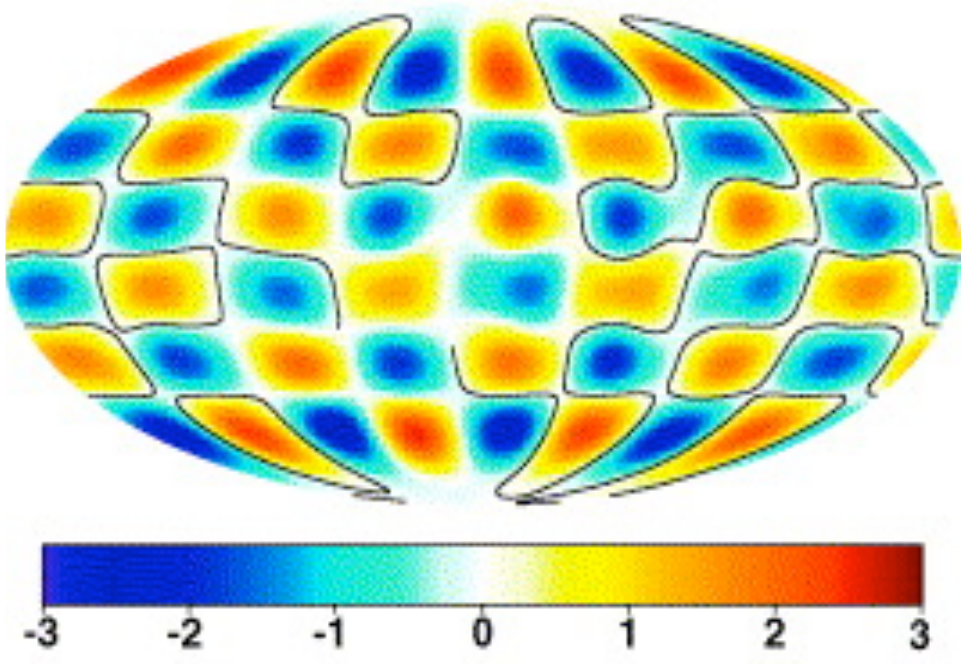
Es un mapa de temperaturas, pero también de densidades del plasma primitivo en el momento de la Recombinación

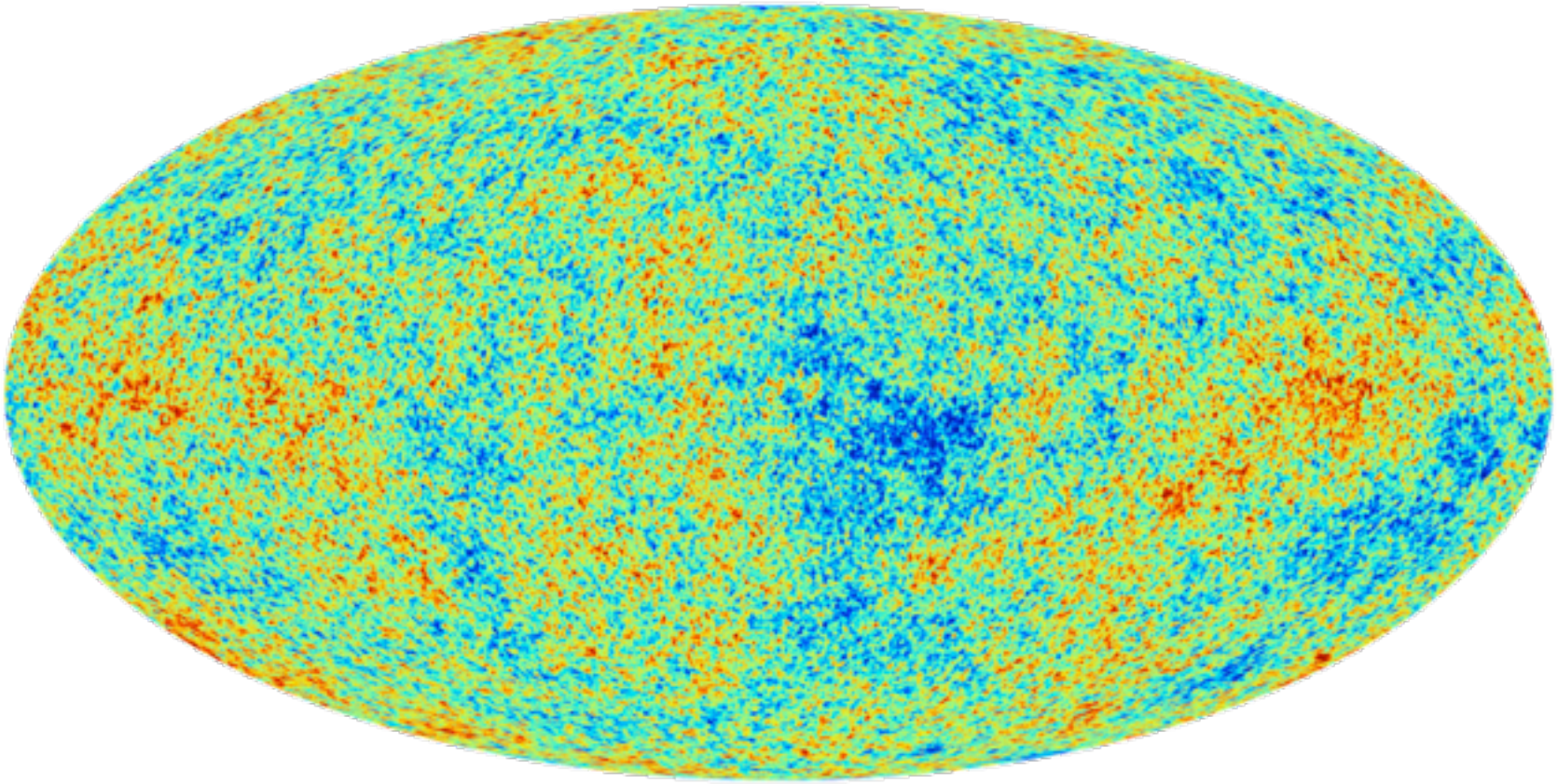


¿A qué se deben las variaciones de densidad?

¡A ondas sonoras!

longitud de onda

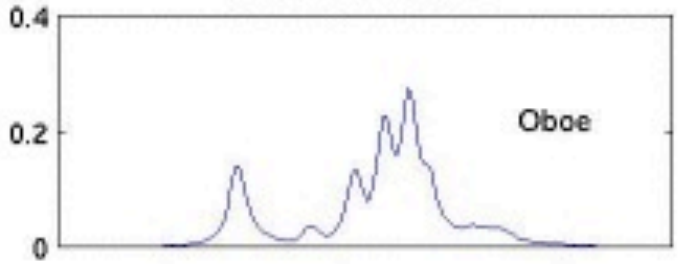

-3
-2
-1
0
1
2
3



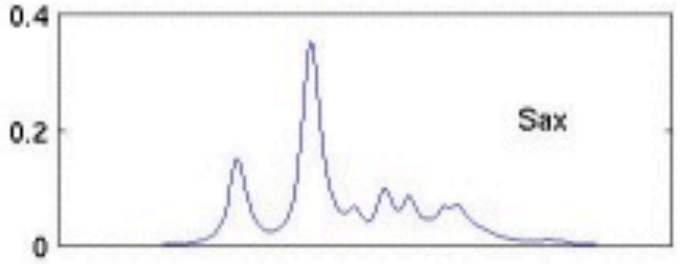
“la música de las esferas...”

espectro sonoro

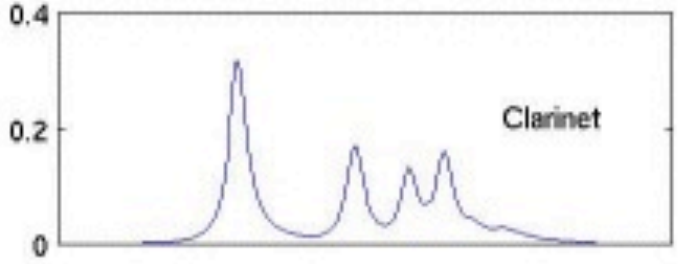
Oboe



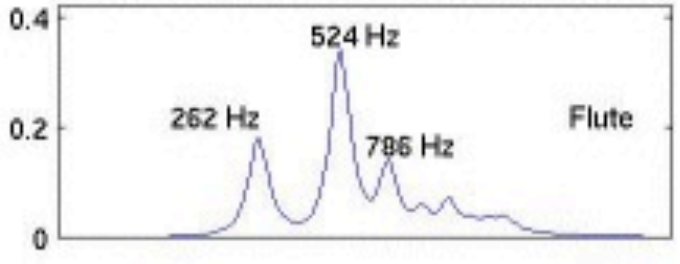
Saxo



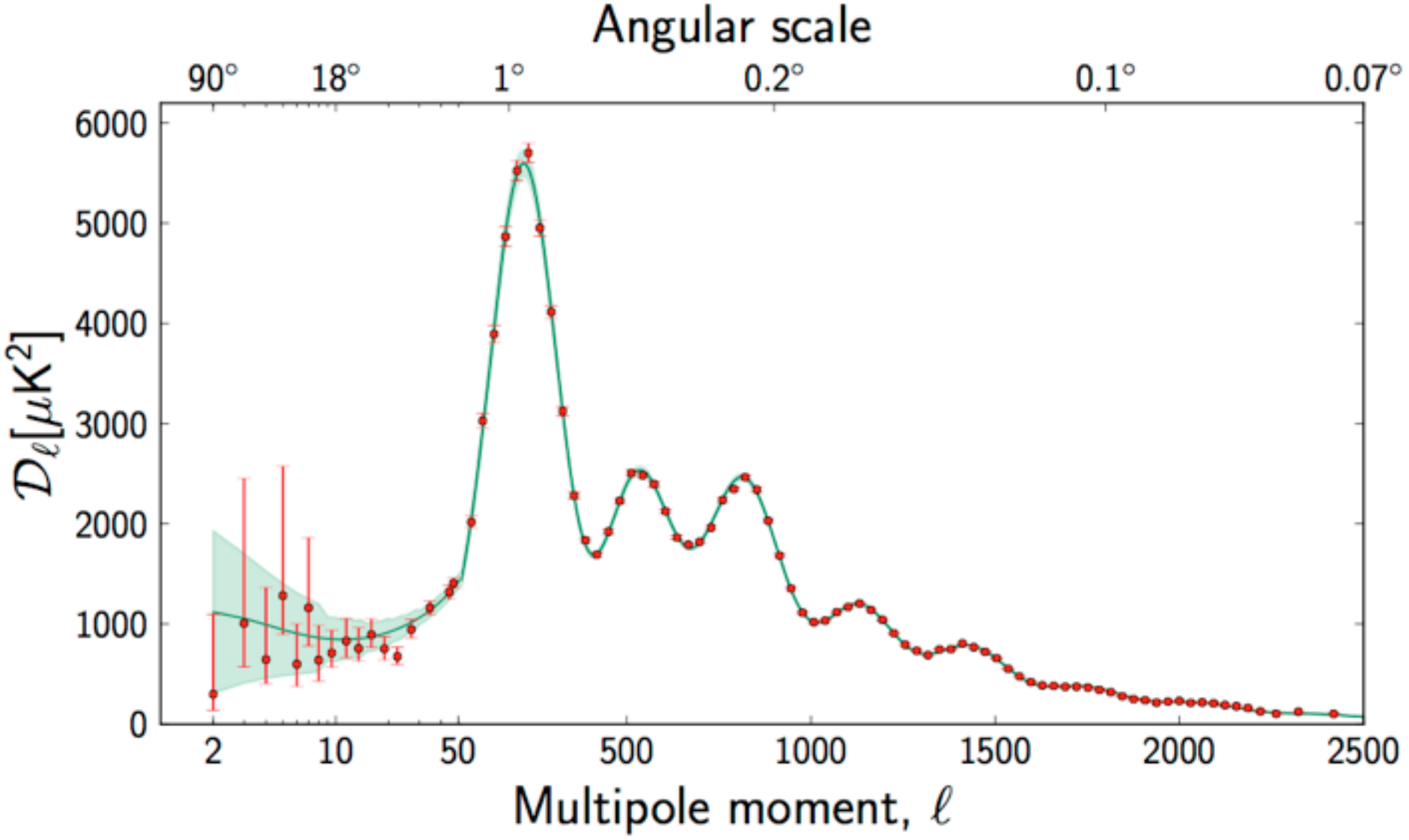
Clarinete



Flauta



Planck 2013


Angular scale
90°
18°
1°
0.2°
0.1°
0.07°
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
$\mathcal{D}_\ell[\mu K^2]$
2
10
50
500
1000
1500
2000
2500
Multipole moment, ℓ

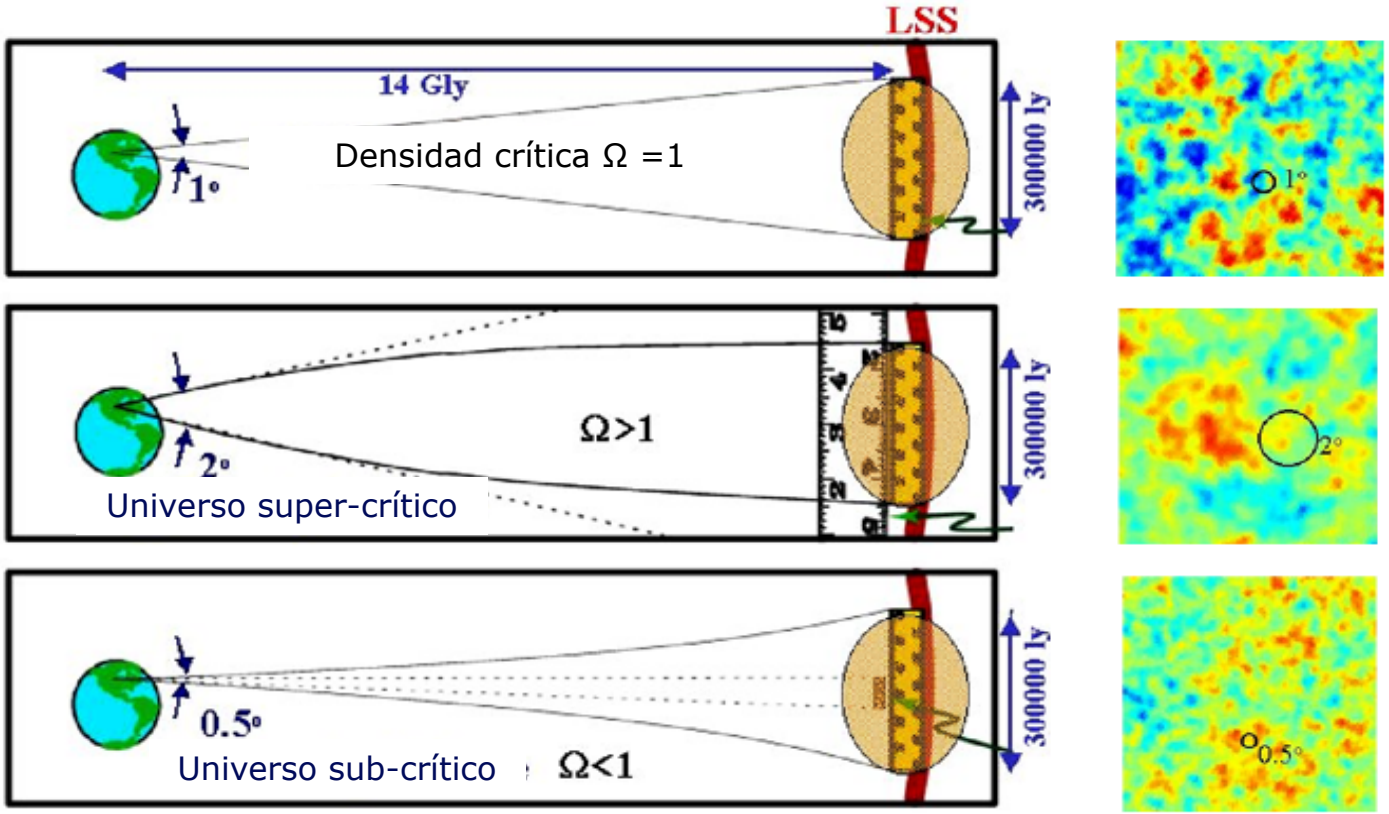
Fondo de radiación de microondas

Estudio detallado de la información en el CMB, ver próxima charla

Sólo anticipamos que...

Fondo de radiación de microondas

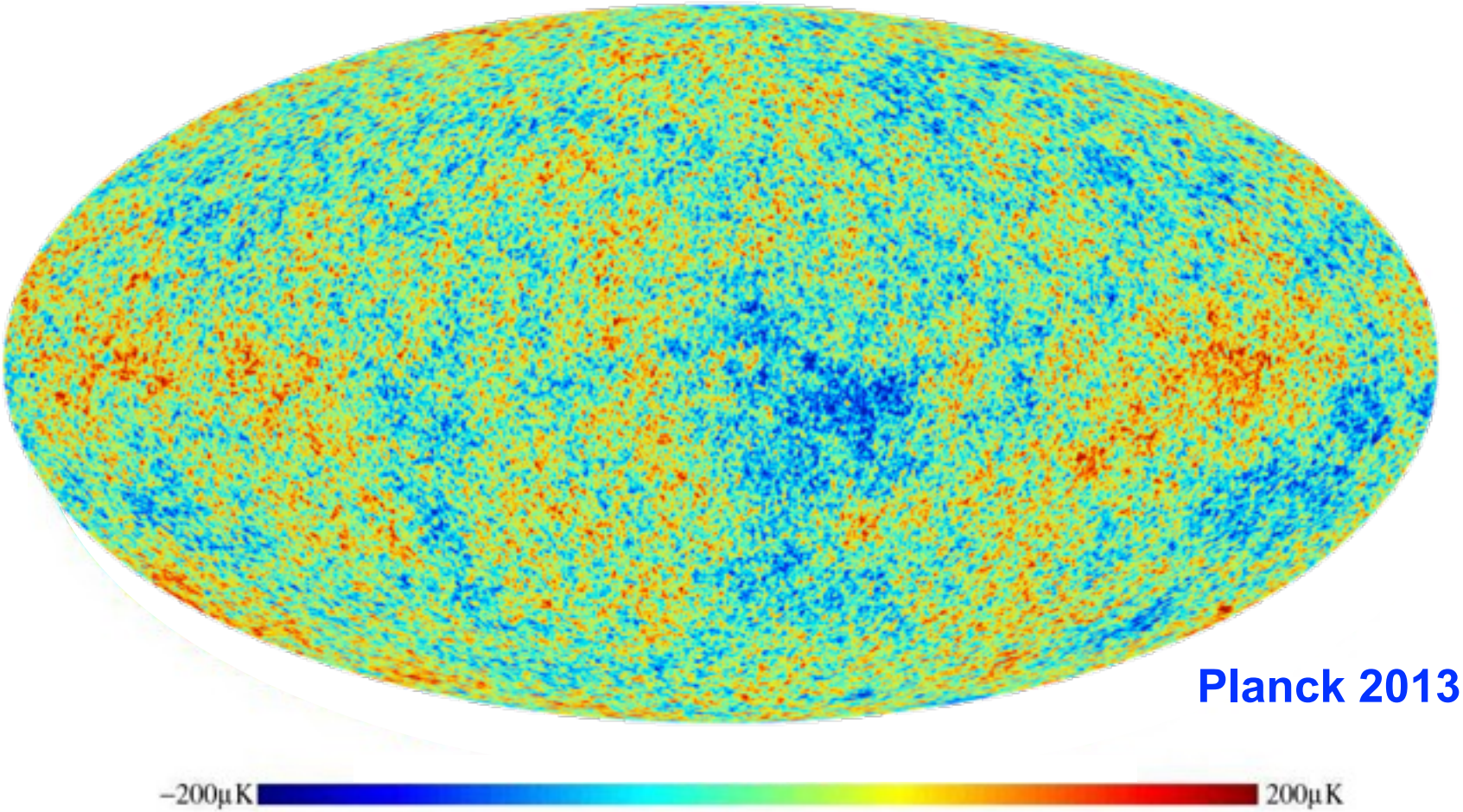
El análisis de las inhomogeneidades revela
la geometría, la historia y la composición del Universo



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

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

3. Formación de estructura a gran escala



Es un mapa de temperaturas, pero también de densidades del plasma primitivo en el momento de la Recombinación

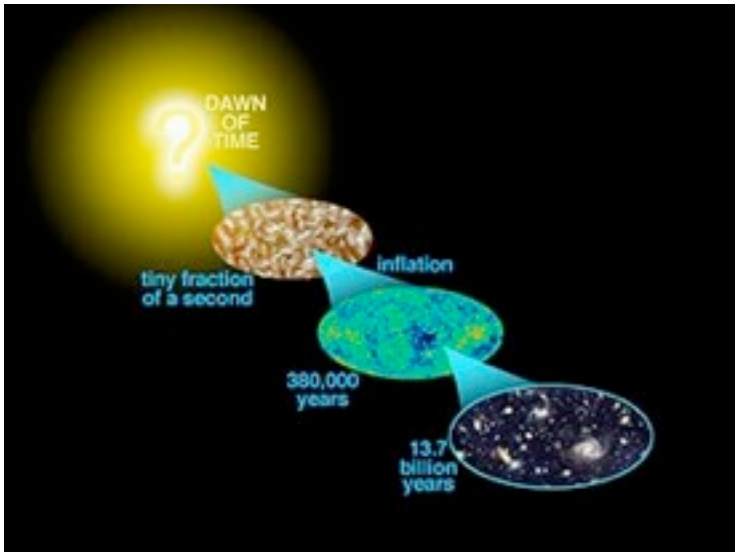
Formación de estructura

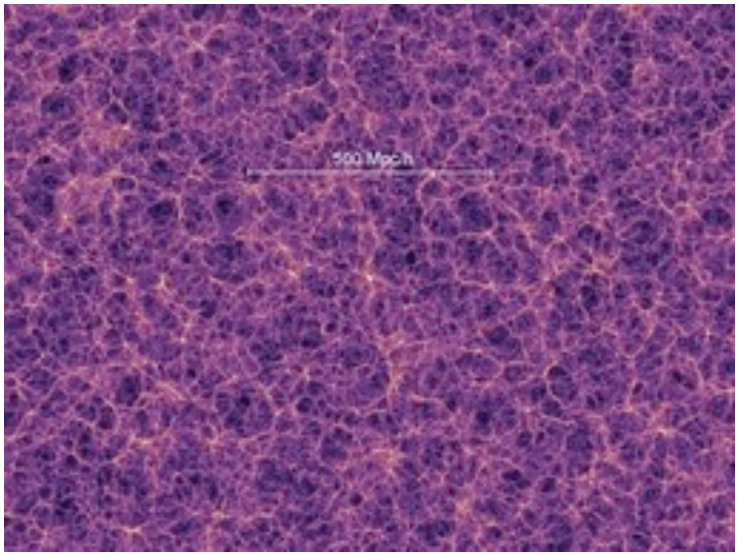
- Inhomogeneidades del CMB: fluctuaciones en la densidad del Universo para t=300.000 años

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

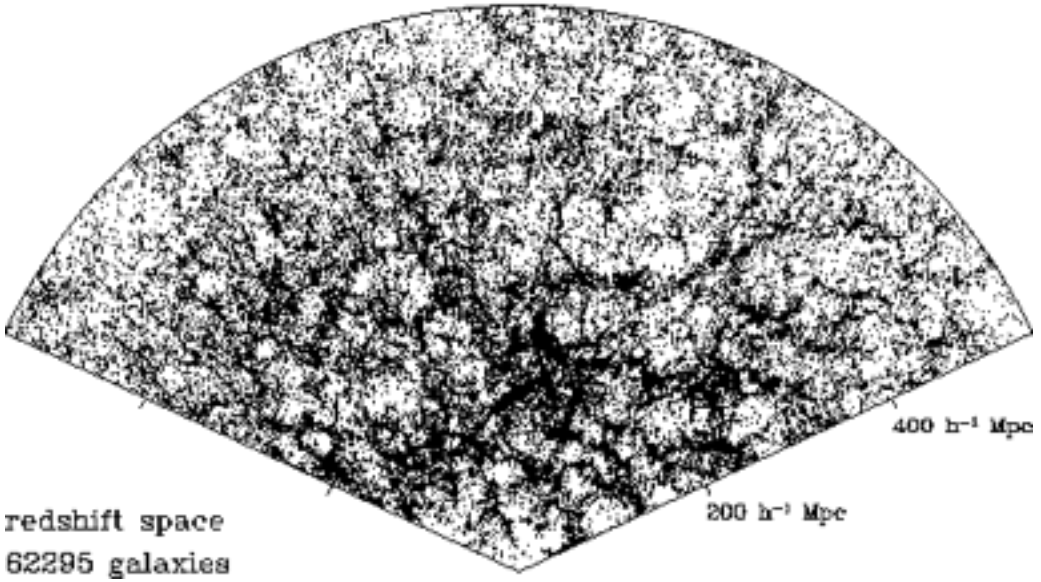
- Las simulaciones en superordenadores dan distribuciones de galaxias en buen acuerdo estadístico con los datos observacionales (!)

(crucial incluir materia oscura y energía oscura)

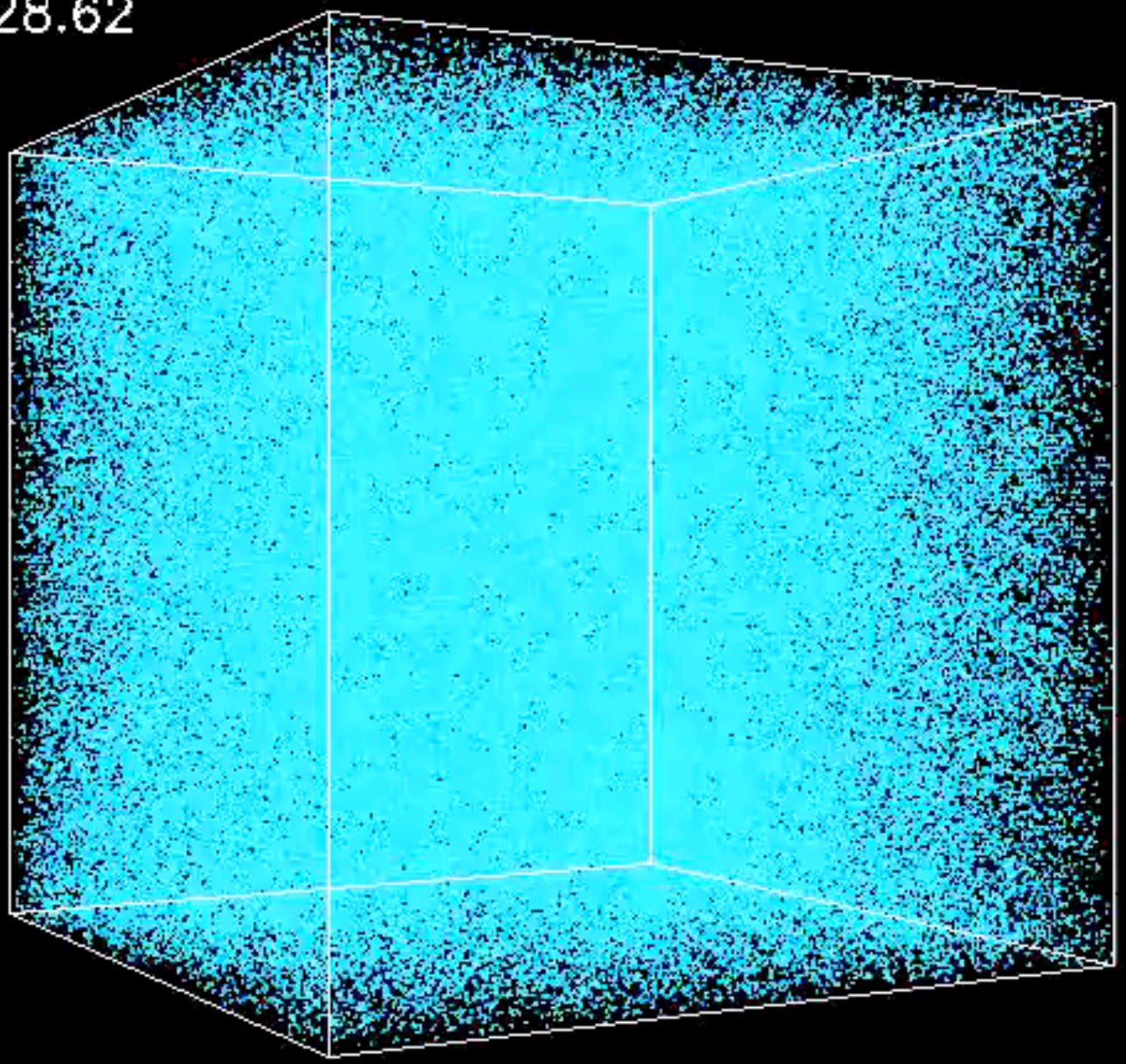




***Millenium Simulation,* 10^{10} partículas**

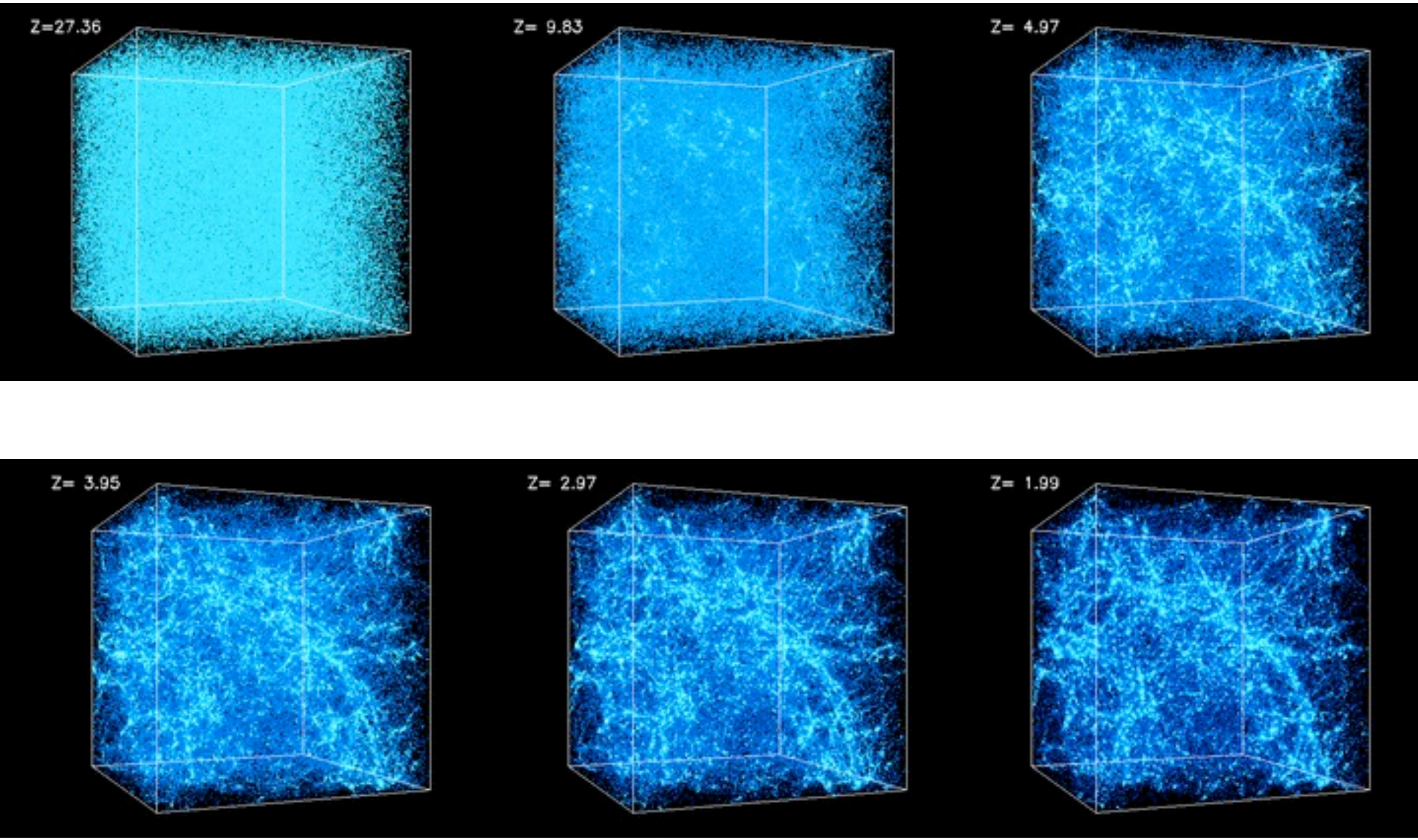


Sloan Digital Sky Survey, 2000



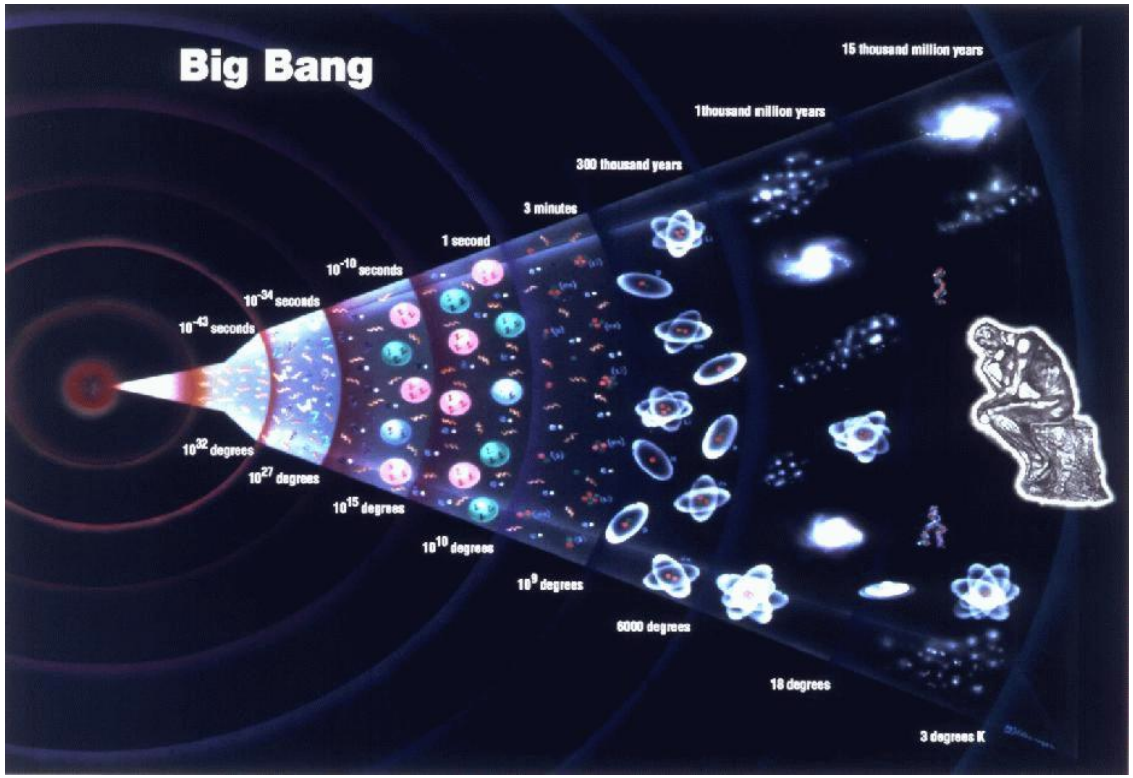
https://www.youtube.com/watch?v=8C_dnP2fvxk

Formación de estructura



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

El modelo cosmológico



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

Jornada organizada por el Instituto de Física Teórica UAM/CSIC

LA RELATIVIDAD GENERAL, 100 AÑOS DESPUÉS

Salón de Actos CSIC, c/ Serrano 117
8 de Mayo 2015

José L. Fernández Barbón (Instituto de Física Teórica UAM-CSIC)
Relatividad General para principiantes

Carlos Fernández Sopuerta (Institut de Ciències de l'Espai, CSIC)
Tests experimentales de la Relatividad General:
¿Tenía razón Einstein 100 años después?

Juan García-Bellido Capdevila (Instituto de Física Teórica UAM-CSIC)
Relatividad General y Cosmología

Antxon Alberdi Odriozola (Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC)
Astrofísica Relativista y agujeros negros: Observando lo invisible

Enrique Álvarez (Instituto de Física Teórica UAM-CSIC)
Relatividad General y Mecánica Cuántica

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC
http://workshops.ift.uam-csic.es/RG100

Jornada organizada por el Instituto de Física Teórica UAM/CSIC

LA RELATIVIDAD GENERAL, 100 AÑOS DESPUÉS

Salón de Actos CSIC, c/ Serrano 117
8 de Mayo 2015

José L. Fernández Barbón (Instituto de Física Teórica UAM-CSIC)
Relatividad General para principiantes

Carlos Fernández Sopuerta (Institut de Ciències de l'Espai, CSIC)
Tests experimentales de la Relatividad General: ¿Tenía razón Einstein 100 años después?

Juan García-Bellido Capdevila (Instituto de Física Teórica UAM-CSIC)
Relatividad General y Cosmología

Antxon Alberdi Odriozola (Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC)
Astrofísica Relativista y agujeros negros: Observando lo invisible

Enrique Álvarez (Instituto de Física Teórica UAM-CSIC)
Relatividad General y Mecánica Cuántica

THANK YOU !

PREGUNTAS