

El nacimiento de la Cosmología moderna

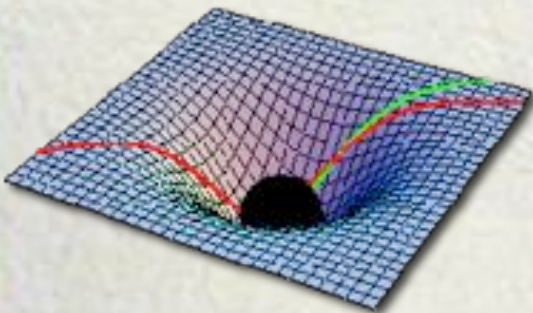


El nacimiento de la Cosmología moderna

Toda descripción moderna del Universo y su evolución parte de las llamadas ecuaciones de campo de la Relatividad General.

En el contexto de esta teoría, el espacio-tiempo es un entorno de cuatro dimensiones cuya curvatura esta determinada por la masa y la energía que contiene. Las ecuaciones de campo describen esta situación:

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \mathcal{R} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



La curvatura del espacio-tiempo esta dada por el tensor de curvatura $\mathcal{R}_{\mu\nu}$.

El llamado tensor métrico $g_{\mu\nu}$ determina distancias e intervalos temporales.

El tensor $T_{\mu\nu}$ describe el contenido de masa y energía.

La constante de gravedad es G y la velocidad de la luz es c . Λ es la llamada “constante cosmológica”.

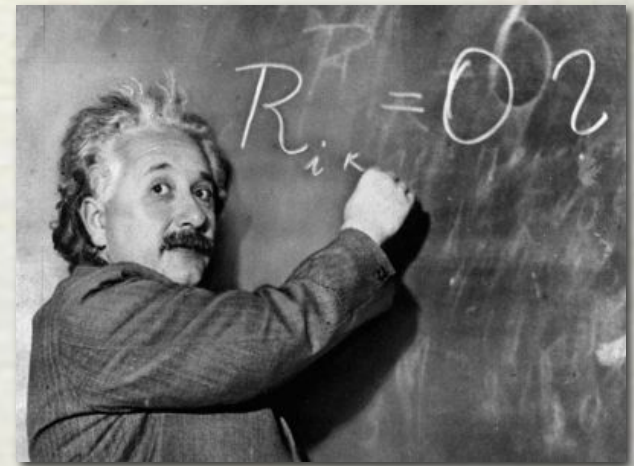
El nacimiento de la Cosmología moderna

Inmediatamente después de la publicación de su trabajo sobre la Teoría General de la Relatividad, Einstein aplicó las ecuaciones de campo a la tarea de describir el Universo como un todo.

En 1917 publicó un artículo titulado “Consideraciones Cosmológicas de la Teoría General de Relatividad”.

Al realizar este trabajo, Einstein descubrió que las ecuaciones de campo, en su forma original, no admitían como solución un Universo estático. Al igual que Newton, Einstein estaba convencido de que el Universo era estacionario e inmutable en el tiempo.

Ante esta situación Einstein modificó las ecuaciones de campo, introduciendo la llamada **constante cosmológica**, que describe una fuerza universal de repulsión que tiene la propiedad de aumentar en magnitud con la distancia.

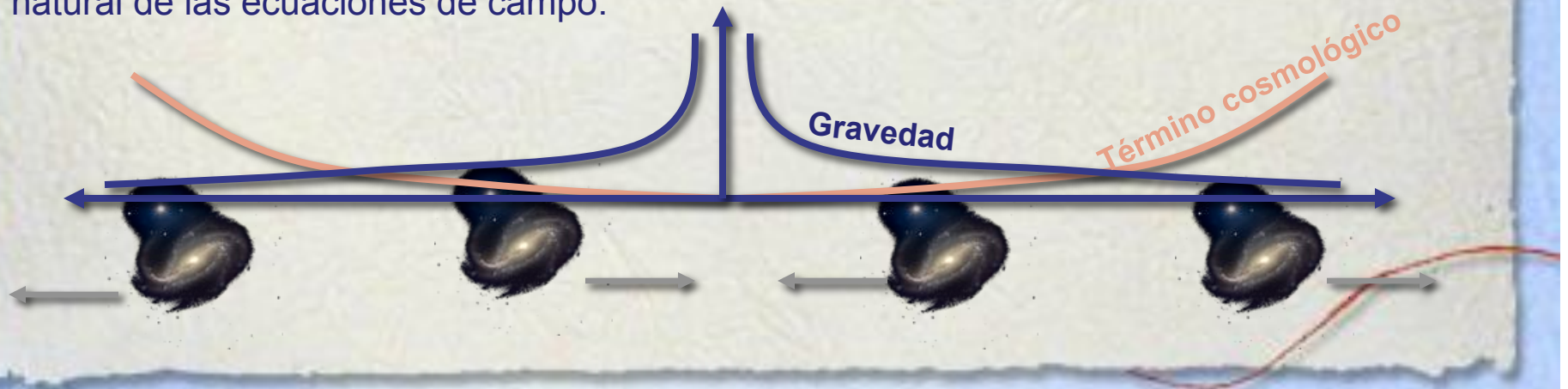


El nacimiento de la Cosmología moderna

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \mathcal{R} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

La fuerza repulsiva debida al término cosmológico, sólo afecta al Universo distante, de tal manera que la descripción del Universo en el entorno cercano no es modificada, mientras que a grandes distancias, la repulsión cosmológica se opone a la gravedad y permite obtener un Universo estacionario.

Es importante hacer notar que, aunque su introducción fue motivada por el deseo de Einstein de obtener un Universo estacionario, este término es una generalización natural de las ecuaciones de campo.



El nacimiento de la Cosmología moderna

Ajustando cuidadosamente el valor de la constante cosmológica, Einstein pudo obtener una solución que describe un Universo estático, que además resulta ser homogéneo e isotrópico.

La homogeneidad es la propiedad de que el Universo aparece igual desde cualquier punto que lo observemos.

La isotropía es la propiedad de que el Universo aparece igual en cualquier dirección que lo observemos.

Estas dos propiedades constituyen el llamado **Principio Cosmológico** y se cumplen sólo de manera estadística cuando promediamos sobre regiones muy grandes del Universo.

2MASShowcase



The Infrared Spitzer 250-hour 2.1 micron
probe covers the center of the local volume.

The Mission: All Sky North-South Survey: Infrared Processing and Analysis Center/Caltech in collaboration with NASA/JPL

El nacimiento de la Cosmología moderna

El Principio Cosmológico



Universos homogéneos
pero no isotrópicos



Universo no-homogéneo
pero isotrópico



Universo homogéneo e isotrópico

El principio cosmológico se introduce por un principio que nos dice que se debe buscar la hipótesis más sencilla que describe los resultados.

El nacimiento de la Cosmología moderna

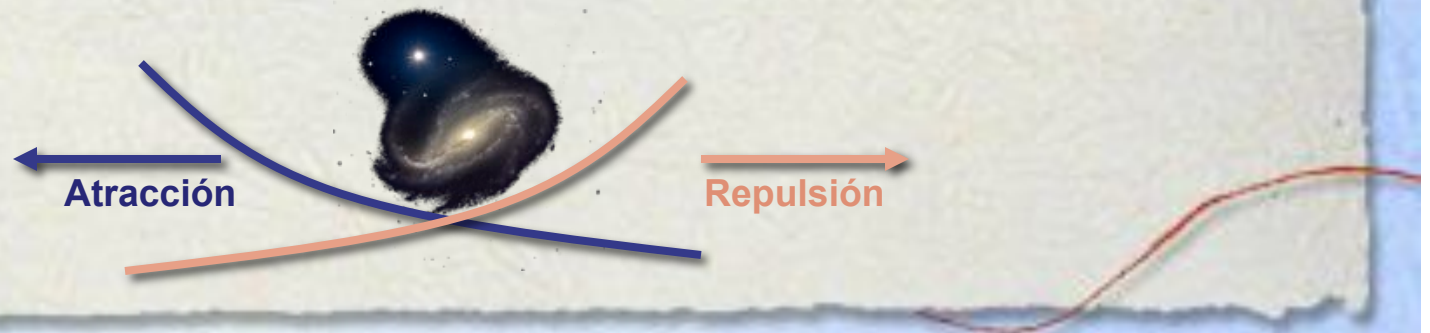
Sin embargo, el Universo estático de Einstein tiene un serio problema del que Einstein no se percató: es inestable.

Imaginemos que perturbamos este Universo haciendo la distancia entre las Galaxias ligeramente mayor; al aumentar la separación, la repulsión cosmológica, que aumenta con la distancia, dominará a la gravedad y hará que las galaxias se separen aún más, produciendo así un Universo en expansión.

Si por el contrario, imaginamos que reducimos ligeramente la distancia entre las Galaxias, la gravedad, que disminuye con la distancia, dominará y hará que las galaxias se acerquen aún más, produciendo un Universo en contracción.

Así pues, la única solución estacionaria de las ecuaciones de campo resulta ser inestable.

Este resultado implica que debemos renunciar a la noción de un Universo estático.



El nacimiento de la Cosmología moderna

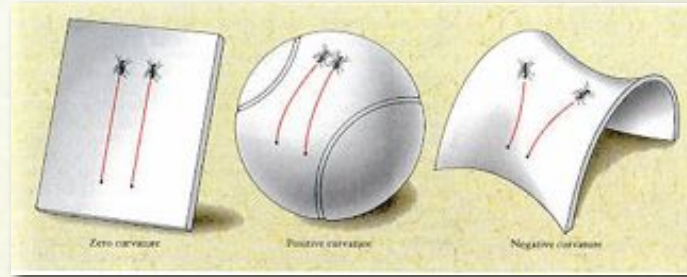
Entre 1922 y 1924 apareció en una revista científica alemana el trabajo de *Alexander Friedmann*, un meteorólogo y matemático Ruso poco conocido. Friedmann renunció desde un principio a la idea de un Universo estacionario, sin embargo, retuvo las condiciones de homogeneidad e isotropía del Universo.

Con estas condiciones Friedmann descubrió que las ecuaciones de campo se reducían a un sistema más simple, que en el caso en que no incluimos el término cosmológico, sólo admiten dos tipos de soluciones.



A, Friedmann (1888-1925)

El nacimiento de la Cosmología moderna



La primera familia de soluciones describe un Universo inicialmente en expansión, pero en el que la fuerza de gravedad eventualmente detiene dicha expansión para producir un colapso posterior y regresar a un estado singular de densidad infinita.

Este tipo de Universos tiene una curvatura positiva, análoga a la que presenta en dos dimensiones la superficie de una esfera. **El Universo es finito mas no tiene frontera.**

La segunda familia de Universos presenta una curvatura negativa, análoga a la que presenta una silla de montar. En este caso el Universo se expande para siempre, **no tiene frontera y puede ser finito o infinito.**

Existe una tercera solución que Friedmann no consideró pero que es fácil de obtener como el caso intermedio entre las dos familias anteriores. Aunque el Universo se expande para siempre, **la curvatura es nula.**

El nacimiento de la Cosmología moderna

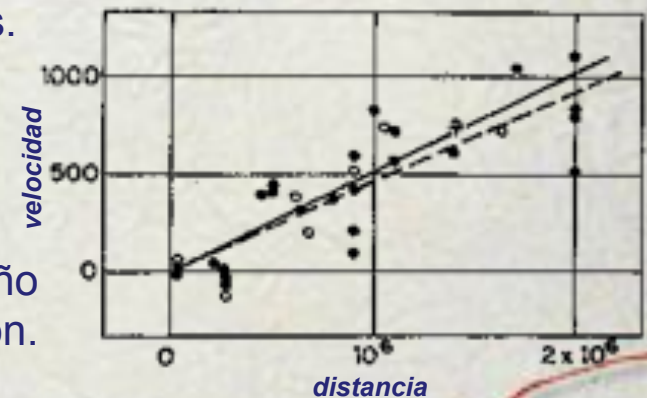
Independientemente de estos esfuerzos teóricos por describir el Universo, *Vesto M. Slipher* estaba midiendo, por medio del efecto Doppler, la velocidad a lo largo de la línea de visión de varias galaxias. Para 1917 ya había acumulado mediciones para 15 galaxias y todas mostraban que se alejaban de nosotros.

En 1929, el astrónomo norteamericano *Edwin Hubble* publicó un diagrama que mostraba distancias y velocidades de un grupo de galaxias. En todos los casos, excepto dos, las galaxias se alejan de nosotros. Además, la velocidad con que se alejan aumenta linealmente con la distancia.

1929 es probablemente uno de los años más importantes en la Cosmología moderna, pues fue el año en que se descubrió que el Universo está en expansión.



E. Hubble (1899-1953)



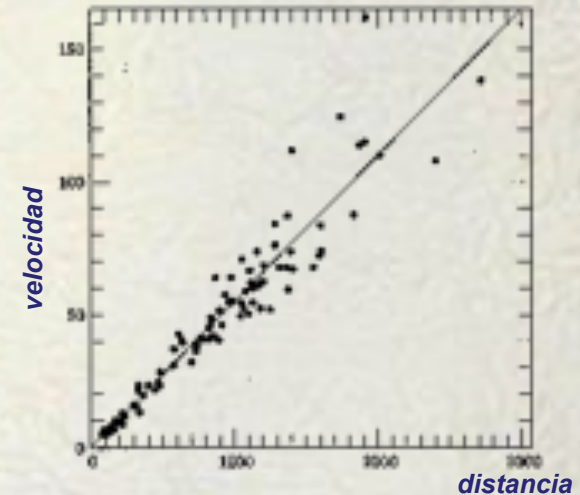
El nacimiento de la Cosmología moderna

El descubrimiento de Hubble ha sido confirmado. El diagrama de la derecha muestra distancias mil veces mayores que el diagrama original de Hubble y la relación lineal entre distancia y velocidad de recesión se mantiene, aunque la dispersión aumenta con la distancia debido a los errores de medición.

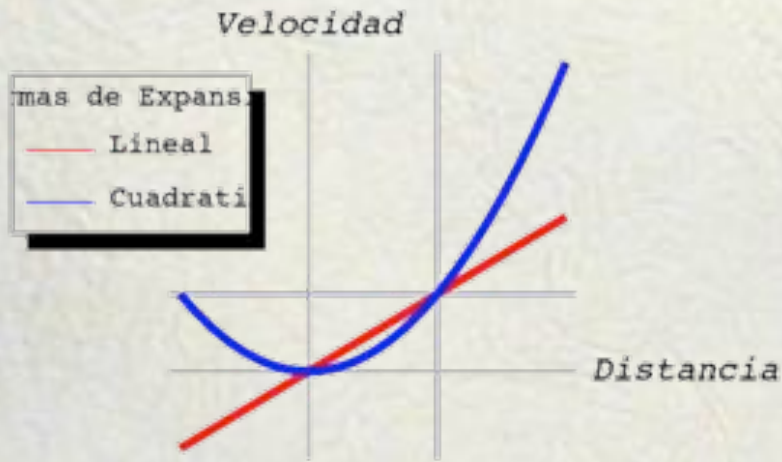
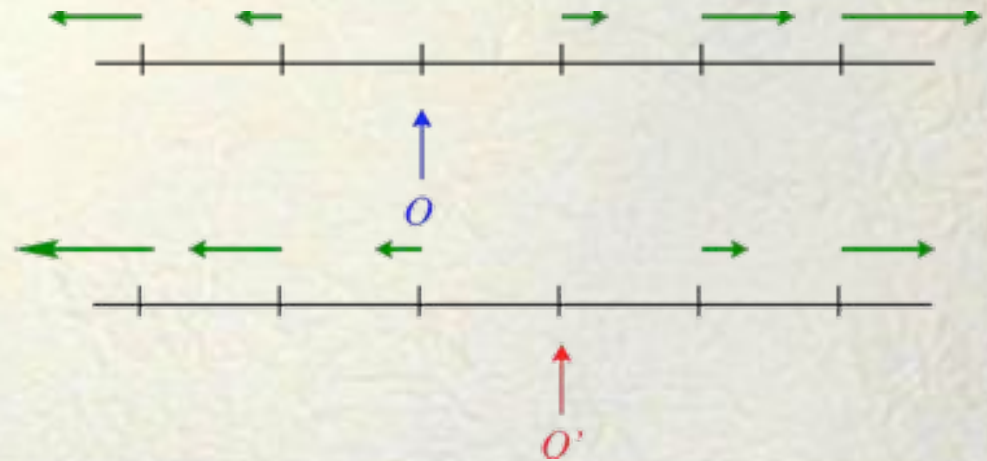
$$v = Hr$$

A la constante de proporcionalidad se le conoce como *constante de Hubble*. Es importante resaltar que ésta es una constante espacial, mas no temporal, pues a medida que el Universo se expande, el valor de H cambia. El valor de esta constante es de alrededor de 22 km/s por cada millón de años-luz.

El descubrimiento de la expansión del Universo terminó por completo los intentos de Einstein y otras personas, por obtener soluciones estáticas del Universo. Se dice que al enterarse del descubrimiento de Hubble, Einstein dijo que la introducción del término cosmológico fue el error más grande de su vida.



El nacimiento de la Cosmología moderna



El hecho de que la expansión sea lineal es de gran importancia, ya que garantiza un Universo homogéneo, donde no existe un lugar preferencial, acorde con los modelos de Friedmann.

El nacimiento de la Cosmología moderna

Ante el descubrimiento de Hubble, los modelos de Friedmann pasaron a ocupar un papel central en la Cosmología moderna. Lamentablemente, la muerte prematura de Friedmann impidió que conociera del descubrimiento de Hubble y la reivindicación de sus modelos. De hecho, al publicarse los trabajos de Hubble, los modelos de Friedmann habían sido olvidados y fueron redescubiertos por un sacerdote Jesuita Belga: *George Lemaître*.



G. Lemaître (1894-1966))

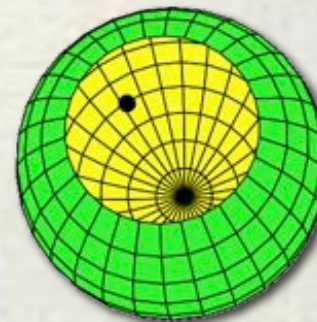
Los modelos de Friedmann-Lemaître

Aunque los modelos de Friedmann y Lemaître se obtienen a partir de las ecuaciones de campo de Einstein, es posible obtener muchas de sus propiedades a partir de un tratamiento puramente clásico. Esto es posible gracias al llamado **Teorema de Birkhoff**.

Este resultado de la Teoría General de Relatividad fue obtenido por *George Birkhoff* en 1923, es equivalente a los teoremas de Newton de la gravedad:

•**Teorema I:** Un cascarón esférico no ejerce fuerza alguna sobre puntos en su interior.

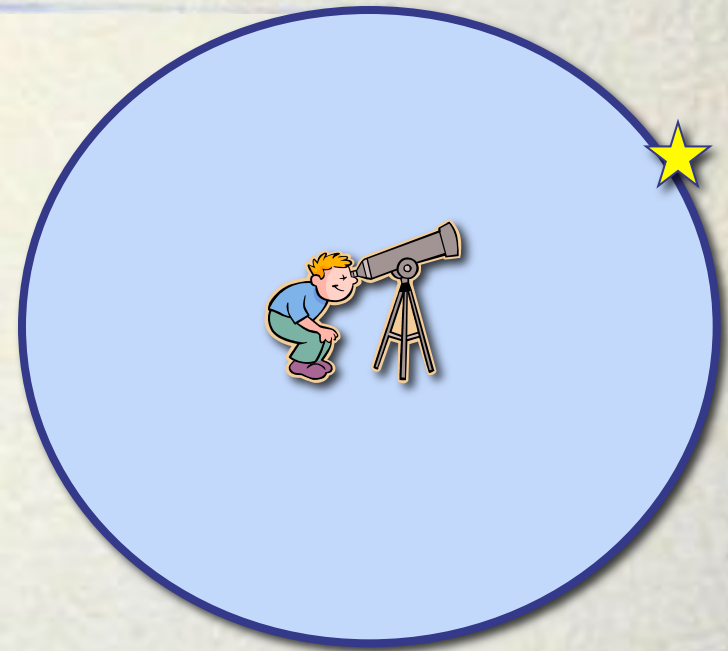
•**Teorema II:** Un cascarón esférico ejerce una fuerza sobre puntos en su exterior, como si fuese una masa puntual en su centro geométrico de masa igual a la del cascarón.



G. Birkhoff (1884-1944)

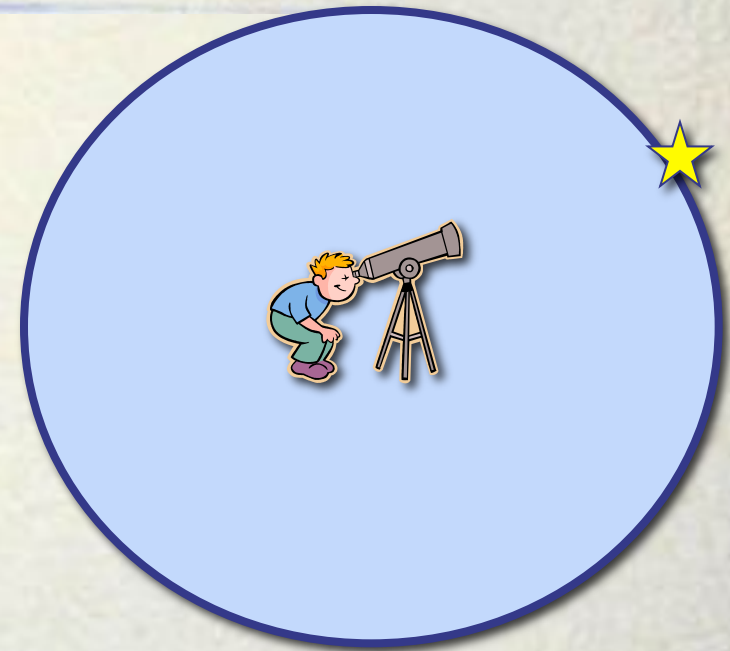
Los modelos de Friedmann-Lemaître

El Teorema de Birkhoff nos dice que para describir el movimiento relativo de un punto con respecto a un observador en los modelos de Friedmann y Lemaître, basta considerar la masa contenida en una esfera centrada en el observador y en cuya superficie esta el punto en cuestión, pudiendo despreciar el resto del Universo.



Los modelos de Friedmann-Lemaître

Pudiera parecer que este resultado introduce un punto especial en la descripción del Universo, sin embargo, recordemos que en estos modelos cualquier punto es equivalente a otro. Es sólo la descripción del movimiento relativo entre nosotros y el punto en cuestión que depende de la masa contenida en la esfera.



El hecho de que un resultado equivalente a los Teoremas de Newton exista en Relatividad General es sorprendente, debido a la diferencia enorme entre ambas teorías.

Los modelos de Friedmann-Lemaître

Para nosotros es afortunado la existencia del Teorema de Birkhoff, pues nos permite hacer la siguiente derivación de las ecuaciones que describen los modelos de Friedmann-Lemaître.

Consideremos una galaxia de masa m situada a una distancia r de nosotros en un universo de densidad constante ρ . La fuerza F ejercida sobre la galaxia esta dada por:

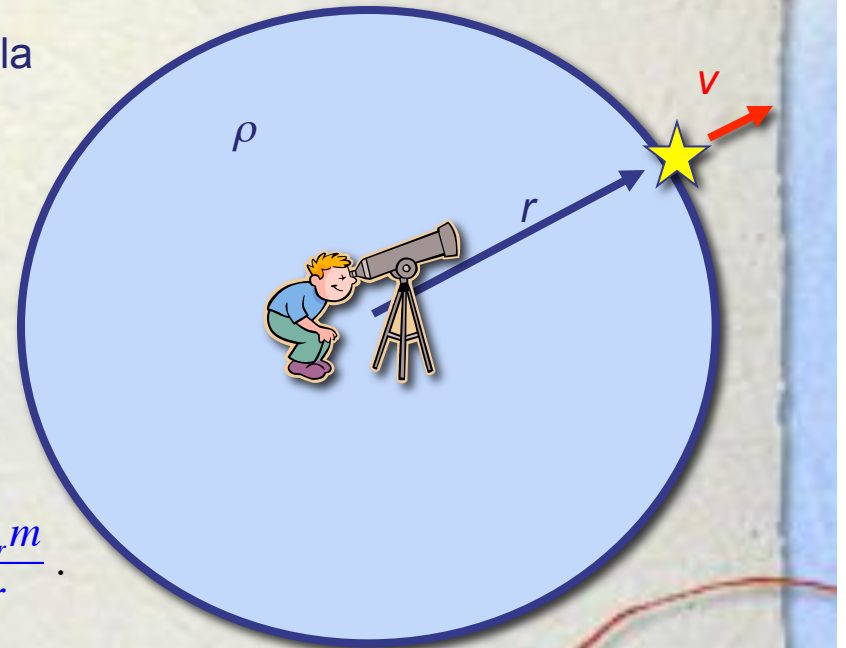
$$F = -G \frac{M_r m}{r^2}$$

Donde M_r es la masa contenida dentro de la esfera de radio r . Esta puede ser expresada como:

$$M_r = (4 / 3)\pi r^3 \rho$$

Las energías cinética y potencial están dadas por:

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} m v^2, \quad E_{\text{pot}} = -G \frac{M_r m}{r}.$$



Los modelos de Friedmann-Lemaître

La energía total es entonces:

$$\begin{aligned} E_{\text{tot}} &= \frac{1}{2}mv^2 - G\frac{M_r m}{r} \\ &= \frac{1}{2}m(Hr)^2 - \frac{Gm}{r}\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho\right) \\ &= \frac{1}{2}mr^2 \left[H^2 - \frac{8\pi}{3}G\rho \right] \end{aligned}$$

Aquí hemos usado la ley de expansión lineal de Hubble:
 $v = Hr$.

Si la energía total es positiva, la galaxia se alejará para siempre de nosotros, esto corresponde al modelo de curvatura negativa de Friedmann; por el contrario, si la energía total es negativa, la galaxia caerá finalmente sobre nosotros, esto corresponde al modelos de curvatura positiva.

Veamos cual es el valor crítico ρ_c que corresponde al caso intermedio. Haciendo $E_{\text{tot}}=0$ en la última expresión, obtenemos:

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

Usando los valores de G y H obtenemos el valor de la densidad crítica:
 $\rho_c = (9-10) \times 10^{-27} \text{kg/m}^3$. Esto equivale a la masa de alrededor de 6 átomos de hidrógeno por metro cúbico.

Los modelos de Friedmann-Lemaître

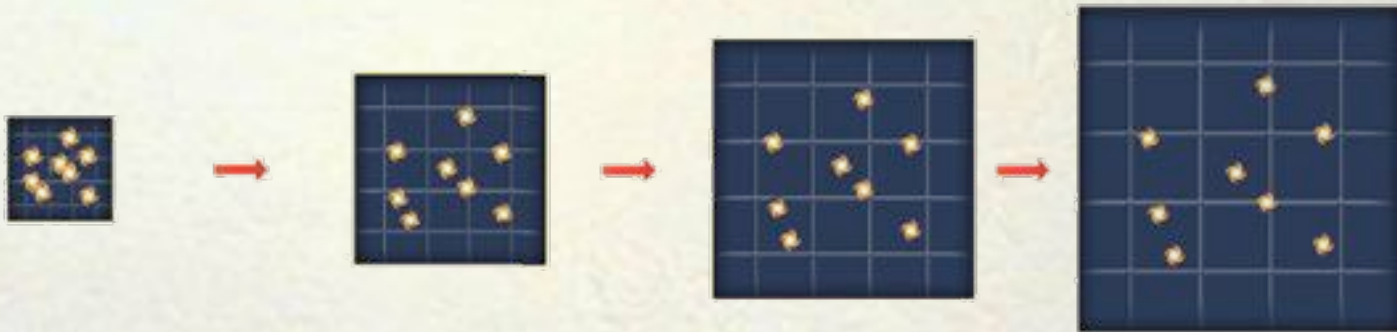
Por lo anterior, los cosmólogos definen el llamado parámetro de densidad del Universo como:

$$\Omega \equiv \rho / \rho_c$$

Universos de Friedmann-Lemaître

	Abierto	Euclidiano	Cerrado
Curvatura	-	0	+
Densidad	$\rho < \rho_c$	$\rho = \rho_c$	$\rho > \rho_c$
Parámetro de densidad	$\Omega < 1$	$\Omega = 1$	$\Omega > 1$

Los modelos de Friedmann-Lemaître



Una consecuencia importante del Principio Cosmológico es que el Universo se expande de forma tal que las distancias relativas entre objetos, así como su orientación espacial no cambian.

Esto hace natural el introducir los conceptos de *distancia en co-movimiento* s y el *factor de escala del Universo* R .

$$r(t) = R(t)s$$

Los modelos de Friedmann-Lemaître

Esto es similar al uso de mapas a escala para representar una ciudad.

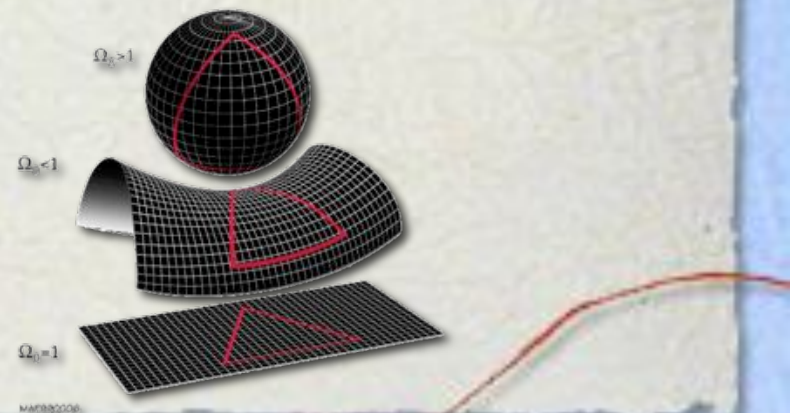


Los modelos de Friedmann-Lemaître

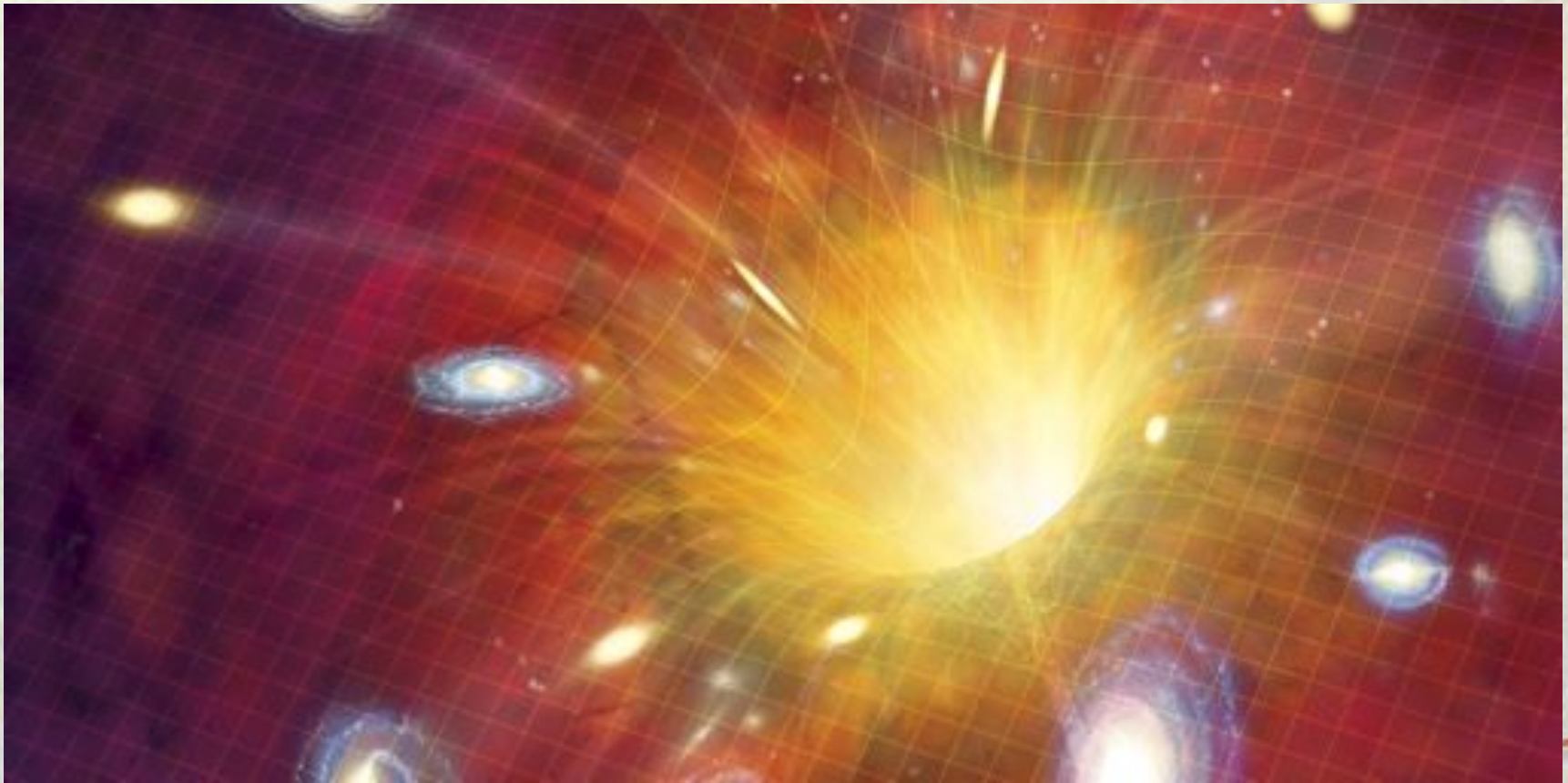
Las ecuaciones de Friedmann-Lemaître describen la evolución temporal del factor de escala del Universo:

$$\left[\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \right]^2 = \frac{8\pi}{3} G \rho(t) - \frac{kc^2}{R^2(t)}, \quad \frac{d^2 R(t)}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3c^2} (u + 3p) R(t)$$

k es la constante de curvatura y su valor define la familia de soluciones: $k=-1$, describe los Universos abiertos de curvatura negativa y expansión infinita que se obtienen cuando la densidad media del Universo es menor que ρ_c . $k=1$ corresponde a Universos cerrados de curvatura positiva que acaban en contracción y cuya densidad media es mayor a ρ_c . Finalmente, $k=0$ es el caso crítico sin curvatura. u y p son la densidad de masa-energía y la presión del Universo, respectivamente.



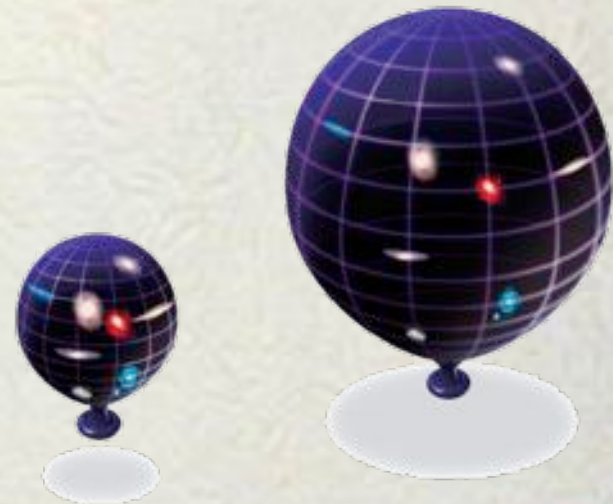
El Modelo de la Gran Explosión



El Modelo de la Gran Explosión



Científicos tratando de describir la gran explosión



El modelo de la Gran Explosión



Si vamos para atrás en el tiempo, todos los modelos de Friedmann-Lemaître parten de un instante de densidad infinita: *la singularidad inicial*, a partir de la cual se expande el Universo.

¿Qué es esta singularidad inicial?

Contrariamente a lo que piensa la mayoría de la gente, **no es una explosión**, ya que:

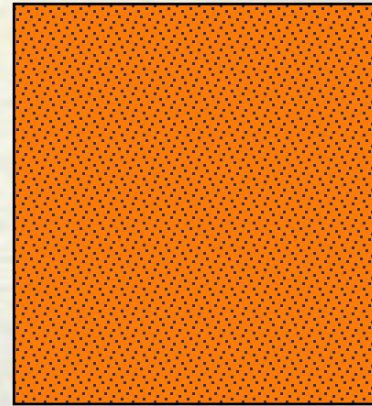
- No ocurre en un punto.
- Una gran temperatura inicial no es necesaria, de hecho, se opone a la expansión.

El modelo de la Gran Explosión

¿No ocurre en un punto?



Explosión



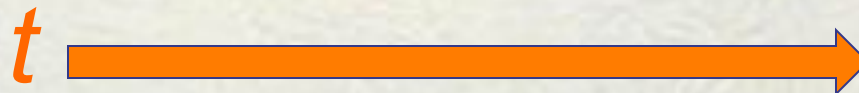
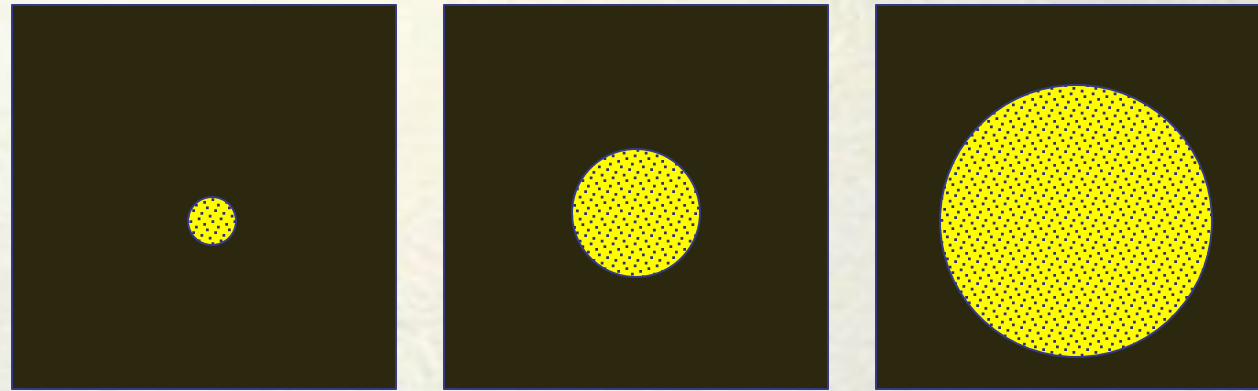
Universo temprano

Una explosión ocurre en un lugar del espacio y se expande hacia el resto del espacio inicialmente vacío.

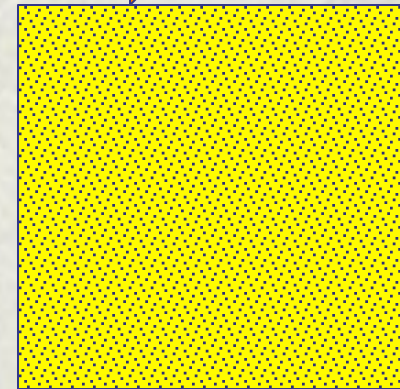
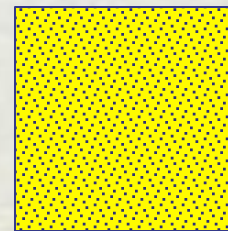
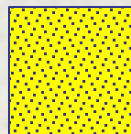
La “gran explosión” del Universo ocurre en todo el espacio y se expande al expandirse el espacio, no se expande sobre espacio que estaba vacío.

El modelo de la Gran Explosión

Explosión



Gran
Explosión



El modelo de la Gran Explosión

Una gran temperatura inicial no es necesaria, de hecho, ¡se opone a la expansión!



Una explosión produce una onda expansiva que es propulsada por la liberación repentina de una gran cantidad de energía. En el caso de el modelo cosmológico de la “Gran Explosión”, aunque en el Universo temprano hay una gran cantidad de energía, no es ésta la que impulsa la expansión del Universo.

El modelo de la Gran Explosión

Una gran temperatura inicial no es necesaria, de hecho, ¡se opone a la expansión!



De hecho, de acuerdo a Einstein, la energía es equivalente a masa, y la masa produce atracción gravitacional, por lo que de hecho, la energía del Universo temprano, ¡se opone a la expansión!

El modelo de la Gran Explosión

¿Entonces por qué se llama la Teoría de la Gran Explosión?

El astrónomo Inglés, Fred Hoyle le llamó “la teoría de la gran explosión” a los modelos de Friedmann y Lemaitre, pero en tono despectivo, pues él apoyaba una teoría cosmológica alternativa.



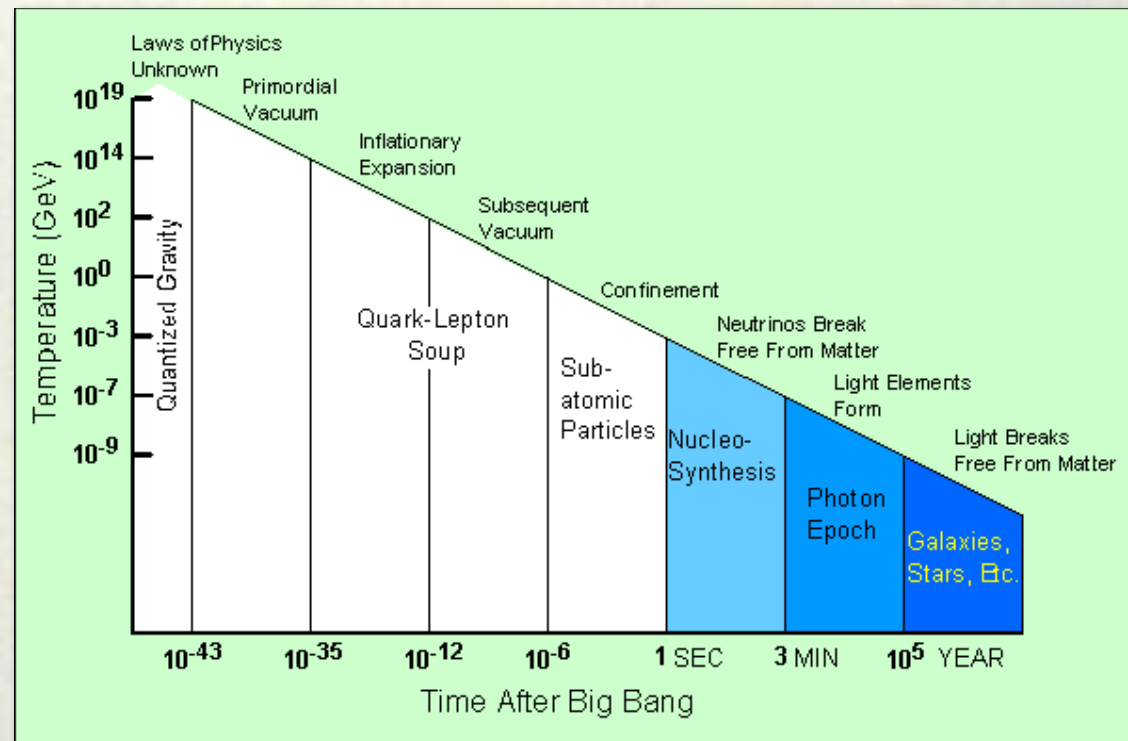
Fred Hoyle (1915-2001)

¿Cómo podemos saber si el modelo de la Gran Explosión describe correctamente nuestro Universo?

El modelo de la Gran Explosión

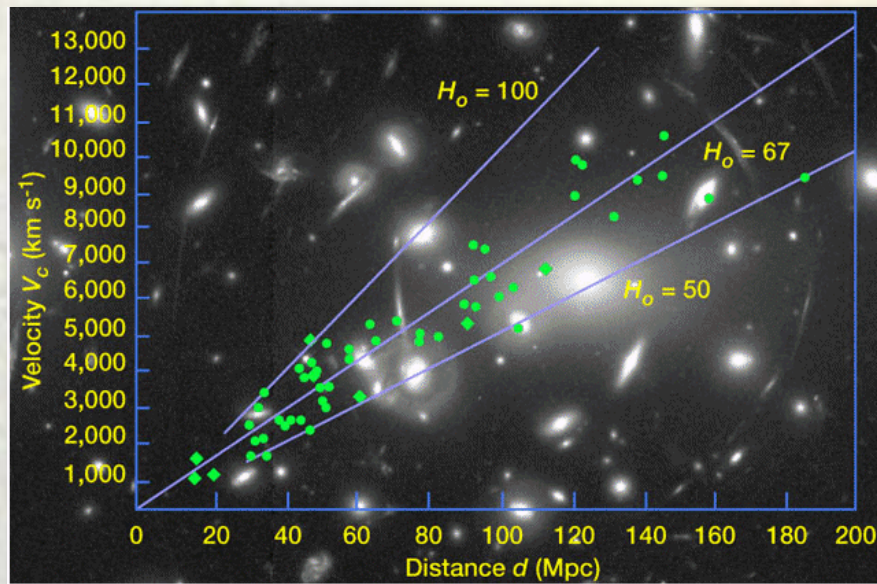
Tres consecuencias:

- Expansión del Universo
- Radiación Cómica de fondo
- Nucleosíntesis



El modelo de la Gran Explosión

Expansión del Universo



La expansión del Universo se observa y sigue una relación lineal con la distancia



El modelo de la Gran Explosión

Radiación cósmica de fondo

El Universo temprano era un entorno de una densidad y temperatura mucho mayores que el Universo actual.



Al expandirse el Universo, la temperatura del Universo decrece, pero aún en el presente, debe quedar una radiación residual que aunque muy fría, debe llenar todo el Universo de manera homogénea e isotrópica.

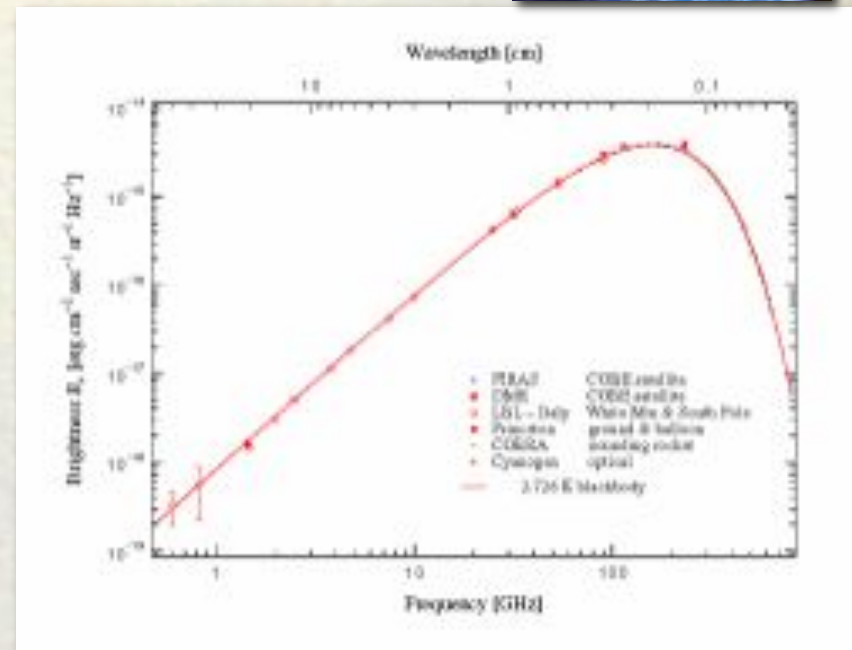
El modelo de la Gran Explosión

Radiación cósmica de fondo

En 1964, la radiación residual de la Gran Explosión fue detectada por primera vez.



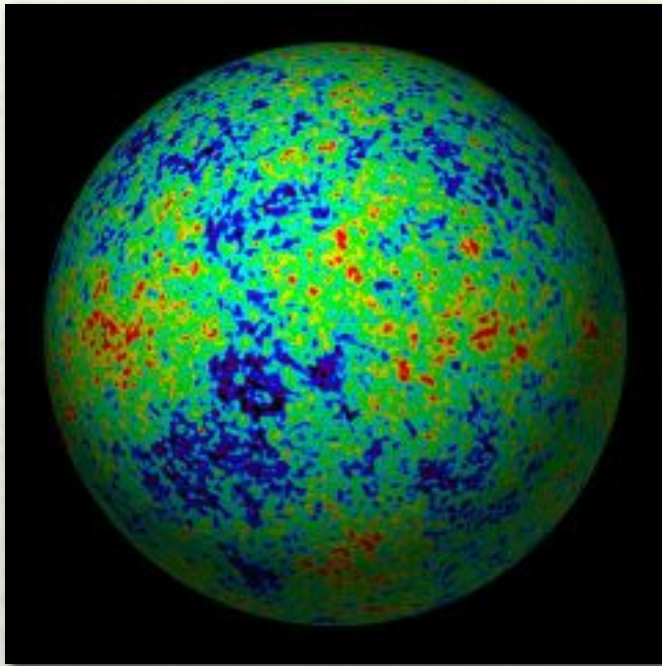
Robert Wilson (1936 -) y Arno Penzias (1933 -)



Espectro de la radiación cósmica de fondo

El modelo de la Gran Explosión

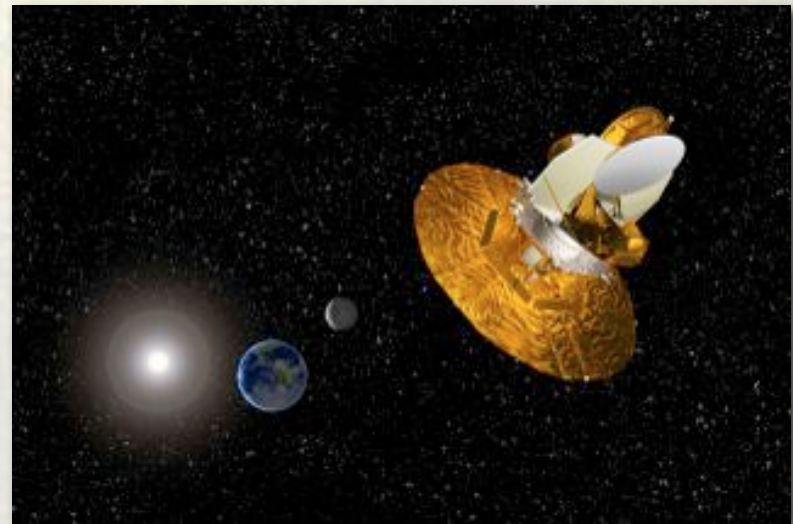
Radiación cósmica de fondo



Mapa de la radiación cósmica de fondo
Sobre todo el cielo producido por el satélite
WMAP. Los colores indican temperatura.

¡Existen fluctuaciones de temperatura!

$$(\delta T / T) = 0.00001$$



Satélite WMAP

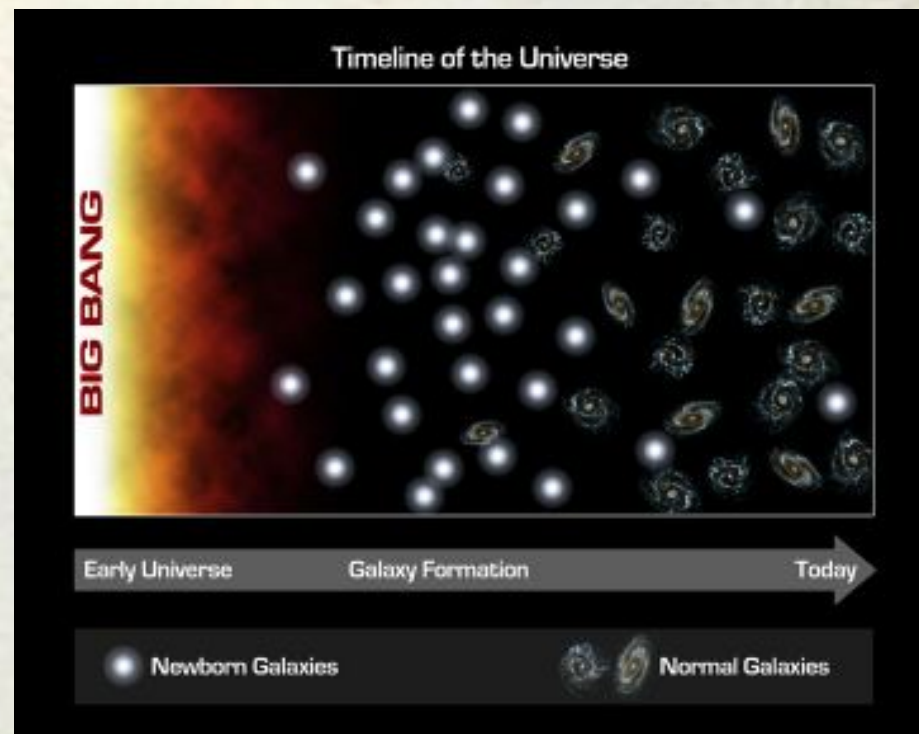
El modelo de la Gran Explosión

Radiación cósmica de fondo

¡Existen fluctuaciones de temperatura!

$$(\delta T / T) = 0.00001$$

Esto de que haya fluctuaciones es bueno, pues necesitamos las fluctuaciones para que actúen como “semillas” para la formación de galaxias y estrellas.

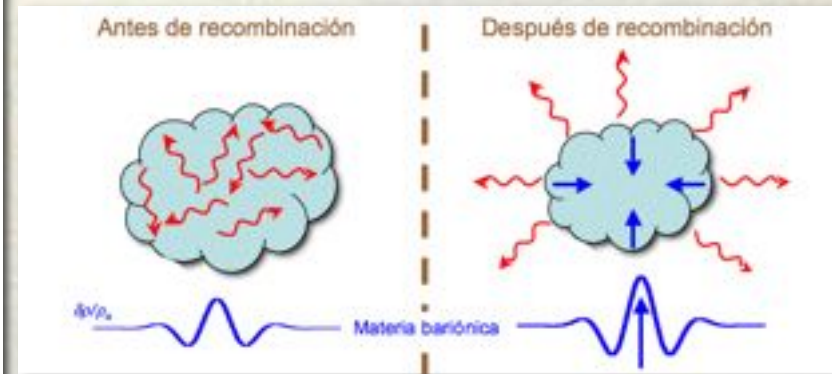


Sin embargo, hay un pequeño problema



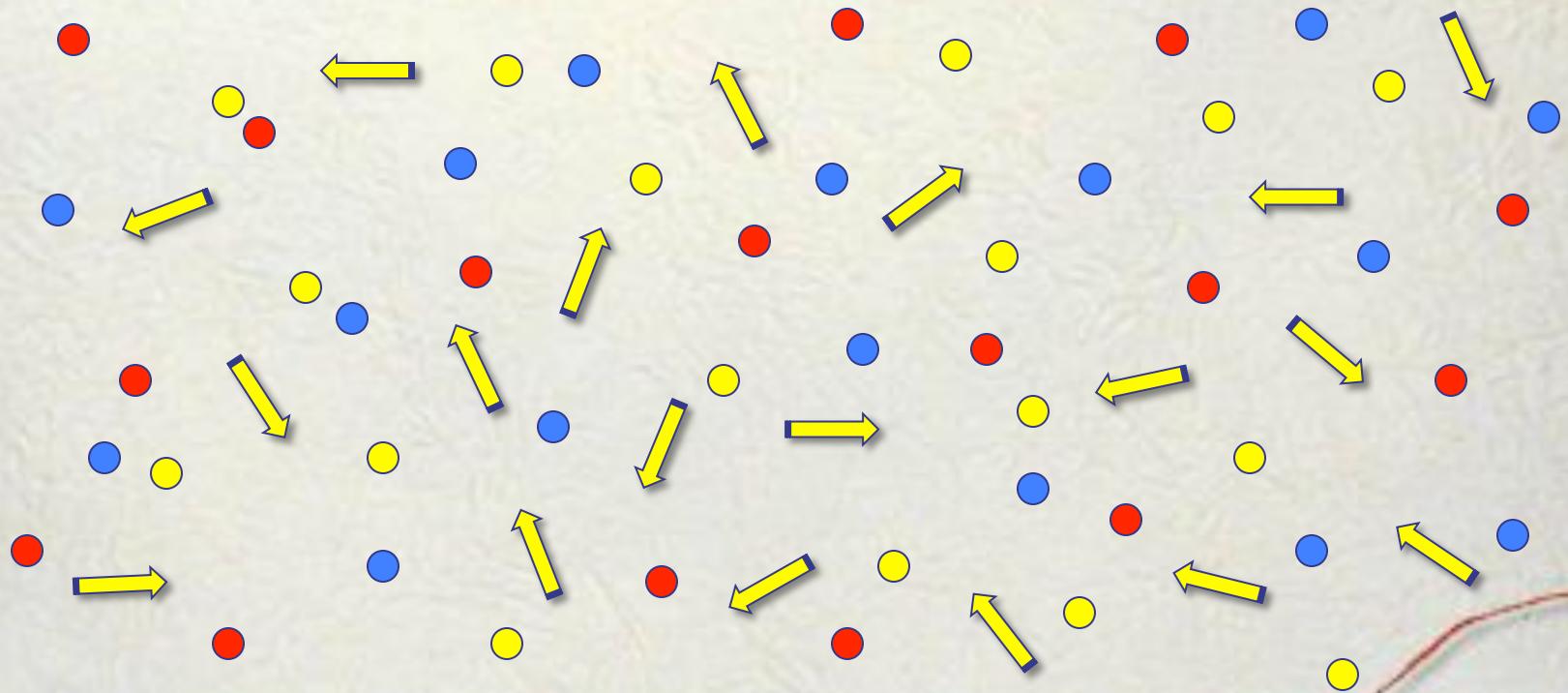
El modelo de la Gran Explosión

¡Para formar galaxias necesitamos $(\delta T/T) = 0.001!$



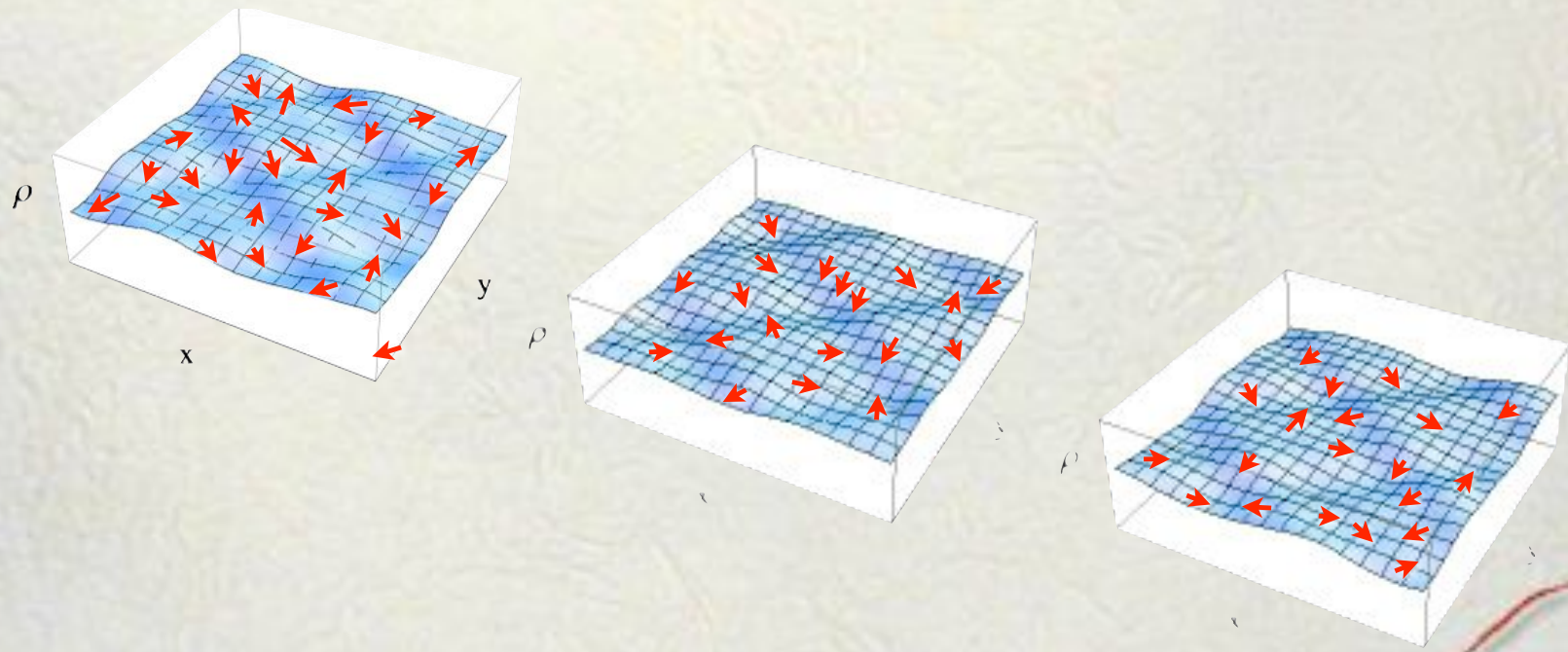
El modelo de la Gran Explosión

Cuando el Universo estaba muy caliente ($T > 10,000 \text{ }^\circ\text{K}$), no existían átomos. Solo electrones, protones y neutrones libres. Sin embargo, los electrones libres interactúan mucho con los fotones de luz.



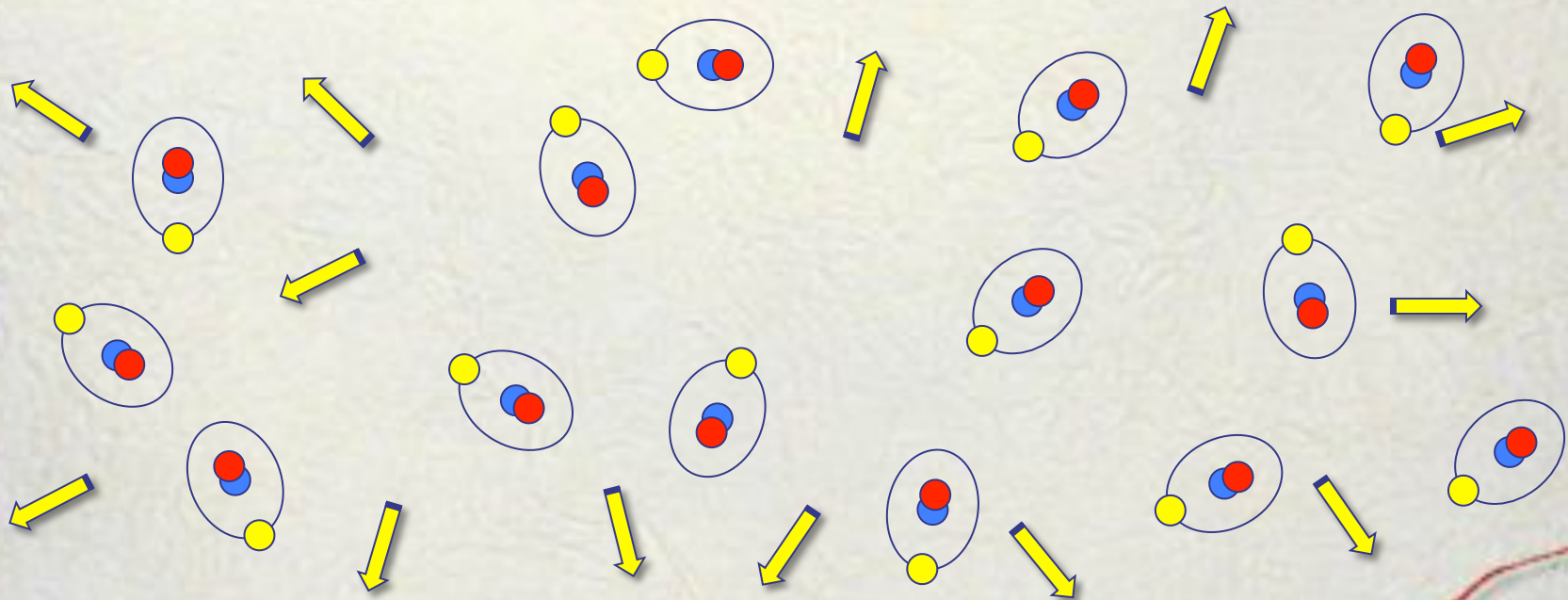
El modelo de la Gran Explosión

Esto quiere decir que el Universo era muy opaco y la materia no podía colapsarse bajo la acción de su propia gravedad, pues la presión térmica de la radiación se lo impedía. Solo había fluctuaciones acústicas.



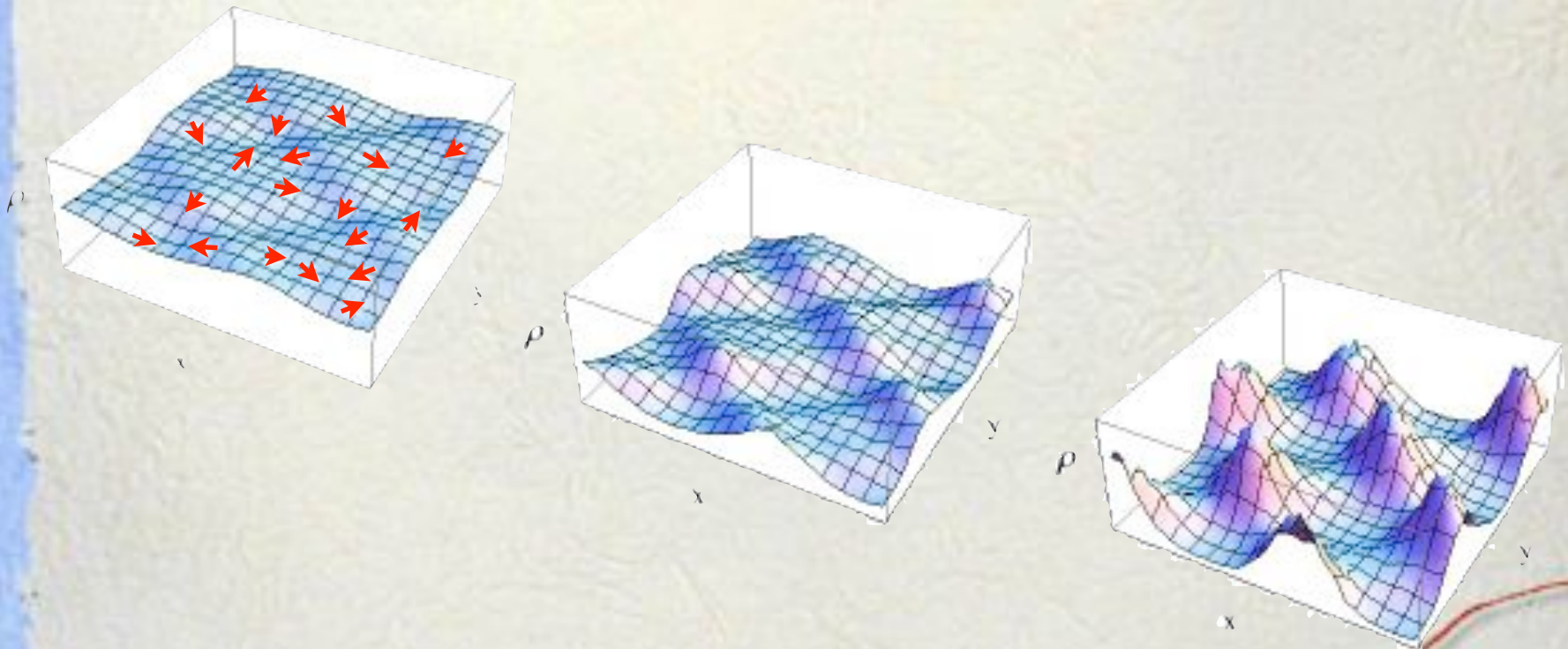
El modelo de la Gran Explosión

Pero al enfriarse el Universo por debajo de los 10,000 °K, los electrones se pueden recombinar con los protones y neutrones para formar átomos. Los átomos, al ser eléctricamente neutros, casi no interactúan con la luz y el Universo ¡se vuelve de pronto transparente!



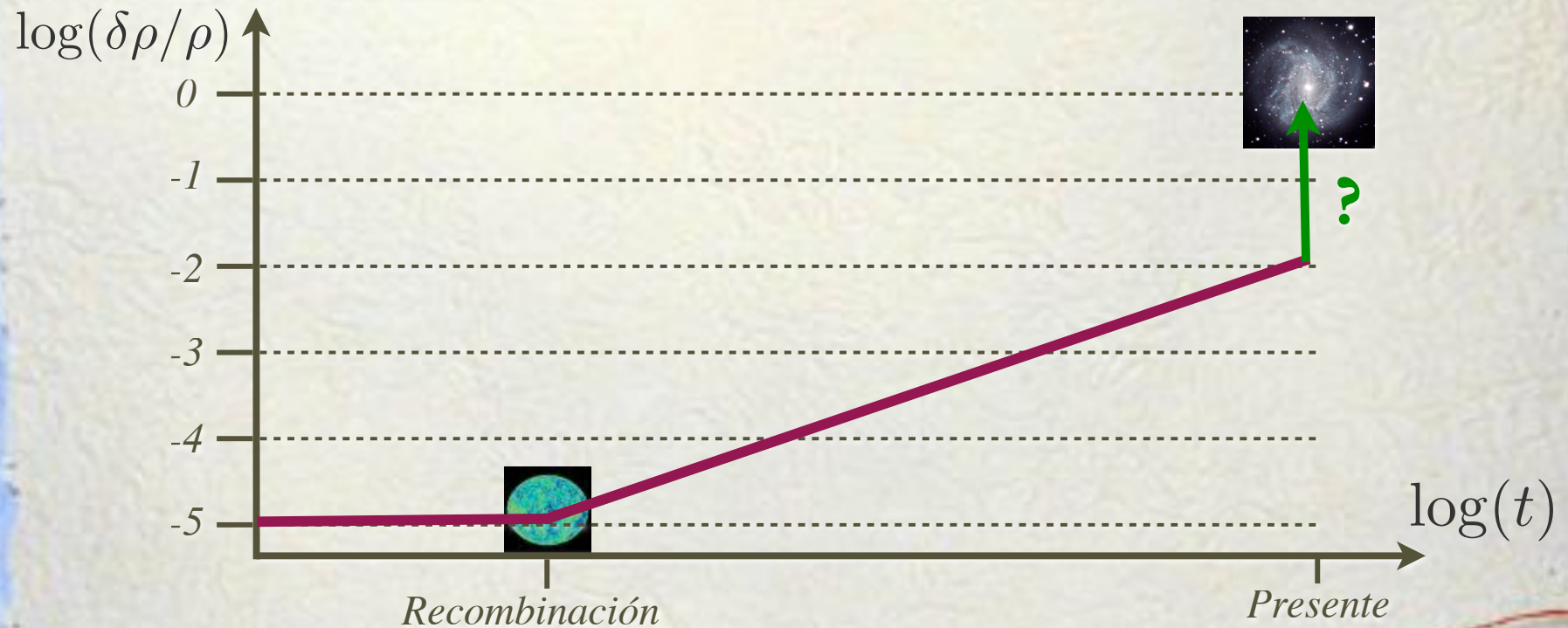
El modelo de la Gran Explosión

Al ya no sentir la presión térmica de la radiación, la materia puede ahora colapsarse hacia los máximos de densidad bajo la acción de su propia gravedad.

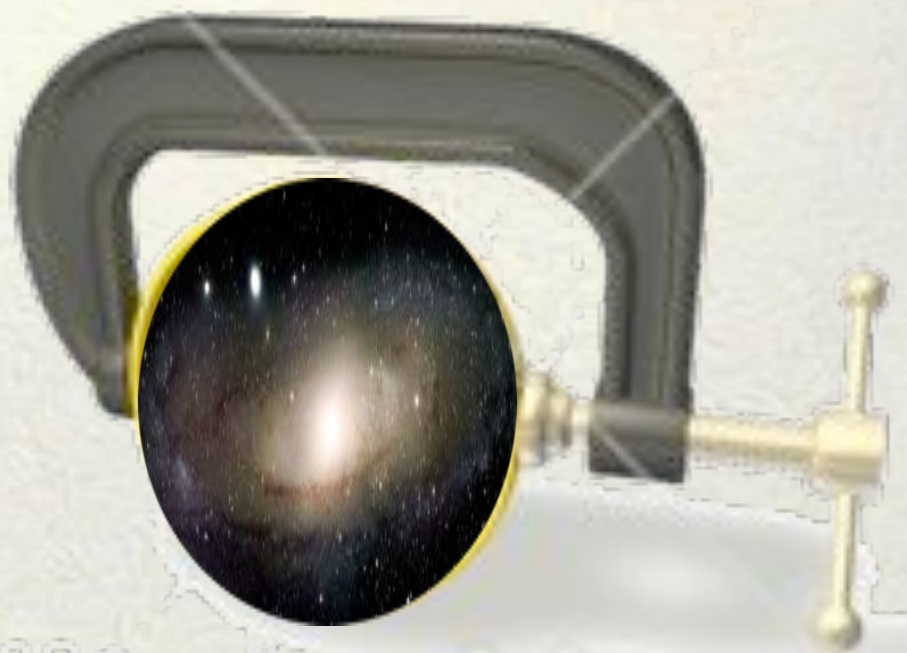


El modelo de la Gran Explosión

¡Pero para formar galaxias necesitamos $(\delta T/T) = 0.001$
al momento de la recombinación!

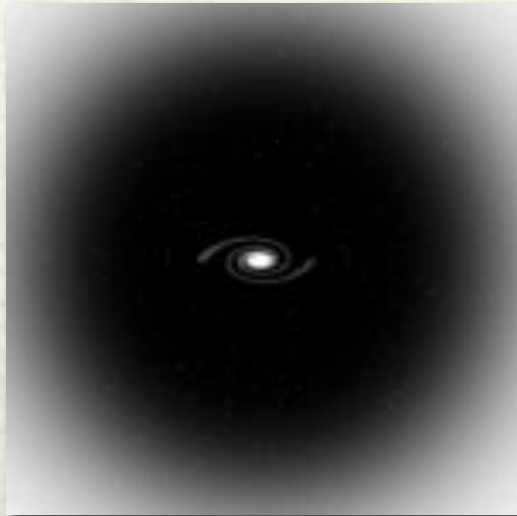


**Necesitamos algo que ayude a la
gravedad**

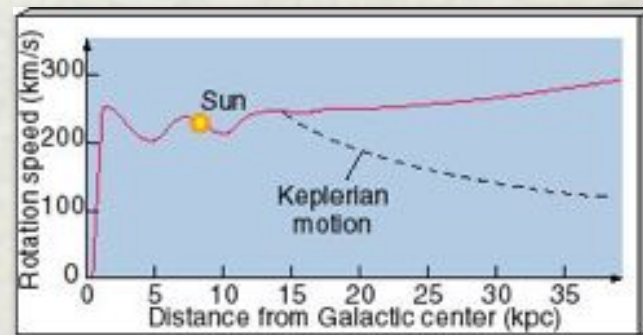


El modelo de la Gran Explosión

La Materia Oscura



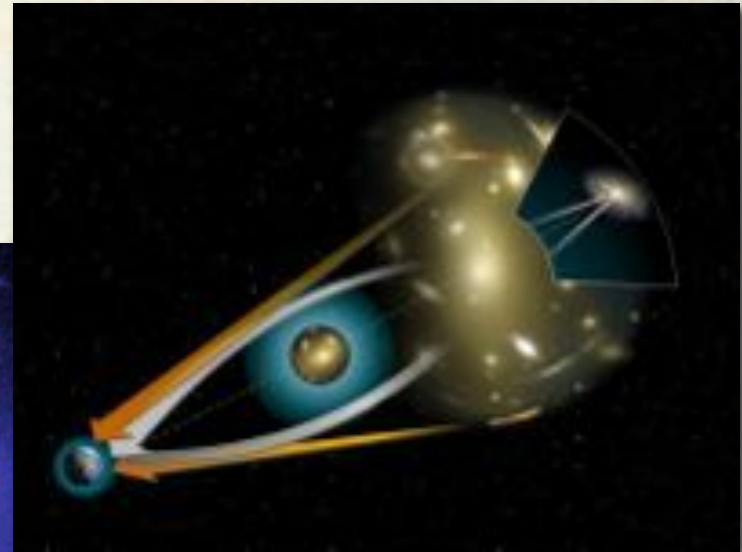
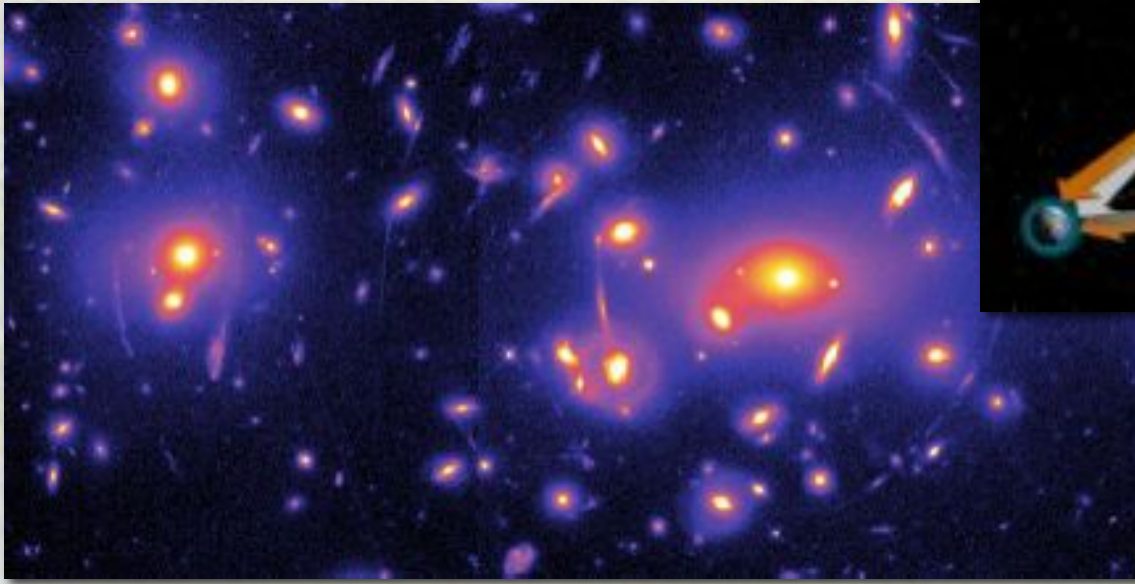
De la rotación de las galaxias, sabemos que debe haber más materia de la que podemos ver.



El modelo de la Gran Explosión

La Materia Oscura

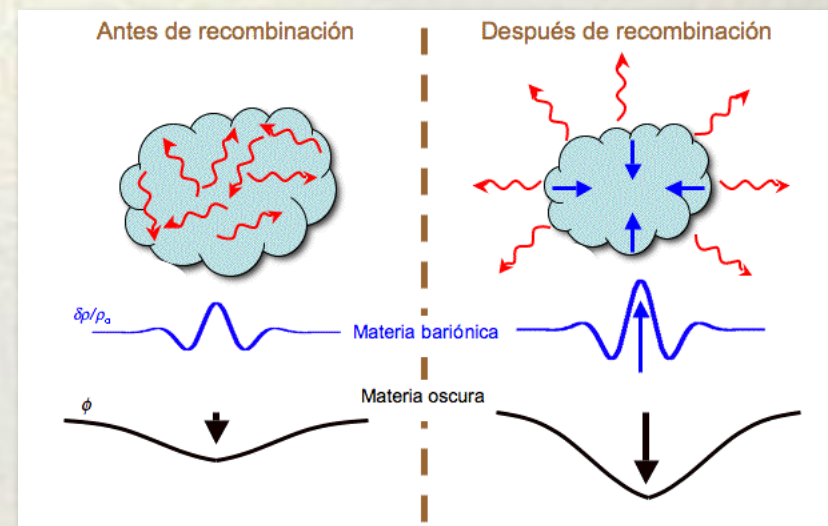
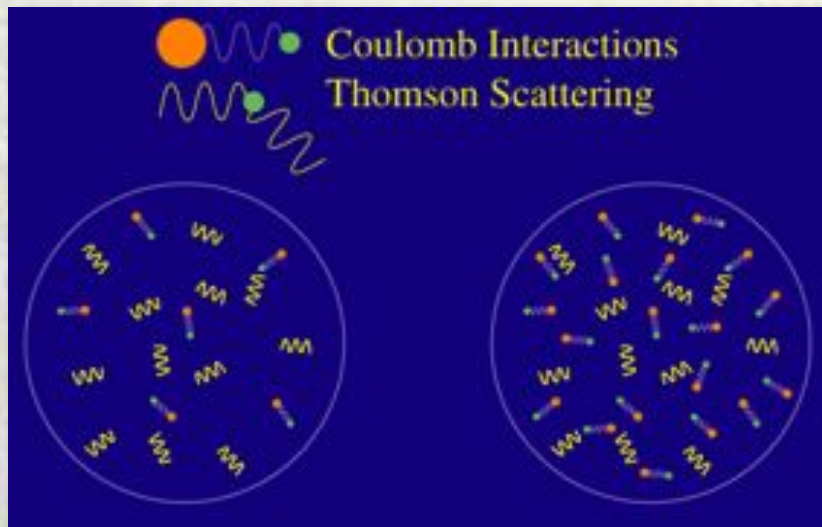
El efecto de “lente gravitacional” confirma que debe haber más materia de la que podemos ver en el Universo.



El modelo de la Gran Explosión

¿Cómo ayuda la materia oscura?

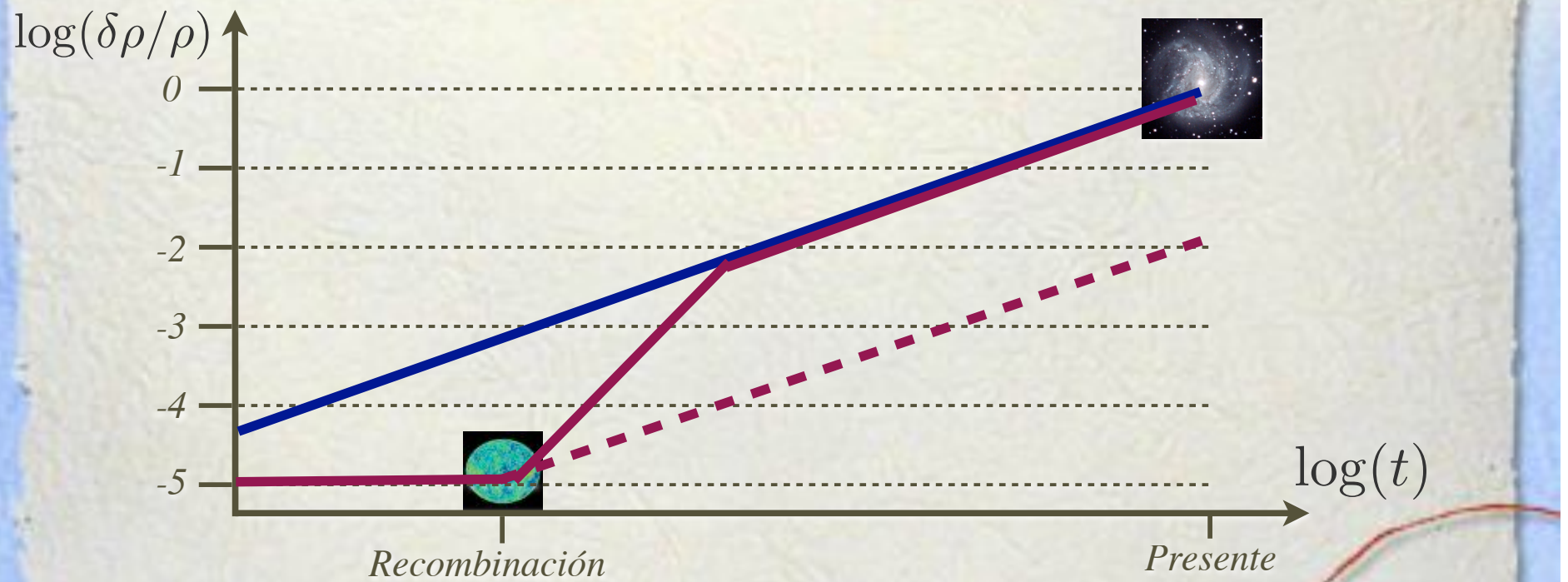
La materia oscura ayuda a la formación de galaxias, porque al no interactuar con los fotones, puede colapsarse bajo el efecto de su propia gravedad desde antes de la época de recombinación.



El modelo de la Gran Explosión

¿Cómo ayuda la materia oscura?

Al liberarse los átomos de la presión de los fotones en la época de recombinación, se colapsan sobre los pozos de potencial que ya ha formado la materia oscura.



El modelo de la Gran Explosión

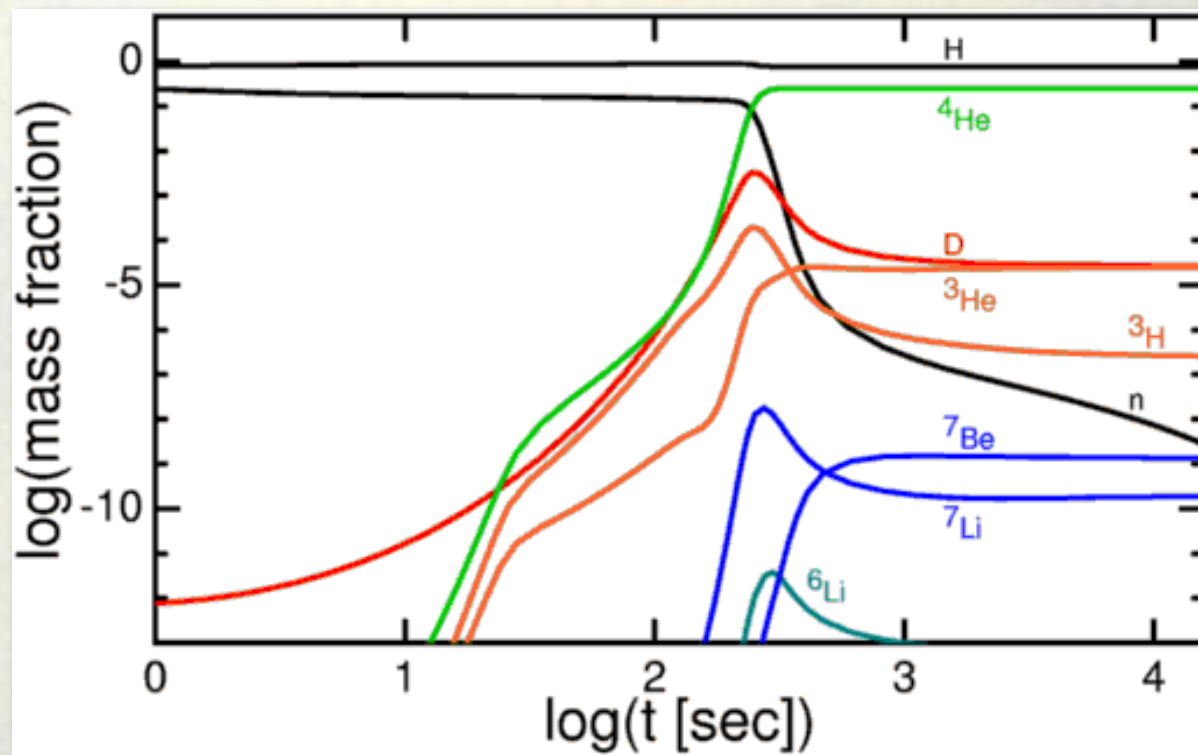
¡La materia oscura resuelve también

El problema de la formación de Galaxias!



El modelo de la Gran Explosión

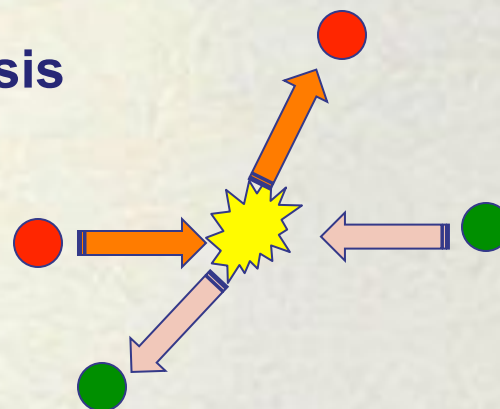
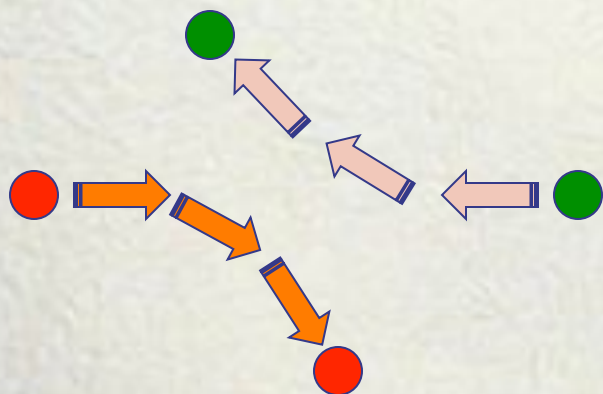
Nucleosíntesis



El modelo de la Gran Explosión

Nucleosíntesis

Cuando el Universo es muy joven, su temperatura es enorme y por tanto, las colisiones entre partículas son muy violentas y no se pueden formar núcleos atómicos.



Por el contrario, cuando ya ha pasado más tiempo, la temperatura ha caído al punto en que ya los protones no tienen energía suficiente para oponerse a la repulsión eléctrica entre ellos.

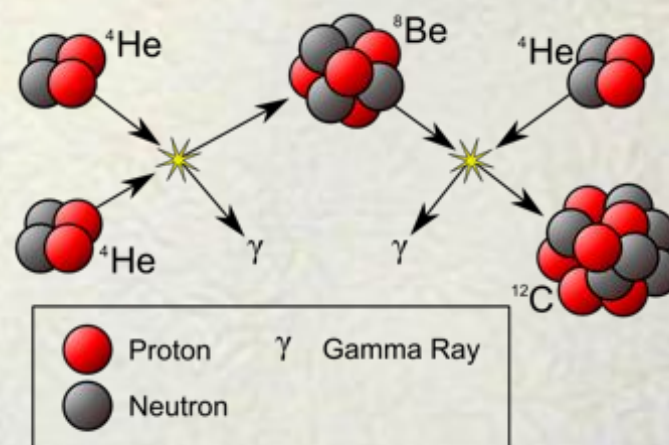
Así pues, existe una ventana pequeña en el tiempo (cuando el Universo tenía aproximadamente 3 minutos, cuando protones y neutrones pueden fusionarse para producir núcleos atómicos: la época de la nucleosíntesis.

El modelo de la Gran Explosión

Nucleosíntesis

¡Pero no hay núcleos estables de 8 nucleones!

	^{12}C	^{13}C	^{14}C	^{14}C	^{13}C	^{12}C	^{11}C
	^7B	^9B	^{10}B	^{10}B	^{11}B	^{12}B	^{13}B
	^6Be	^7Be	^8Be	^8Be	^{10}Be	^{11}Be	^{12}Be
	^4Li	^6Li	^7Li	^7Li	^8Li	^9Li	^{10}Li
	^3He	^4He	^5He	^5He	^6He	^7He	^8He
	^2H	^3H	^3H	^4H	^4H	^4H	^4H
	^1H						



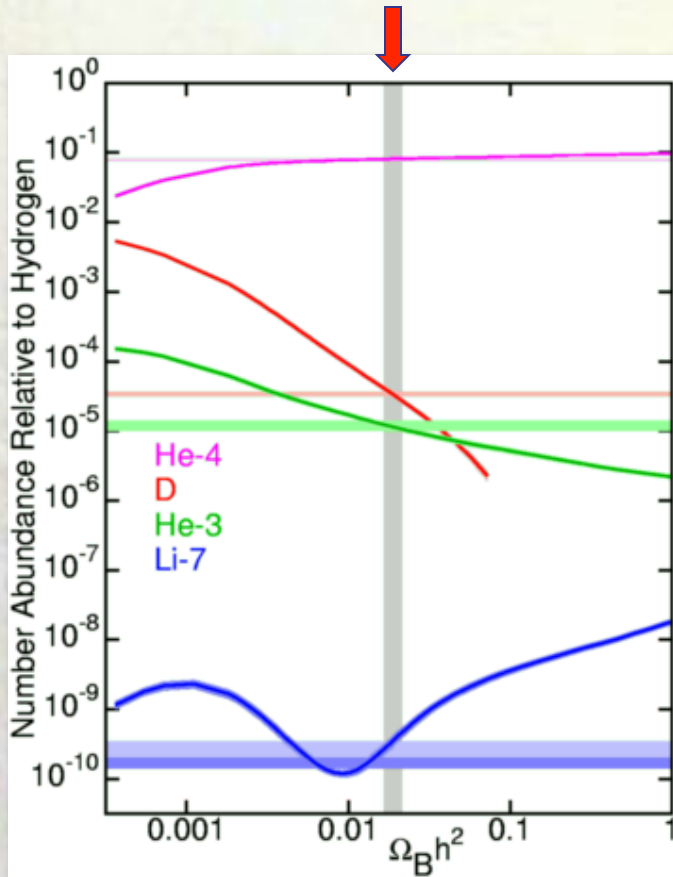
¡La reacción triple- α permite ir más allá de esta barrera!

Pero su tiempo de reacción es largo.

⇒ Elementos más pesados se sintetizan en el interior de las estrellas.

El modelo de la Gran Explosión

Observaciones



Nucleosíntesis

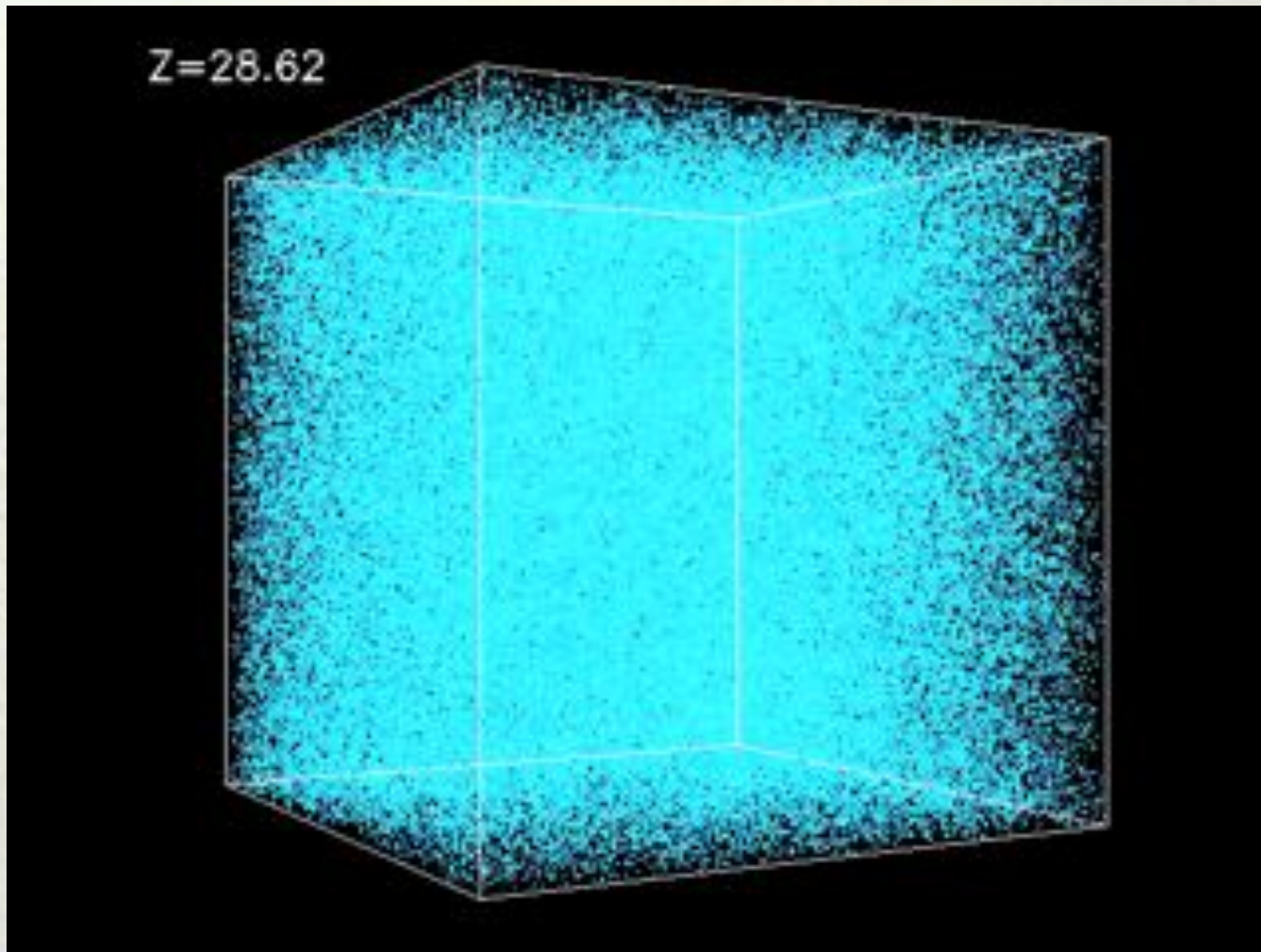
La nucleosíntesis en el Universo temprano explica con gran precisión las abundancias cósmicas relativas de los isótopos más ligeros.



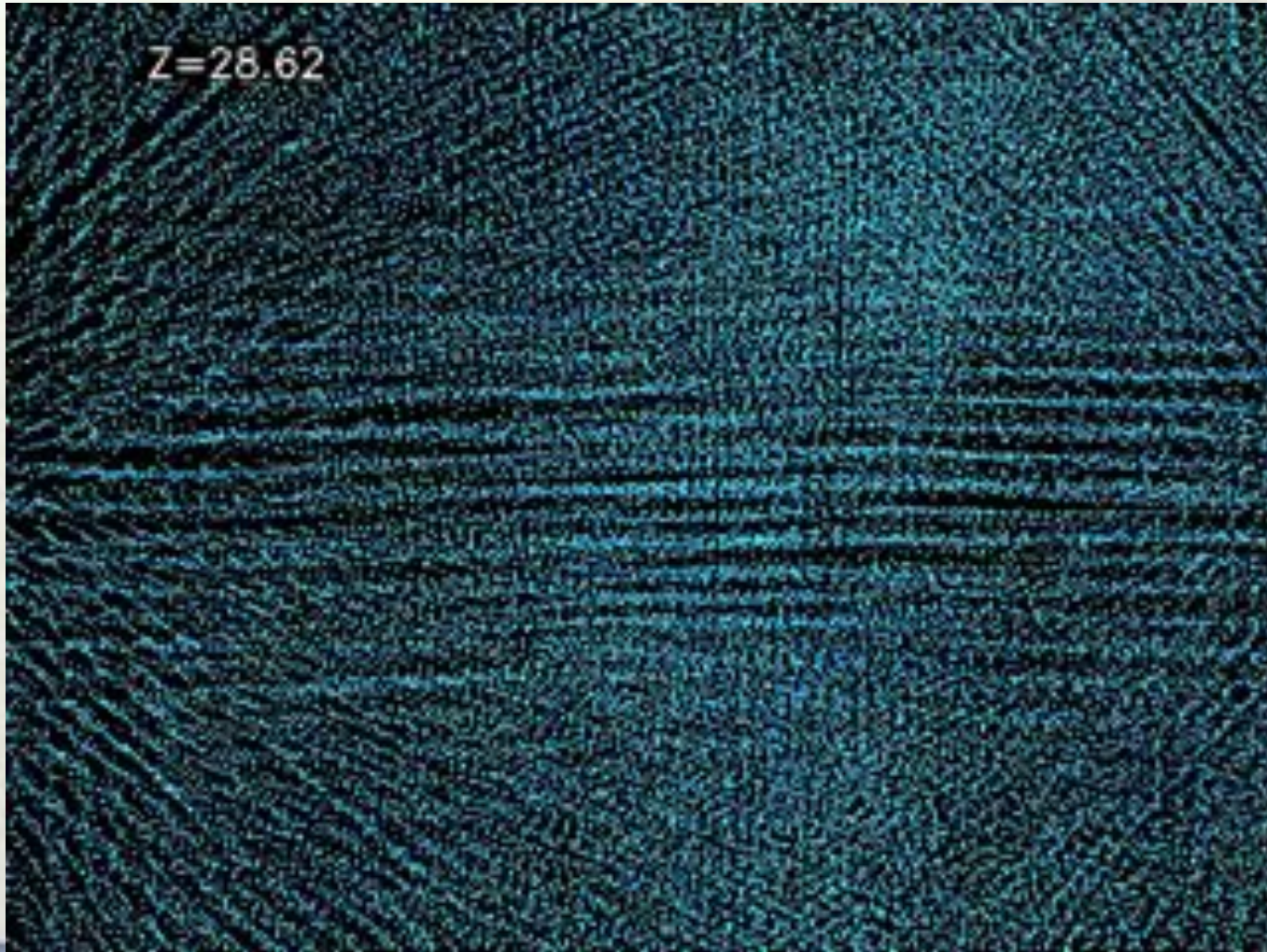
Pero predice que la densidad media del Universo es muy baja:

$$\Omega_b = 0.04$$

El modelo de formación de Galaxias



El modelo de formación de Galaxias



Los problemas del modelo de la gran explosión



Los problemas del modelo de la gran explosión

Existen, sin embargo, tres grandes problemas con el modelo de la gran explosión:

- El Problema de la falta de curvatura
- El problema del horizonte cósmico
- El problema del origen de la materia