

# TEMA 11

- \* Teorías cosmológicas.
- \* ¿Universo cerrado o abierto?.
- \* El universo acelerado.
- \* Las eras cosmológicas.
- \* El origen de los elementos químicos.
- \* El origen de las galaxias.

## Propiedades geométricas del universo

Nos interesa definir la distancia entre 2 puntos  $ds$ , donde el elemento infinitesimal  $ds$  se denomina *elemento de línea*. En un espacio euclidiano la definición es sencilla:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

y en coordenadas esféricas:

$$ds^2 = dr^2 + r^2(d\theta^2 + \cos\theta d\phi^2)$$

En la geometría del espacio-tiempo, si asumimos un universo homogéneo e isotrópico, el elemento de línea queda definido como:

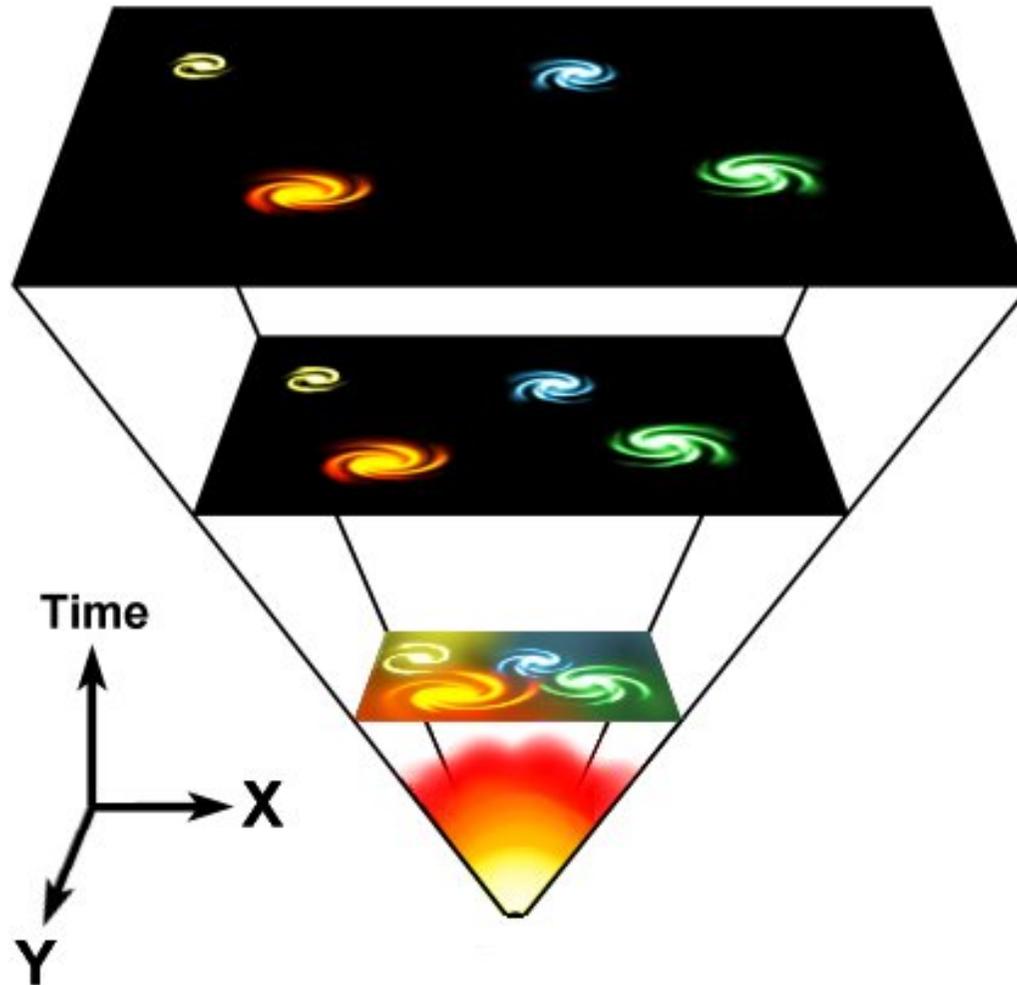
$$ds^2 = -c^2 dt^2 + R^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \cos\theta d\phi^2) \right]$$

que se conoce como el elemento de línea de *Robertson-Walker*.

El coeficiente  $k$  puede valer  $+1$ ,  $0$ ,  $-1$ , correspondiendo a las 3 posibles geometrías del espacio.

El factor  $R(t)$  se denomina *factor de escala* del universo.

# El factor de escala



Consideremos 2 puntos con una separación  $r$  en un instante  $t$  y con una velocidad relativa  $V$ . Si comparamos esta distancia con la que tenían en  $t = t_o$ , tenemos:

$$\frac{r}{r_o} = \frac{R(t)}{R(t_o)}$$

La velocidad relativa es  $\dot{r} = V$ , de donde:

$$V = \dot{r} = [\dot{R}(t)/R(t_o)]r_o$$

Y siendo  $H = V/r$ , nos queda:

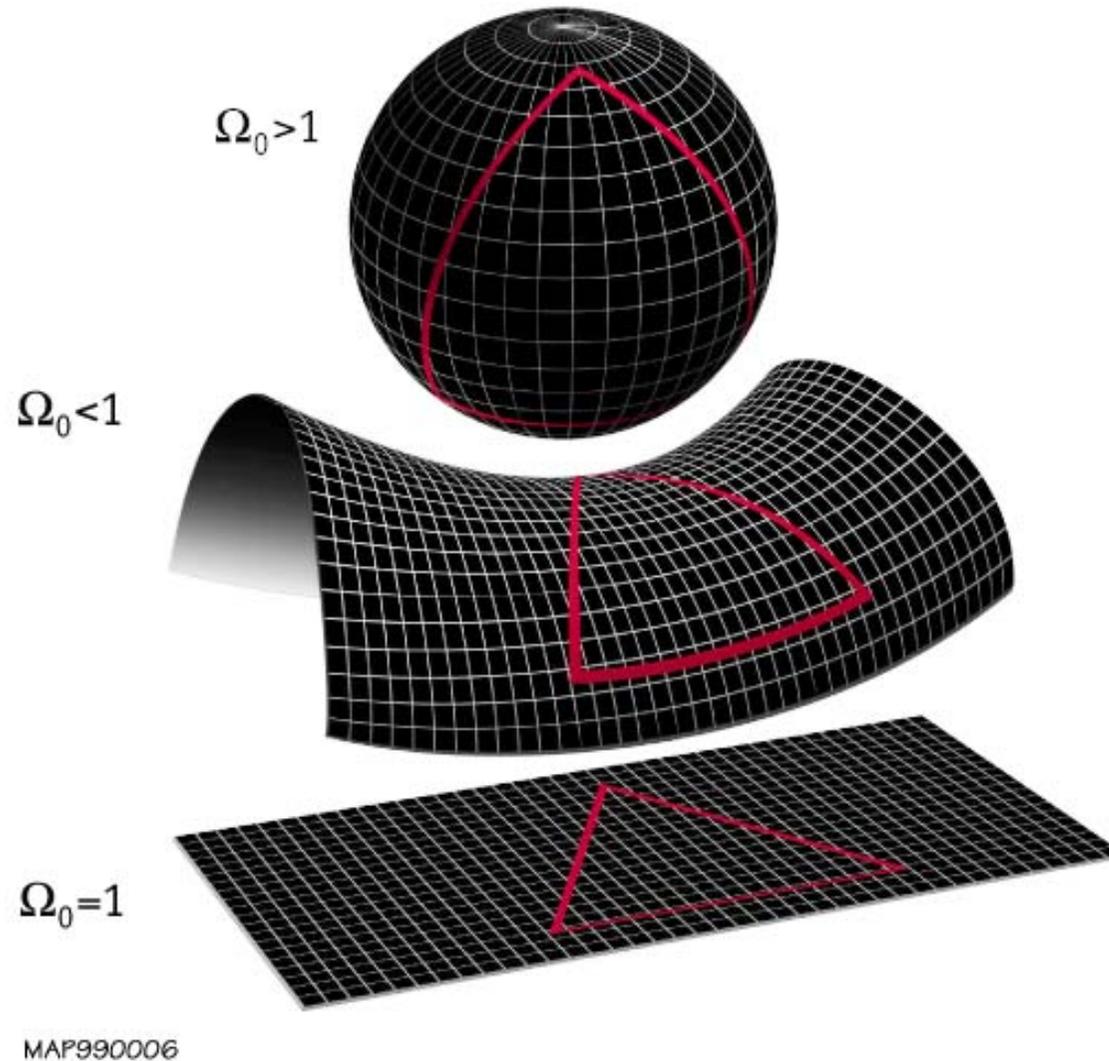
$$H = \frac{V R(t_o)}{r_o R(t)} = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)}$$

El caso  $k = 0$  define la *densidad crítica* del universo  $\rho_c$ . Si la densidad real del universo fuera  $\rho < \rho_c$ , el universo se expandiría para siempre; si  $\rho > \rho_c$ , la expansión llegaría a un máximo para luego recolapsar. La densidad crítica se puede expresar en términos de la constante de Hubble como:

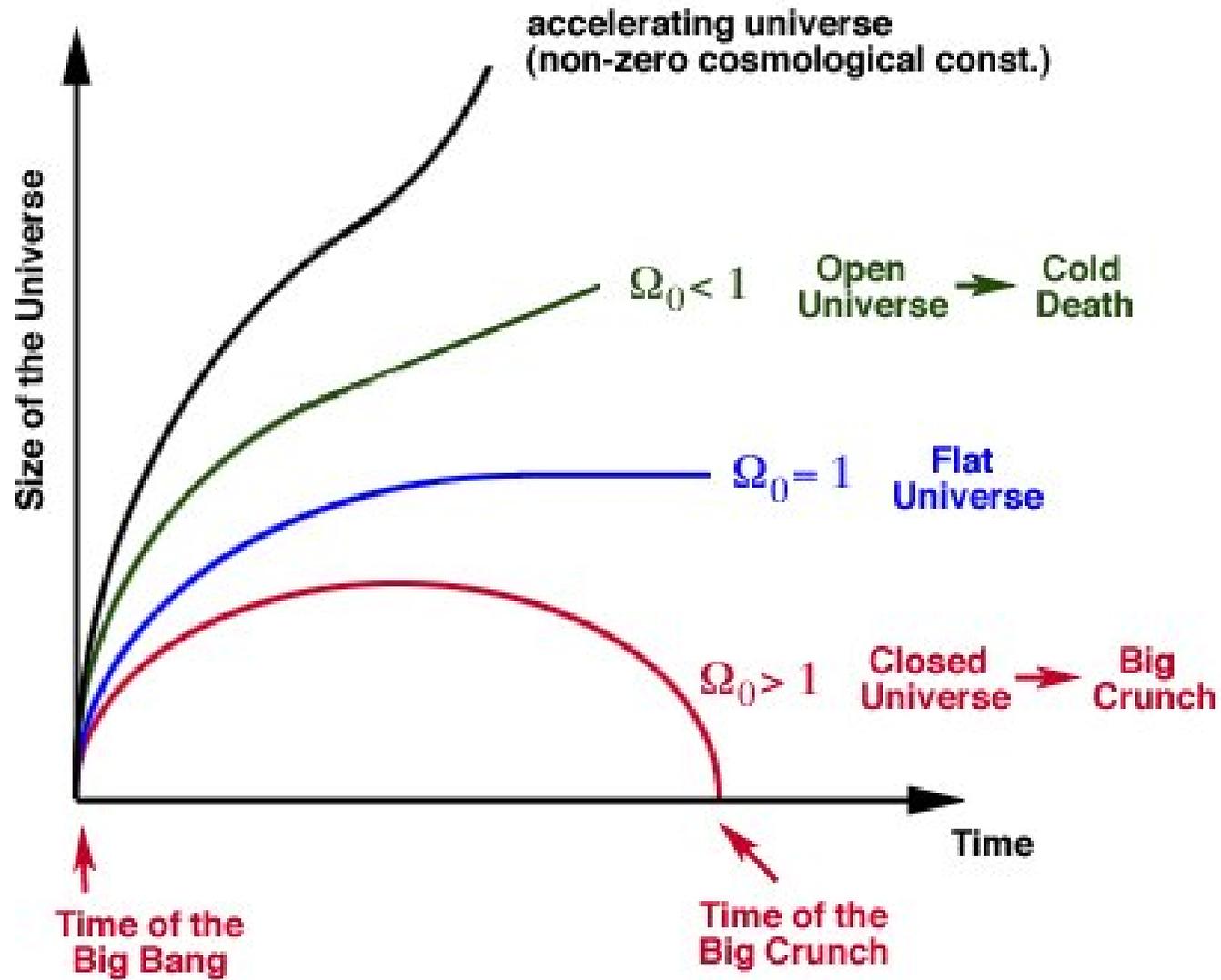
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

En cosmología se define el *parámetro de densidad*:  $\Omega = \rho/\rho_c$ , de modo que tendremos un universo abierto para  $\Omega < 1$  y uno cerrado para  $\Omega > 1$ . Para  $\Omega = 1$  tendremos un universo plano (conocido como el modelo de *Einstein-de Sitter*).

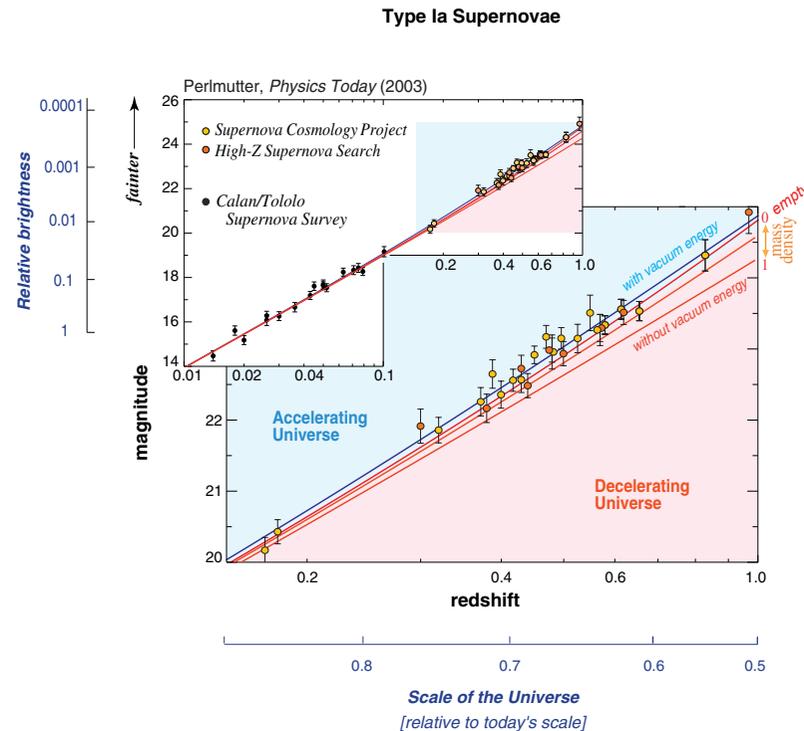
# Diferentes geometrías del espacio-tiempo



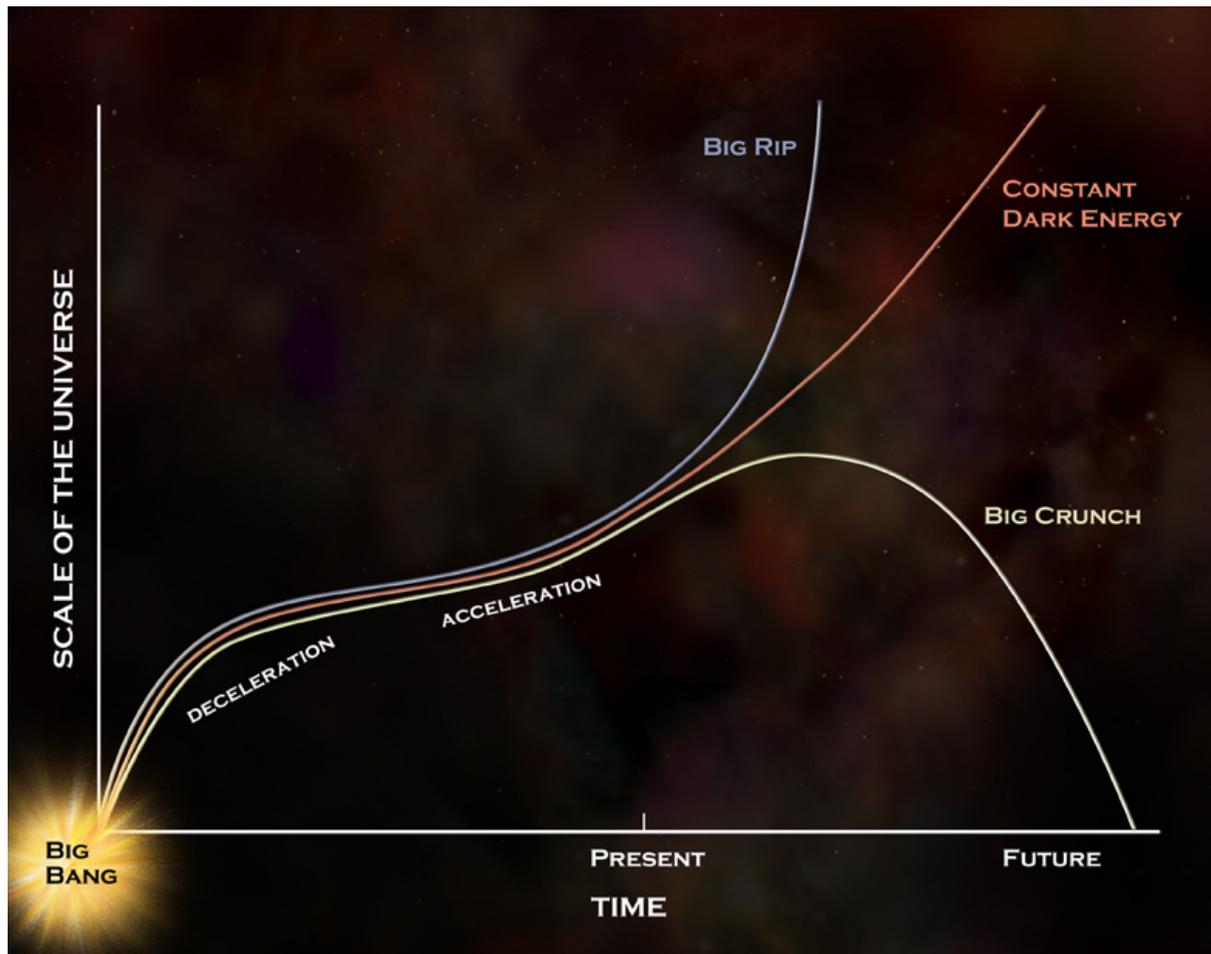
# ¿Universo cerrado o abierto?



# El universo acelerado: La necesidad de una nueva forma de energía, denominada *oscura*

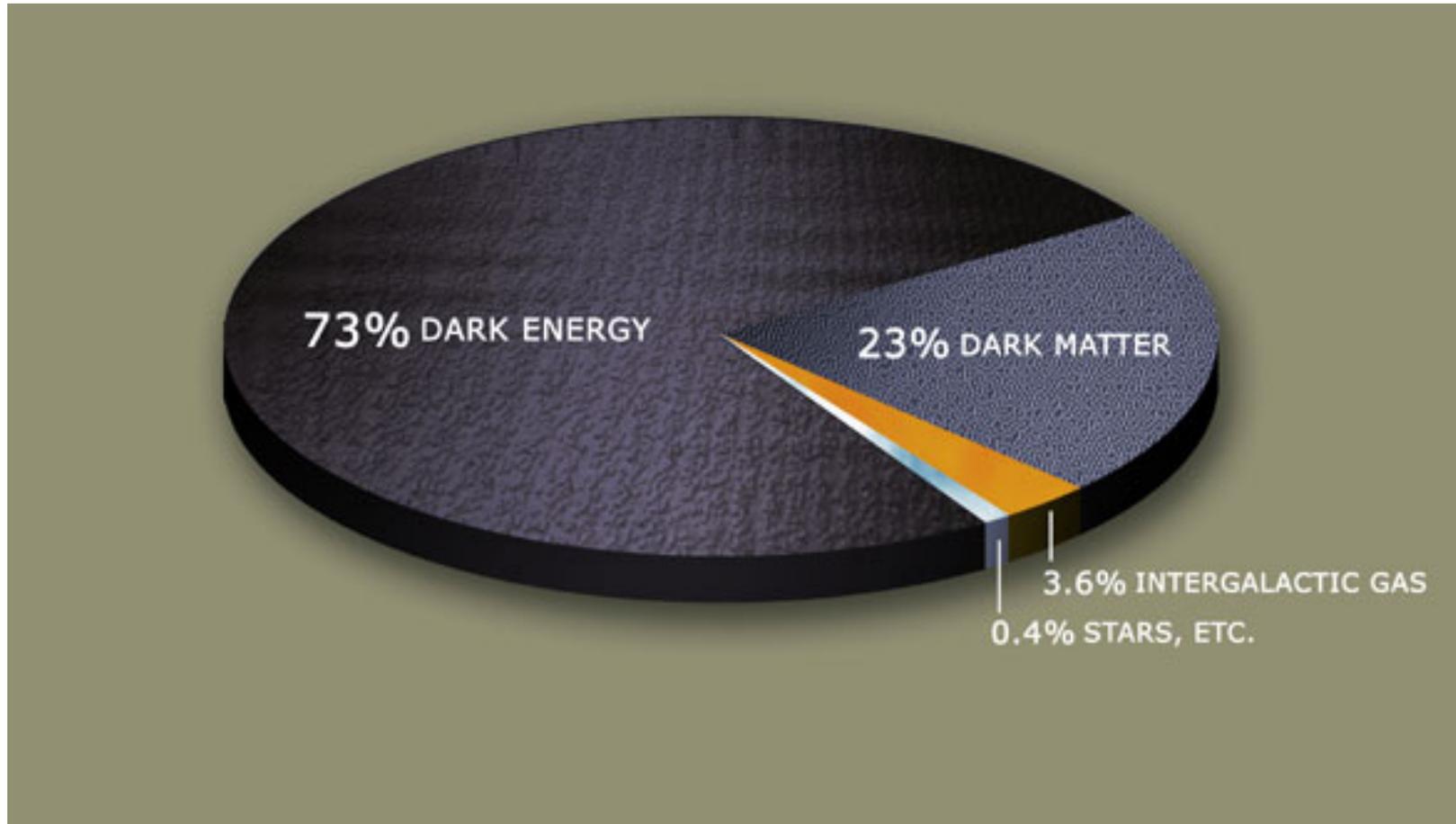


Es universo acelerado es la observación de que el universo parece estar expandiéndose a una tasa creciente. En términos matemáticos ello implica que la derivada segunda del factor de escala es positiva:  $\ddot{R}(t) > 0$ . La explicación de este fenómeno requiere recurrir a alguna forma de *energía oscura*.



La observación de supernovas la distantes (a corrimientos  $z > 0,5$ ) por Perlmutter, Schmidt y Riess y sus equipos corroboró que la expansión del universo se está acelerando. Este descubrimiento les valió ser galardonados con el premio Nobel de Física en 2011.

## ¿De qué está compuesto el universo?



La energía oscura es una forma hipotética de energía que permea todo el cosmos, responsable de la aceleración de la expansión del universo en los últimos 7 mil millones de años. Esta energía constituiría el 73% de todo el contenido de masa y energía del universo.

# Historia del universo

Al comienzo las densidades y temperaturas eran tan inmensas que no tenemos teorías físicas adecuadas para describir los procesos.

La ausencia de antimateria en el universo plantea una paradoja ya que atenta contra la *teoría de simetría* (igual cantidad de partículas y antipartículas). **Debemos admitir un quiebre en la simetría por el cual el número de partículas de materia excedía al de antimateria por un factor 1,000000001.** Al aniquilarse las partículas de materia y antimateria entre sí quedó un remanente del 0,1% de materia que fue suficiente para luego formar las galaxias.

## La era de los hadrones

A medida que el universo se expandía, la densidad y temperatura decrecían hasta valores "normales" en que los principios de la física de partículas eran aplicables. El rango de temperaturas para producir *hadrones* (protones, neutrones y mesones) es  $T = 10^{15} - 10^{12}$  K, que se transitó entre  $t = 10^{-8}$  s y  $t = 10^{-4}$  s.

## La era de los leptones

En el período entre  $10^{-4}$  y 1 s las energías de los fotones eran suficientes para producir pares de electrones-positrones: durante esta era también se produjo el desacople de los neutrinos que de ahí en adelante pudieron propagarse por el espacio casi sin interacciones.

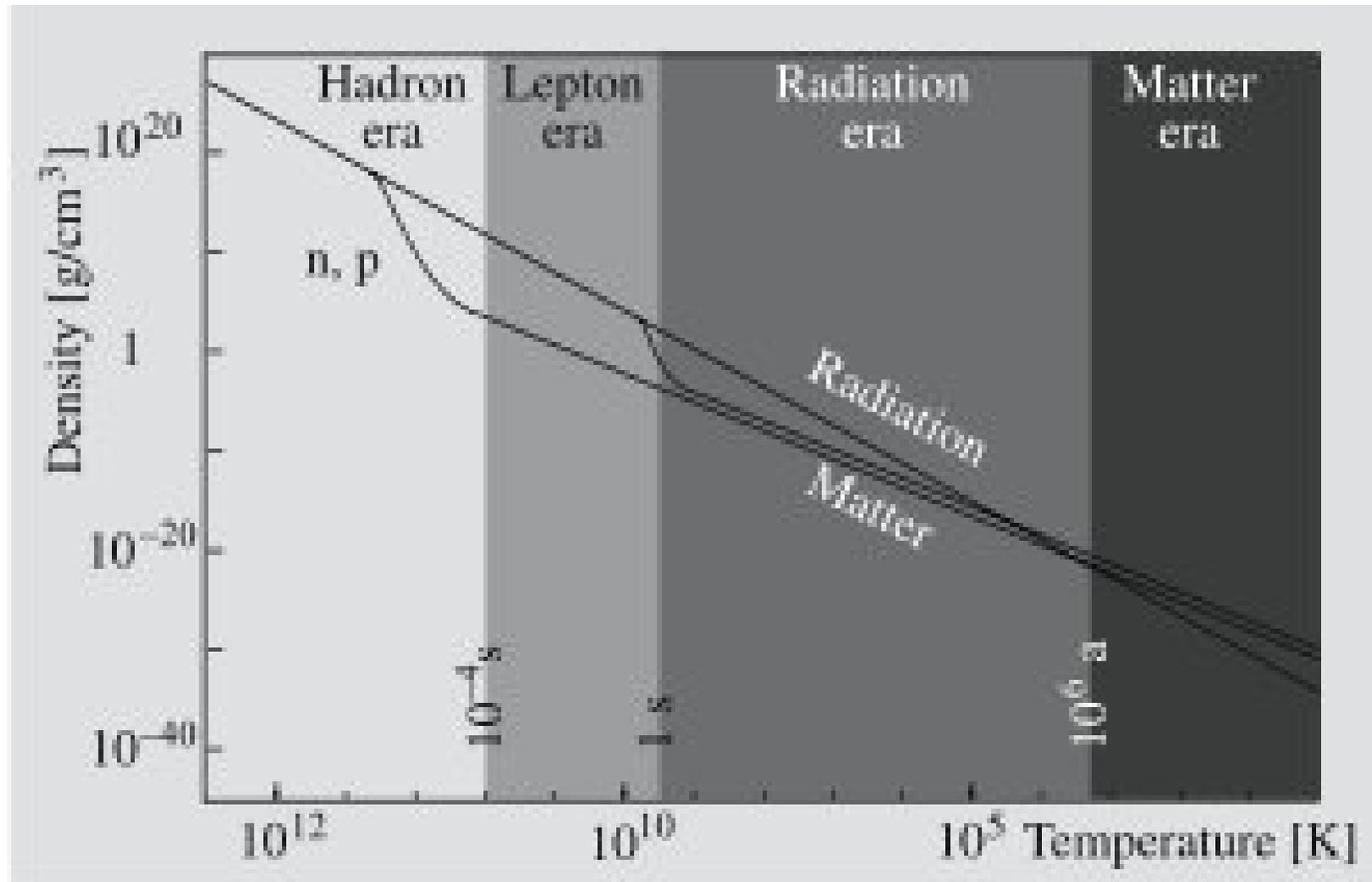
## La era de la radiación

Después de 1 s la forma más importante de energía era la radiación electromagnética. Al comienzo, existía una temperatura de  $T \simeq 10^{10}$  K y al final del período, aproximadamente unos  $10^7$  años después, la temperatura había caído a unos pocos miles de grados K. En esta era se produjeron las partículas primordiales del universo: deuterio, helio ( $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ) y litio ( $^7\text{Li}$ ) que se sumaron a los núcleos atómicos de hidrógeno que ya existían desde la era de los hadrones.

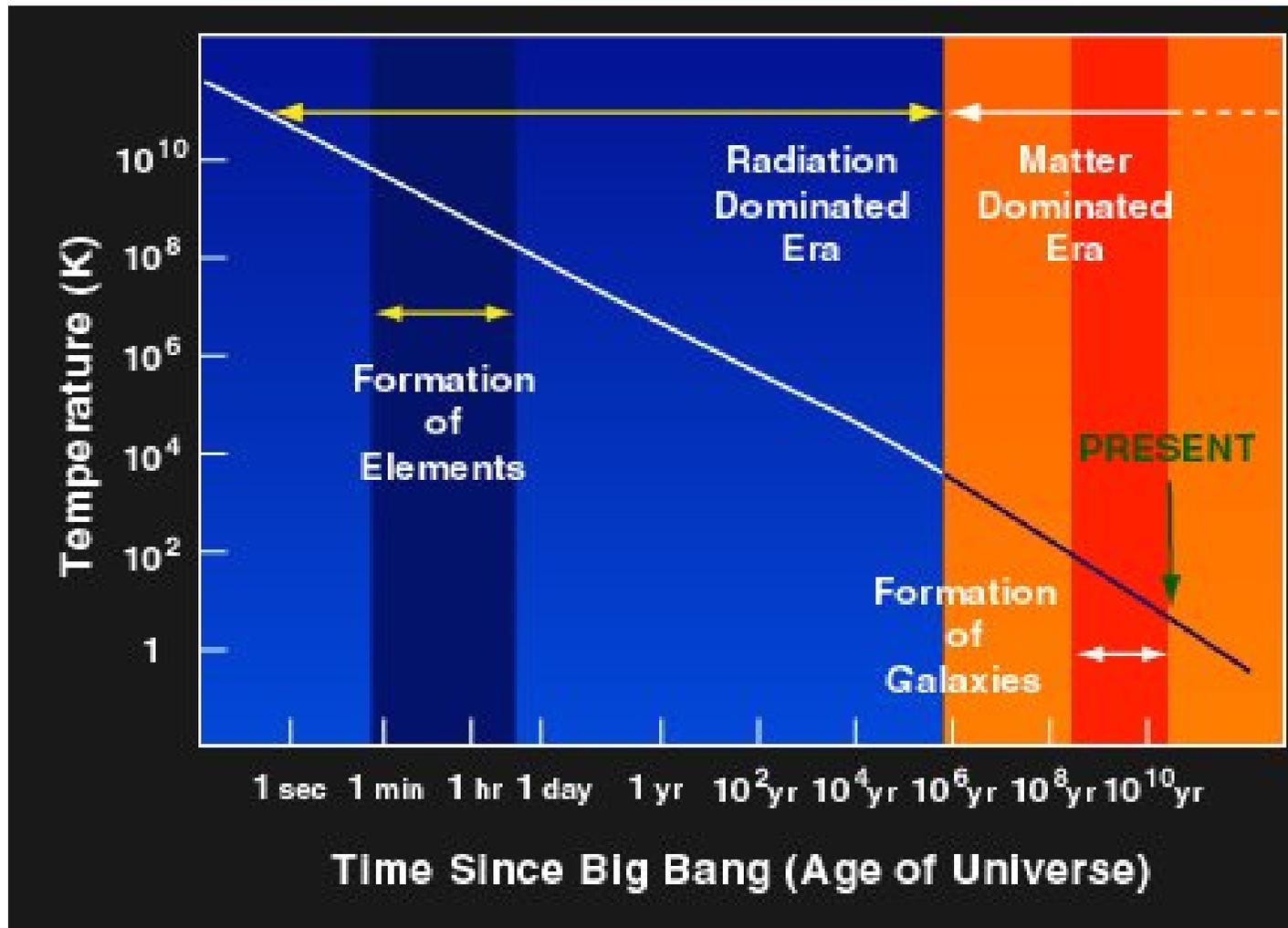
## La era de la materia

Esta era comienza en el momento en que la densidad de la materia supera a la de la radiación a causa de la expansión del universo. Se produjo entonces un desacople de la materia con respecto a la radiación y se formaron átomos neutros de hidrógeno al combinarse los protones con los electrones.

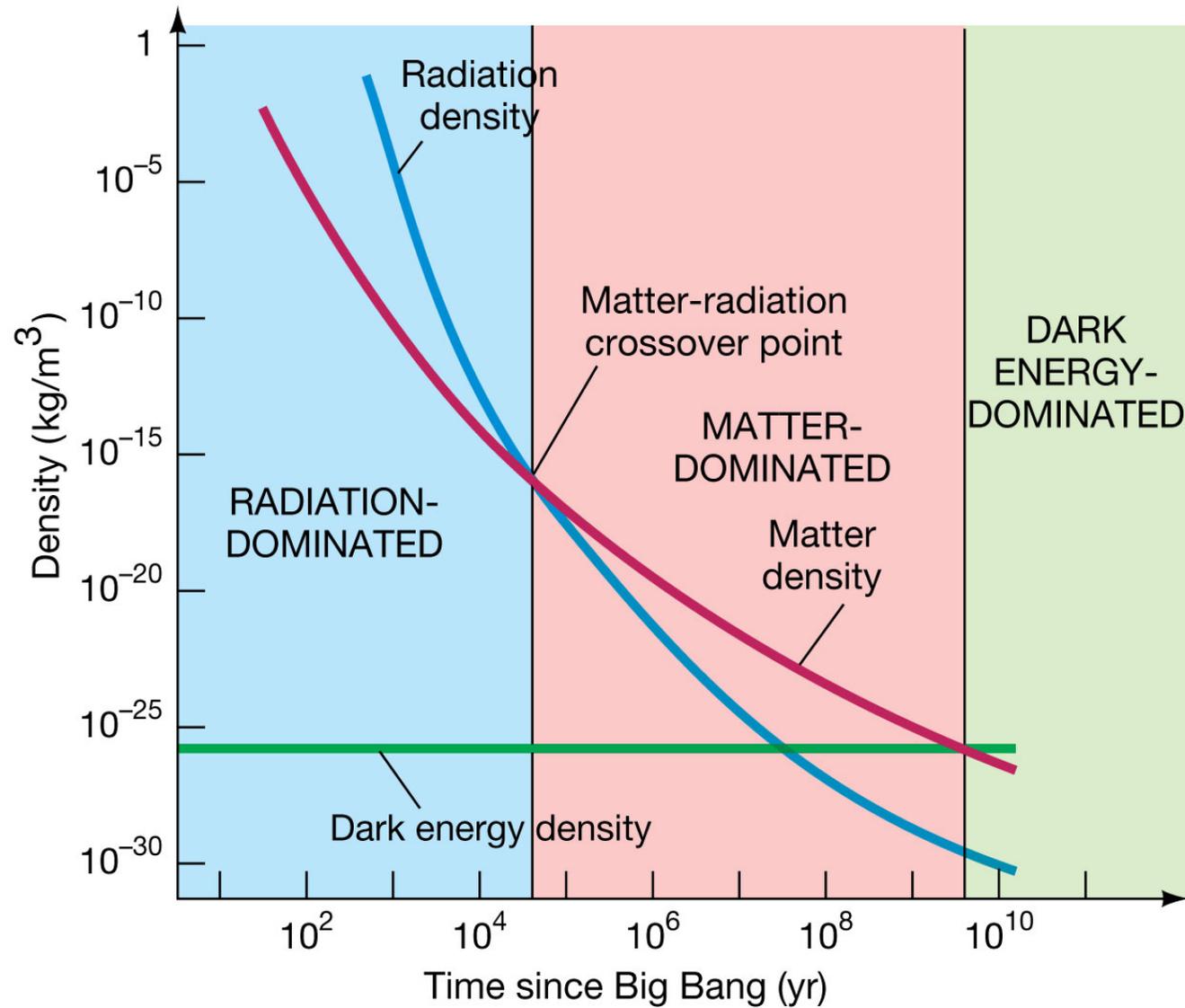
## Las diferentes eras



# El pasaje de un universo dominado por energía a uno dominado por materia



# El presente: transitamos de un universo dominado por materia a uno dominado por energía oscura

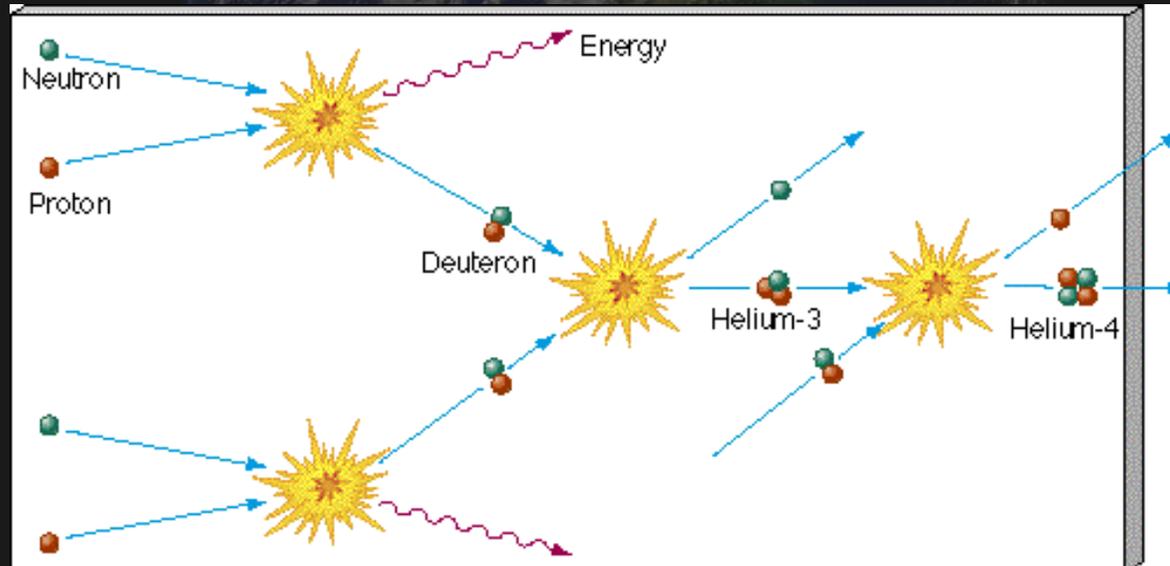


© 2011 Pearson Education, Inc.

# El origen de los elementos químicos

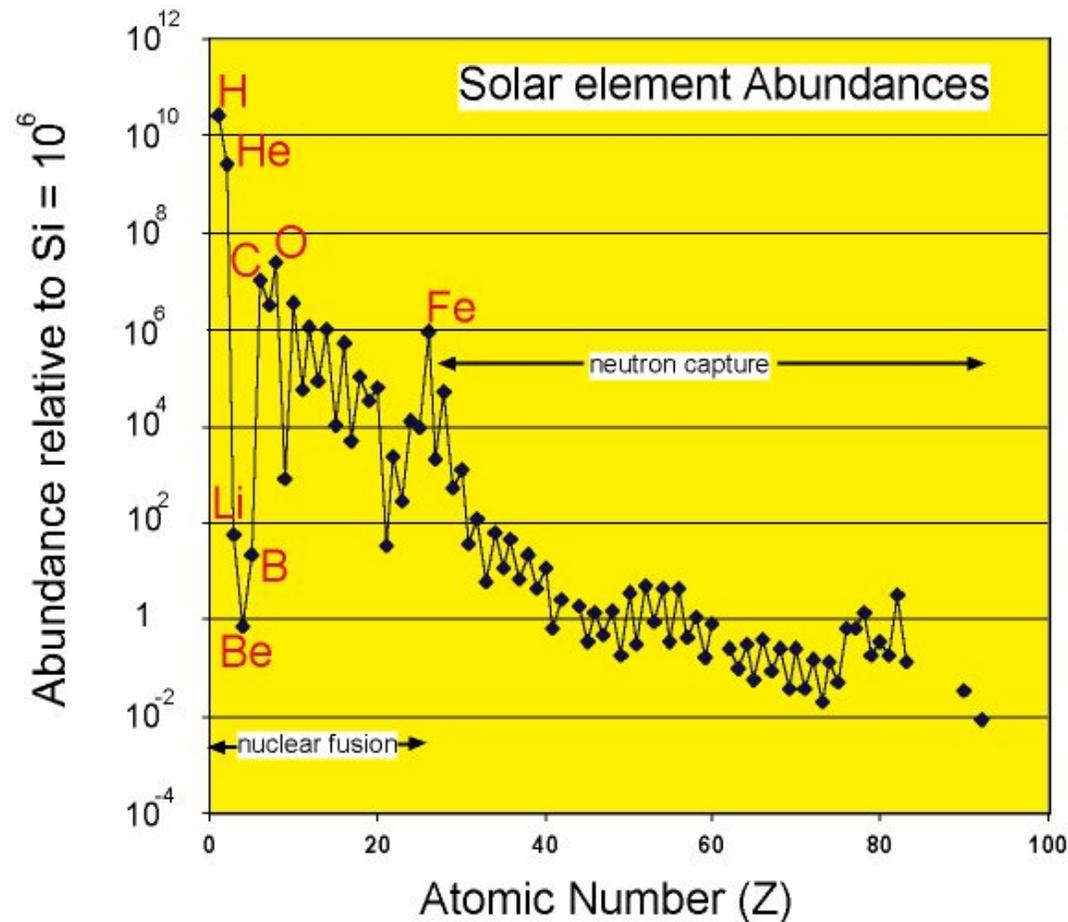
## Nucleosíntesis primordial

Los 15 primeros minutos a 300 millones K  
 $[He]/[H] = 0.25$



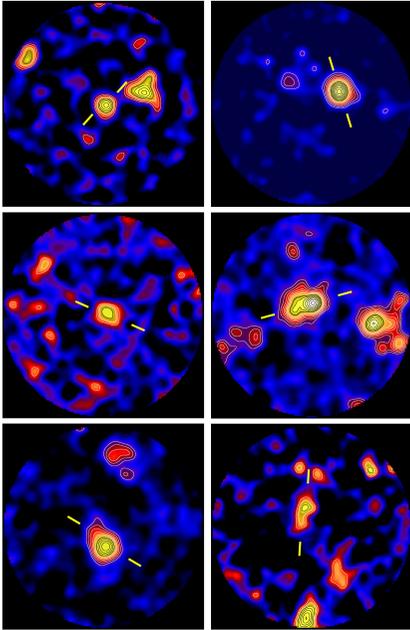
\* Los primeros elementos que se formaron fueron los más simples y livianos (H, He, algo de Li y B)

# La abundancia de los elementos químicos



Al conjunto de elementos livianos primordiales, se unieron después los átomos más pesados formados en el interior de las estrellas como resultado de las reacciones termonucleares y en las explosiones de las supernovas. Este procesamiento de la materia, generó las abundancias cósmicas de los elementos químicos observadas en el universo.

## La formación de las galaxias



Imágenes tomadas con el telescopio James Clerk Maxwell a una  $\lambda = 0.85$  mm que muestra galaxias masivas aun en proceso de formación. Estas galaxias están formando estrellas en forma muy activa, tal vez por la fusión de galaxias más viejas en estructuras filamentosas.

Se supone que las galaxias se formaron dentro de zonas algo más densas dentro de la inmensa nube de materia que constituía el universo primitivo: no está muy claro qué tipos de perturbaciones originaron estos "grumos" de materia algo más densa y cuál fue su tamaño. Lo último es importante porque no está todavía claro si las primeras estructuras del universo fueron las galaxias (que luego se combinaron en cúmulos y supercúmulos), o si fueron primero los supercúmulos que se fueron desgranando en cúmulos y galaxias.



El telescopio James Clerk Maxwell es el más grande del mundo en el rango submilimétrico. Posee una antena de 15 m de diámetro. Está situado en Mauna Kea, Hawaii, EEUU.