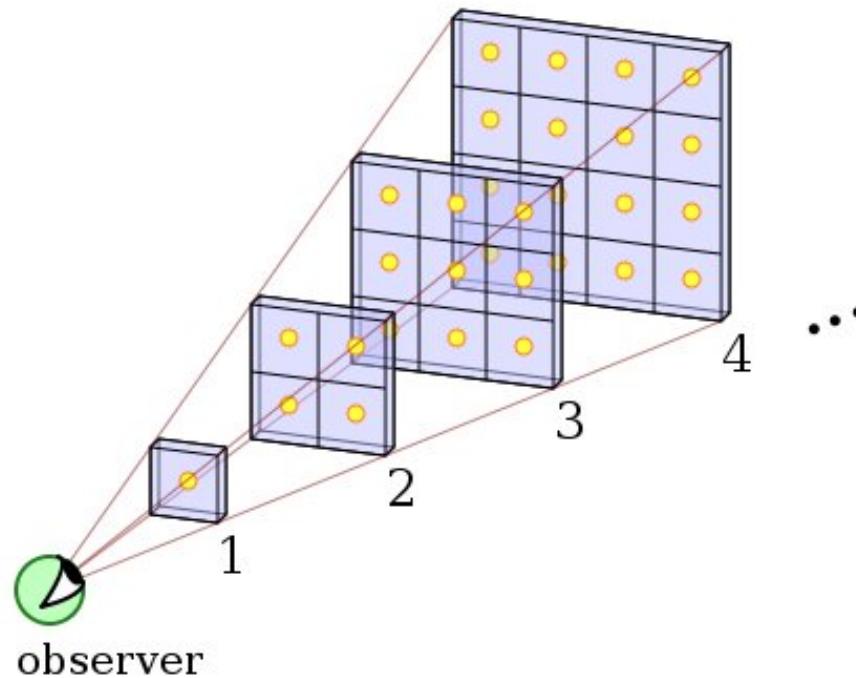


# TEMA 10

- \* La paradoja de Olbers.
- \* La expansión del universo.
- \* El Big Bang.
- \* Cúmulos y supercúmulos de galaxias. Evidencia de la existencia de materia oscura.
- \* La estructura fina.
- \* La radiación de fondo.

# La paradoja de Olbers



La primera observación de interés cosmológico es que el cielo es oscuro de noche. Esto lo notó Johannes Kepler en 1610 para argumentar en favor de un universo finito. Esta idea fue más elaborada por Heinrich Olbers a comienzos del siglo XIX en lo que se conoce como la *paradoja de Olbers*. Supongamos que tenemos un universo infinito ocupado uniformemente por estrellas similares al Sol. Sea  $n_*$  la densidad de estrellas, cuyas luminosidades son  $L = L_\odot$ . La luminosidad que llega a la Tierra proveniente de una estrella a una distancia  $r$  es:

$$l = \frac{L}{4\pi r^2}$$

El aporte luminoso de todas las estrellas que se encuentren dentro de una cáscara esférica de radio  $r$  y espesor  $dr$  será:

$$l_r = l \times 4\pi r^2 dr \times n_* = \frac{L}{4\pi r^2} \times 4\pi r^2 dr \times n_* = n_* L dr$$

El brillo aportado por todas las estrellas del universo sería entonces:

$$l_{total} = \int_0^\infty n_* L dr \Rightarrow \infty$$

O sea, obtendríamos una luminoisidad infinita. La Tierra estaría calcinada, lo cual no es cierto. El espacio no puede ser entonces homogéneo e infinito.

## ¿Cómo resolver esa paradoja?

\* La luz de las estrellas más distantes es bloqueada por la absorción del polvo interestelar:  
Esto no resuelve la paradoja. Por las leyes de la termodinámica, la radiación absorbida por el polvo lo calienta hasta alcanzar un equilibrio con las estrellas circundantes. El polvo emitirá radiación a la misma temperatura que el promedio de las temperaturas de las estrellas circundantes, lo cual llevaría a la misma situación de la paradoja.

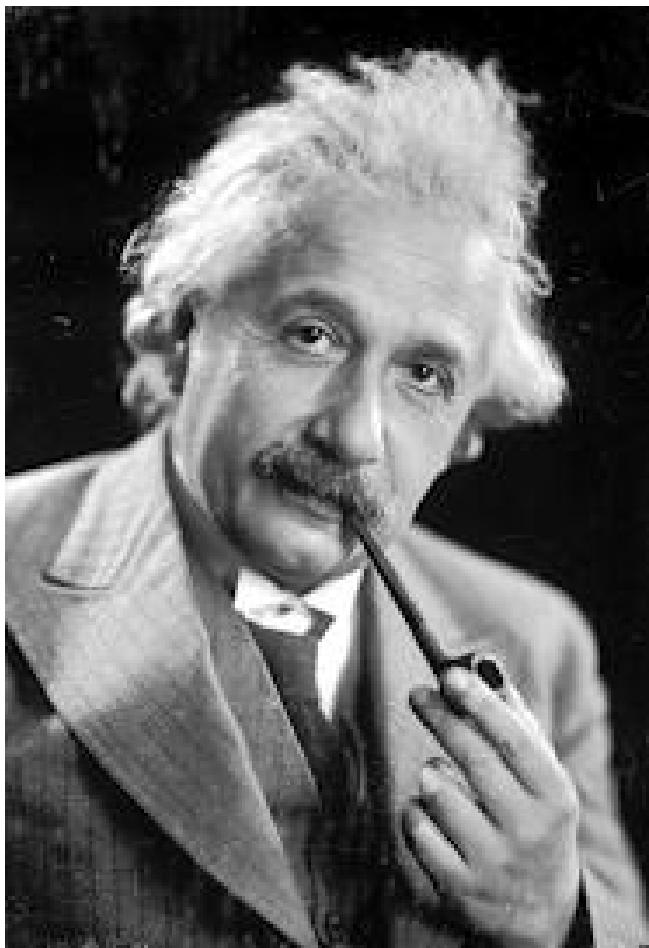
\* La edad del universo es finita:

En este caso la luz de las estrellas más distantes no habría tenido tiempo de llegar hasta nosotros. La paradoja de Olbers tendría respuesta por este lado.

\* La volumen del universo es finito:

En este caso las estrellas pueden tener una vida infinita, pero la luz integrada de todas las estrellas proviene de un volumen finito. Este es el modelo de un universo estático de Einstein.

## La teoría de la relatividad de Einstein



En 1916 Einstein predijo un universo estático, homogéneo, isotrópico, y con volumen finito pero sin borde, basado en su teoría general de la relatividad.

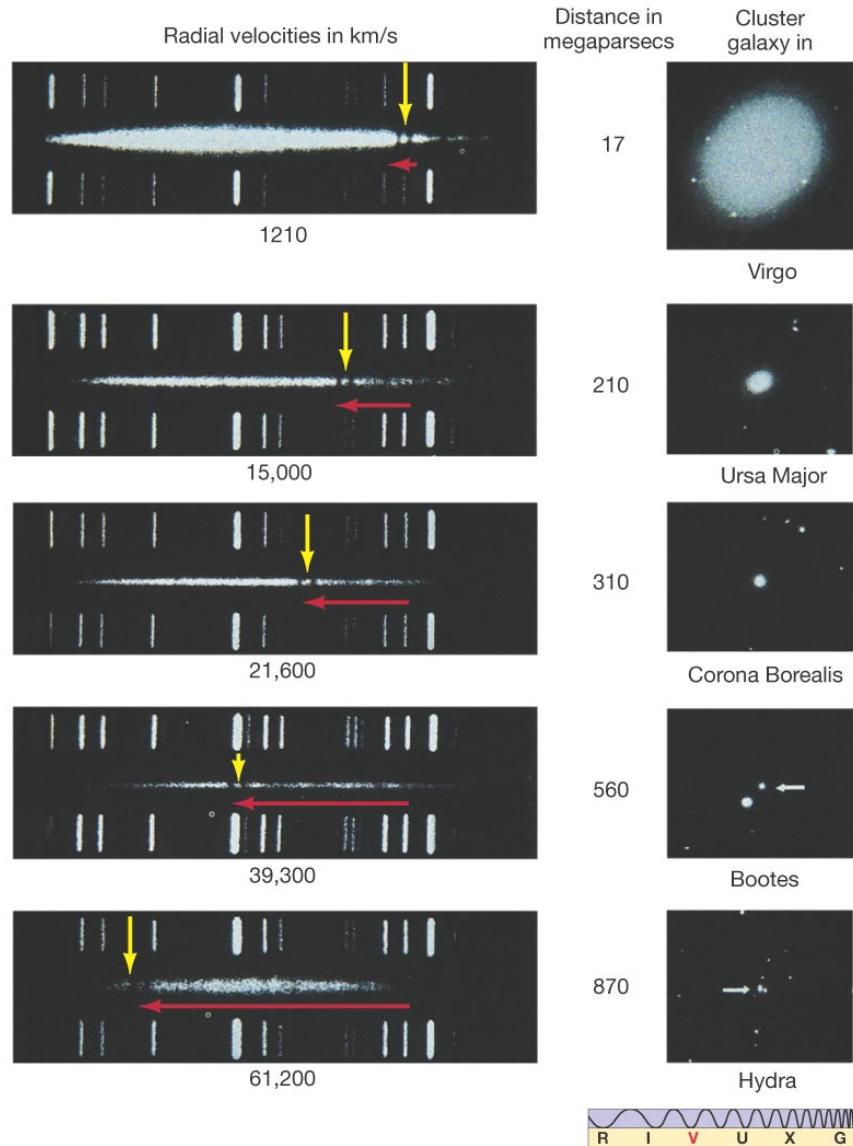
Esta teoría describe la gravitación como una propiedad geométrica del espacio-tiempo. La geometría del espacio-tiempo está determinada por la distribución de masa y energía. Las partículas que se mueven a través del espacio-tiempo siguen las trayectorias más cortas posibles denominadas *geodésicas*. A fin de obtener un universo estático, Einstein tuvo que introducir una nueva fuerza repulsiva: el *término cosmológico*, que está determinado por la *constante cosmológica*  $\Lambda$ .

Los físicos Alexander Friedmann y Georges Lemaître estudiaron las soluciones cosmológicas de las ecuaciones de Einstein para  $\Lambda = 0$ . En este caso sólo se obtenían modelos evolutivos en expansión o contracción.

# El estudio de las velocidades radiales de galaxias



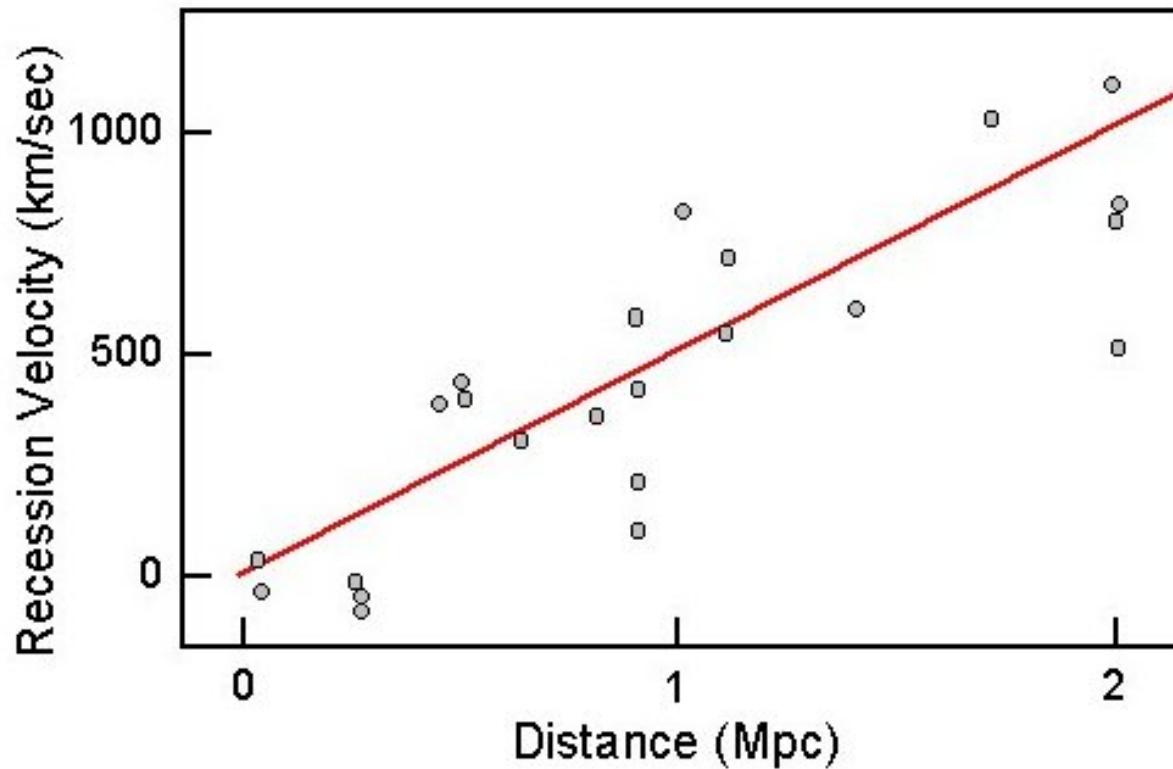
Edwin Hubble tomando placas



espectros de galaxias

# La expansión del universo: Ley de Hubble

## Hubble's Data (1929)



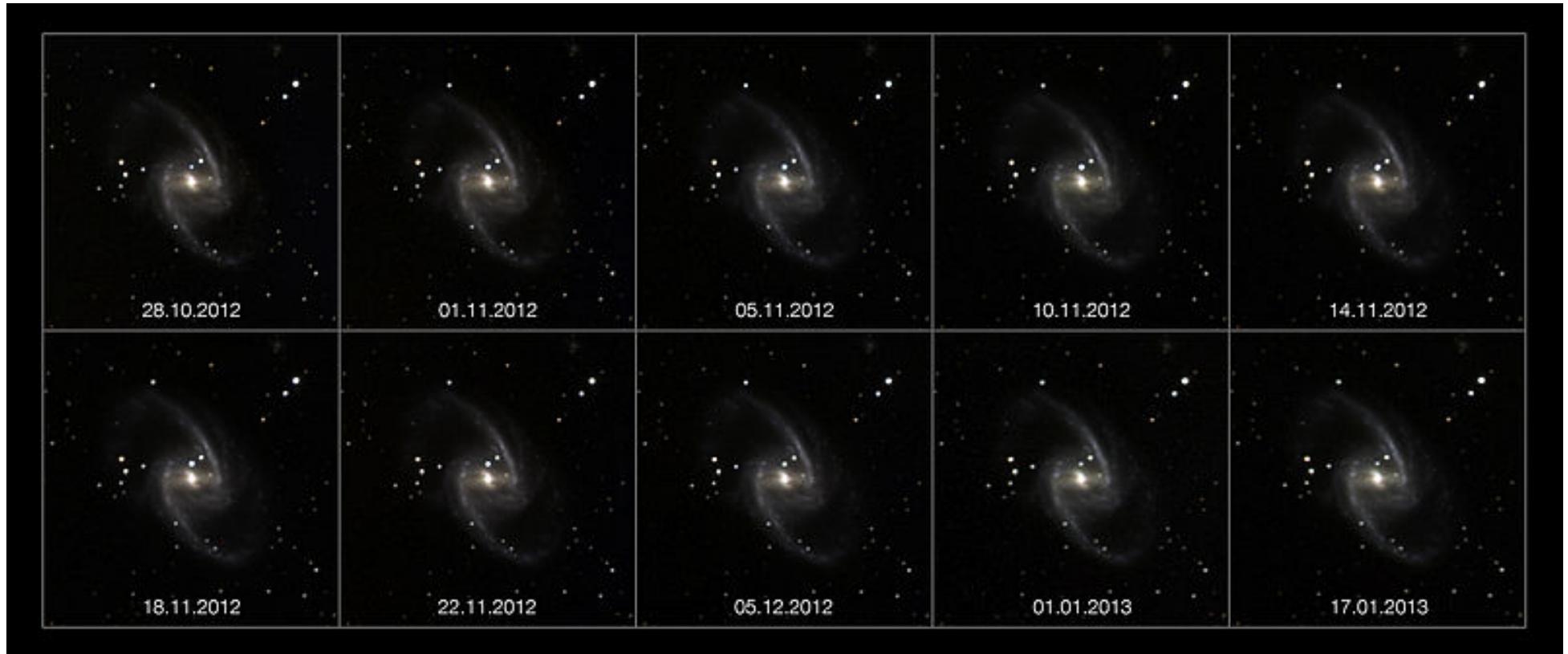
Edwin Hubble demostró observacionalmente en 1929 que las galaxias en su conjunto se expanden alejándose unas de otras. Las líneas espectrales de las galaxias tenían corrimientos hacia el rojo proporcionales a sus distancias.

## Indicadores de distancia extragalácticos

Método	Rango (Mpc)
Cefeidas	0-4
Regiones HII más grandes	0-10
Estrellas más brillantes	0-10
Método de Tully-Fisher	0-100
Galaxias más luminosas en un cúmulo	0-100
Cúmulos de galaxias más luminosos	20-2000
Supernovas	

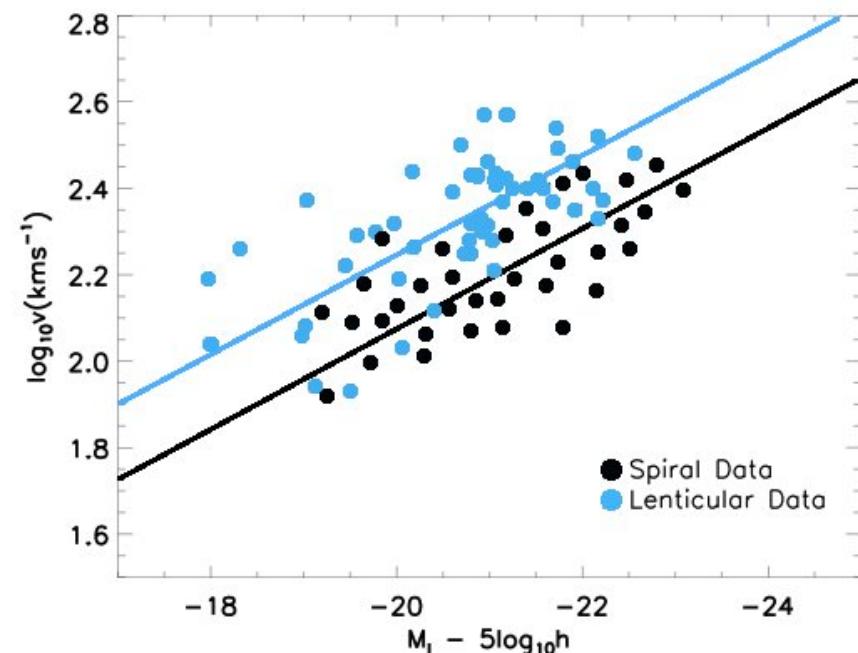
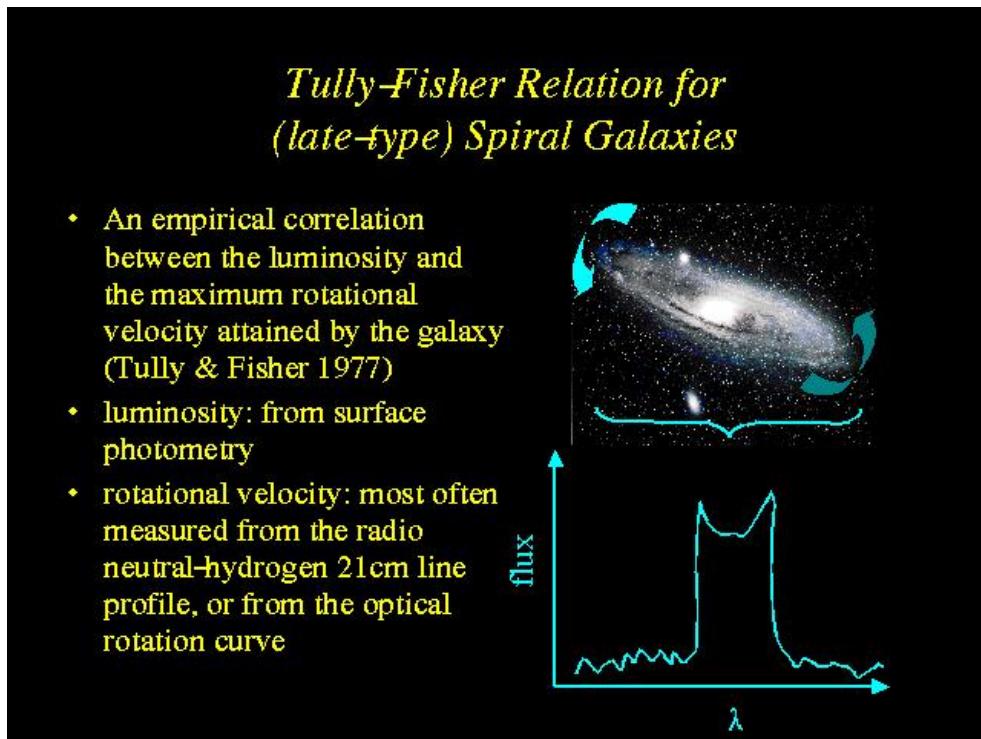
Las supernovas del tipo Ia son excelentes faros estándar muy potentes ya que sus magnitudes absolutas alcanzan -19. En realidad estas supernovas son muy raras, pero como cada imagen del cielo puede contener hasta 50000 galaxias, se pueden investigar hasta 1 millón de galaxias en una noche en un gran observatorio como el de Canadá-Francia-Hawaii. Dentro del millón de galaxias observadas, se pueden hallar algunas decenas de supernovas. La supernova SN 1999fv a una distancia de 9 mil millones de años-luz es la más distante supernova que se ha detectado hasta ahora.

## Ejemplo de supernova en una galaxia



La secuencia de imágenes muestra el rápido aumento de brillo, y posterior decaimiento más lento, de la explosión de una supernova en la galaxia NGC 1365.

# El método de Tully-Fisher



Este método se basa en que la magnitud absoluta de una galaxia está relacionada a su masa. La masa a su vez se relaciona a las velocidades con las cuales las estrellas y el gas rotan alrededor del centro galáctico. Por ejemplo, si se mide la velocidad de rotación del hidrógeno en la línea de 21 cm, cuanto más rápido rote el gas, esta línea se verá más ensanchada.

## La ley de Hubble y la determinación de distancias de galaxias

En términos del corrimiento de las líneas espectrales  $z = (\lambda - \lambda_o)/\lambda_o$ , la ley de Hubble se podía escribir:

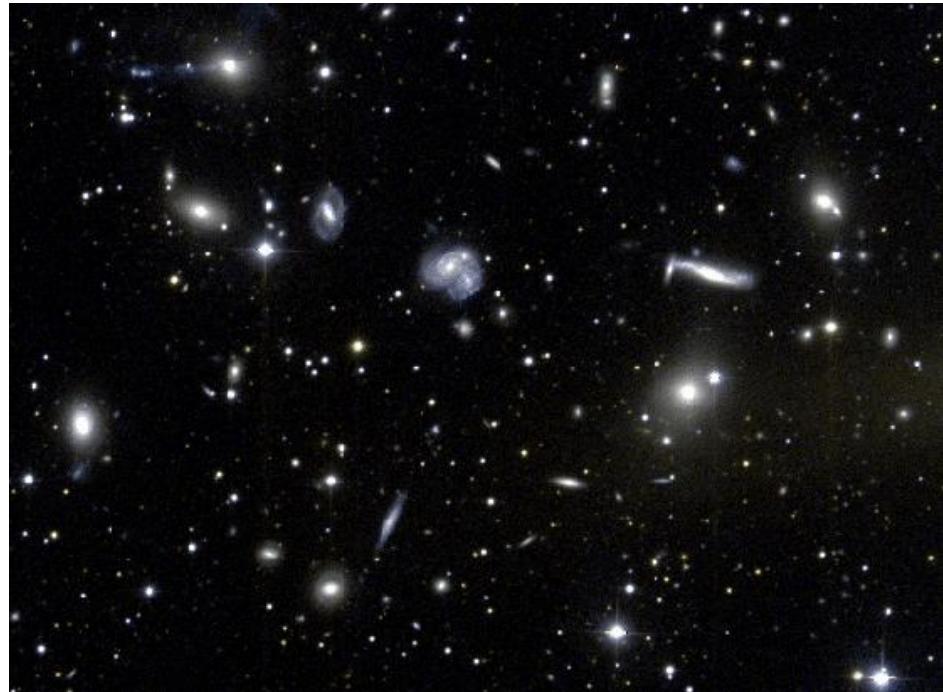
$$z = \left( \frac{H}{c} \right) r$$

donde  $H$  es la constante de Hubble y  $r$  la distancia de la galaxia. Para velocidades pequeñas ( $v \ll c$ ),  $z = v/c$  de donde:

$$v = Hr$$

El valor de  $H$  más aceptado al presente es:  $H = 75 \text{ km/s Mpc}^{-1}$ .

# El método de determinación de distancias basado en las galaxias más brillantes



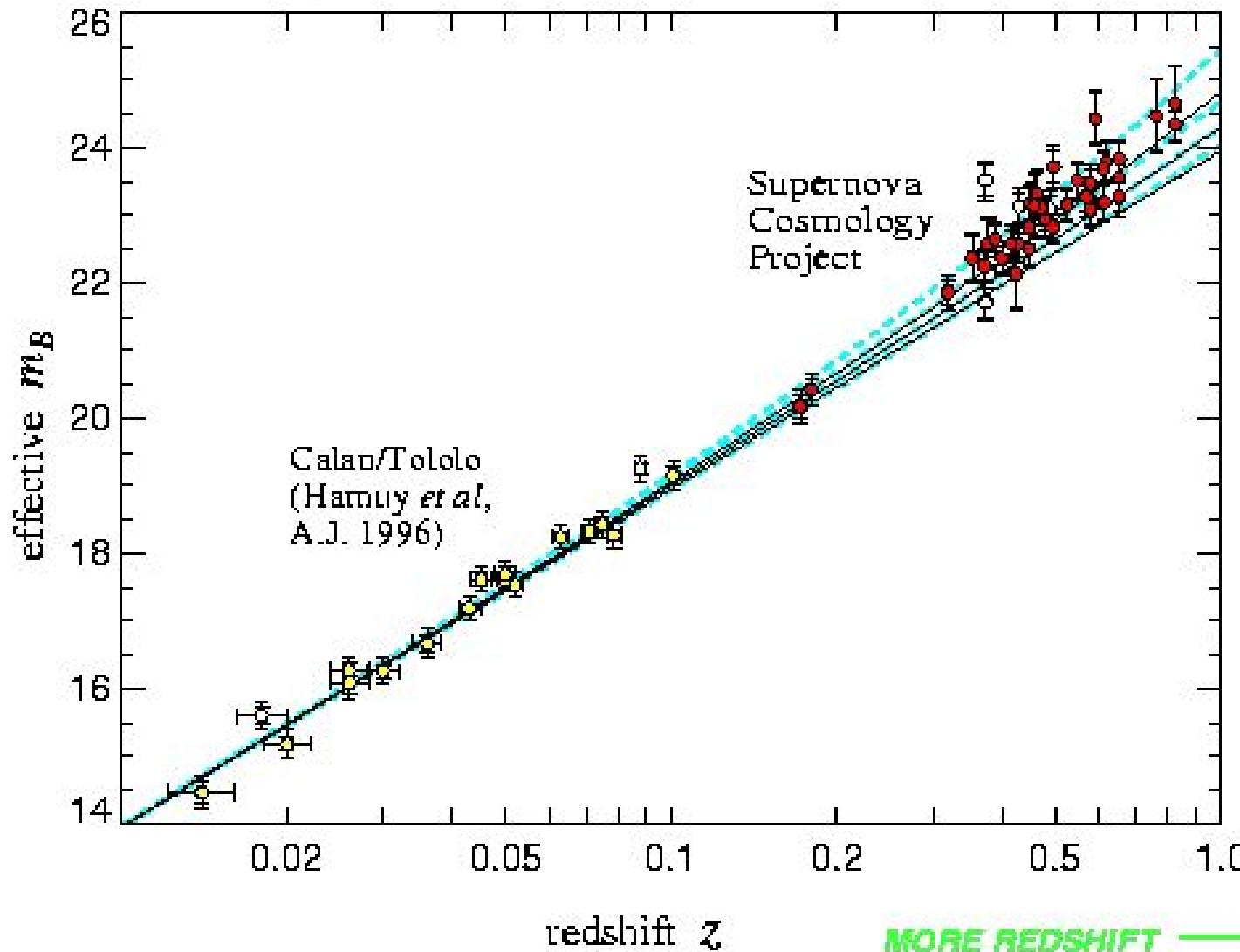
El cúmulo de galaxias de Hércules distante 650 millones de años-luz.

Para la ley de Hubble, también se pueden utilizar como faros estándar las galaxias más brillantes de un cúmulo para determinar su distancia. En efecto, las observaciones muestran que las galaxias más luminosas que existen en el universo tienen magnitudes absolutas  $M_o \simeq -23$ . Entonces, si  $M_o$  es la magnitud absoluta de la galaxia más brillante observada en un cúmulo y  $m$  su magnitud aparente, podemos aplicar la conocida relación:

$$m = M_o + 5 \log \left( \frac{r}{10 \text{ pc}} \right) = M_o + 5 \log \left( \frac{cz}{H \times 10 \text{ pc}} \right) = 5 \log z + C$$

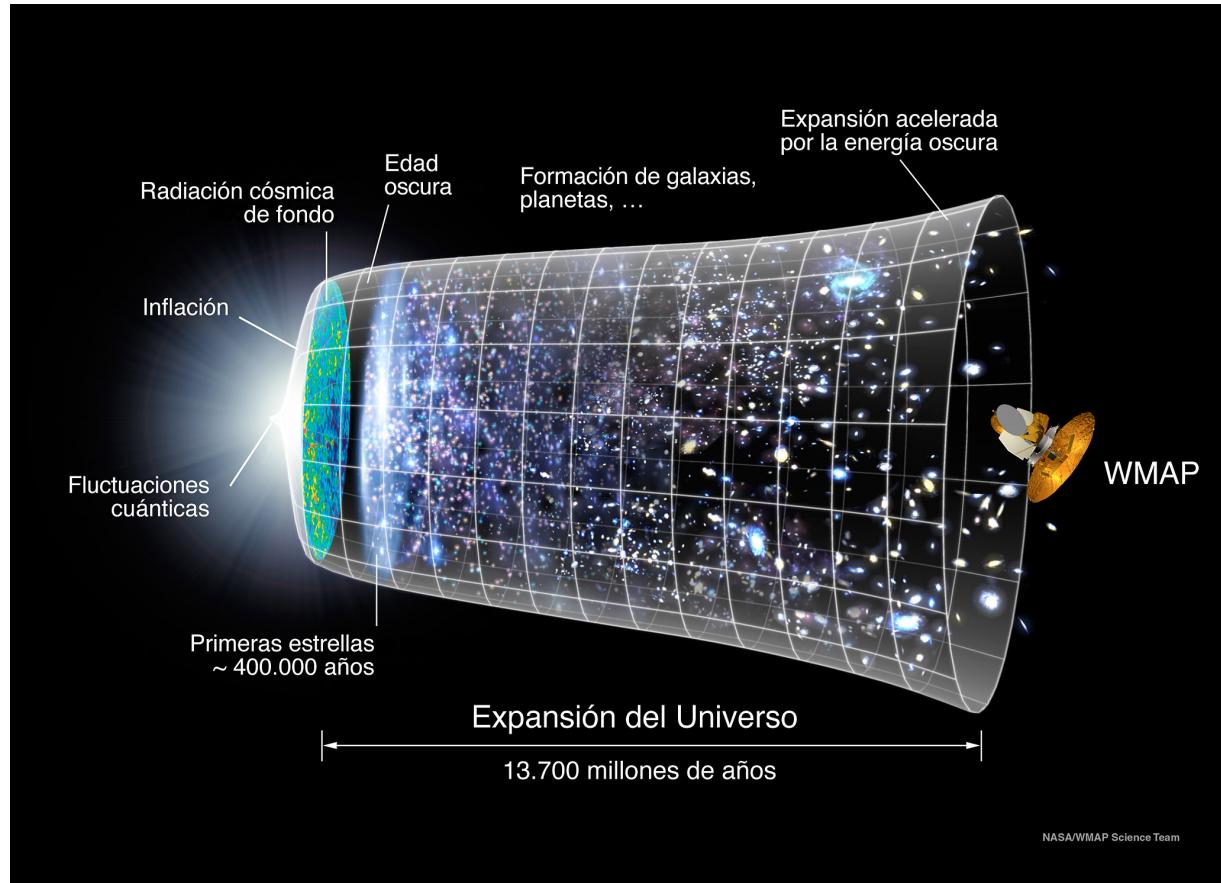
donde  $C$  es un parámetro que depende de  $M_o$  y  $H$ .

# Observaciones recientes sobre velocidades de expansión de galaxias



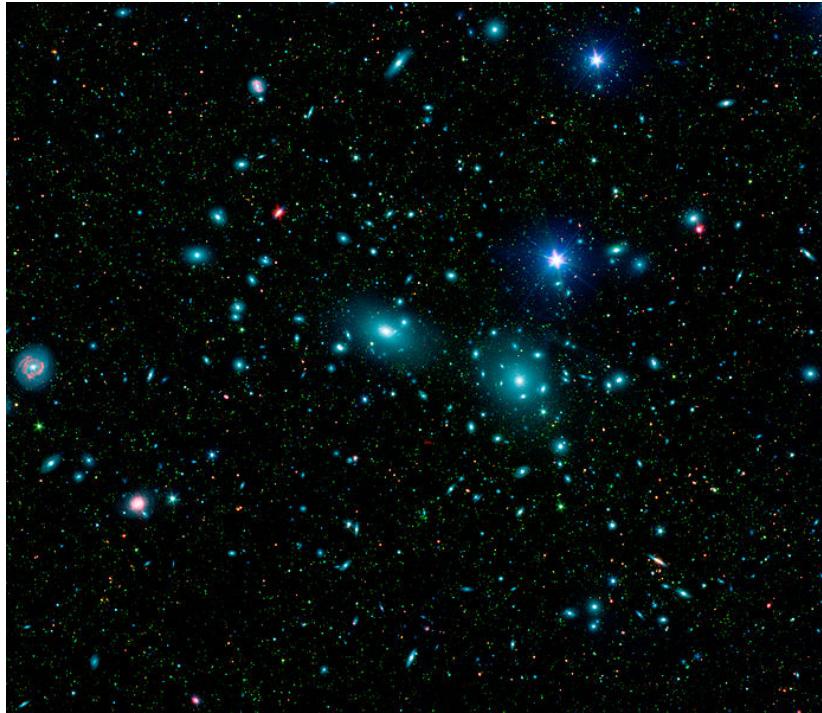
La ley de Hubble ha sido confirmada hasta corrimientos  $z \sim 1$ .

# El Big Bang

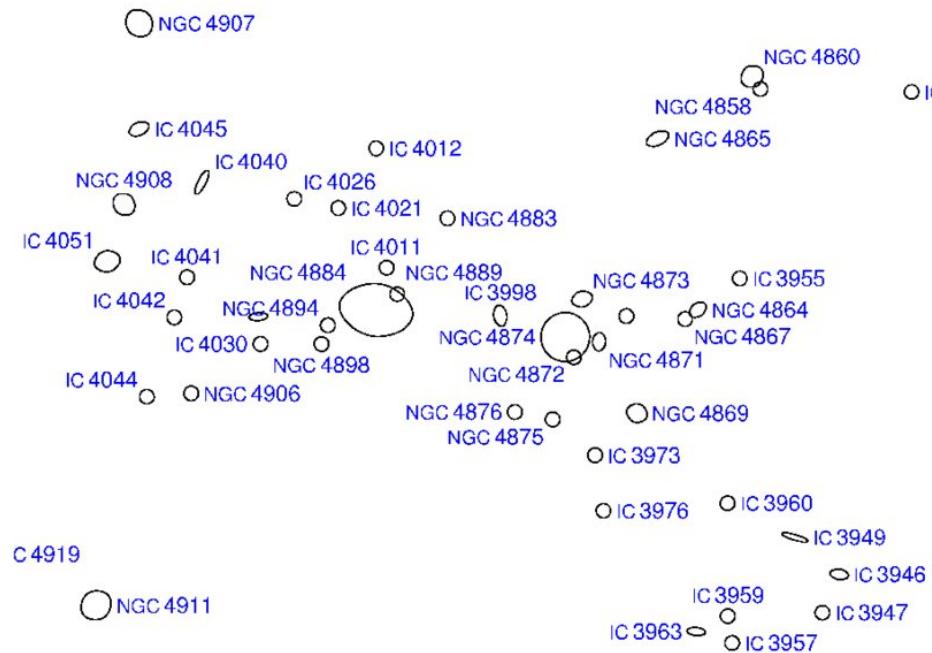


Si el universo está en continua expansión, las galaxias estuvieron alguna vez mucho más cerca entre sí . El tiempo  $T = 1/H \simeq 13 \times 10^9$  años representaría la edad del universo desde que comenzó la expansión a partir de un gran estallido o *big bang*.

# Cúmulos de galaxias. La existencia de materia oscura

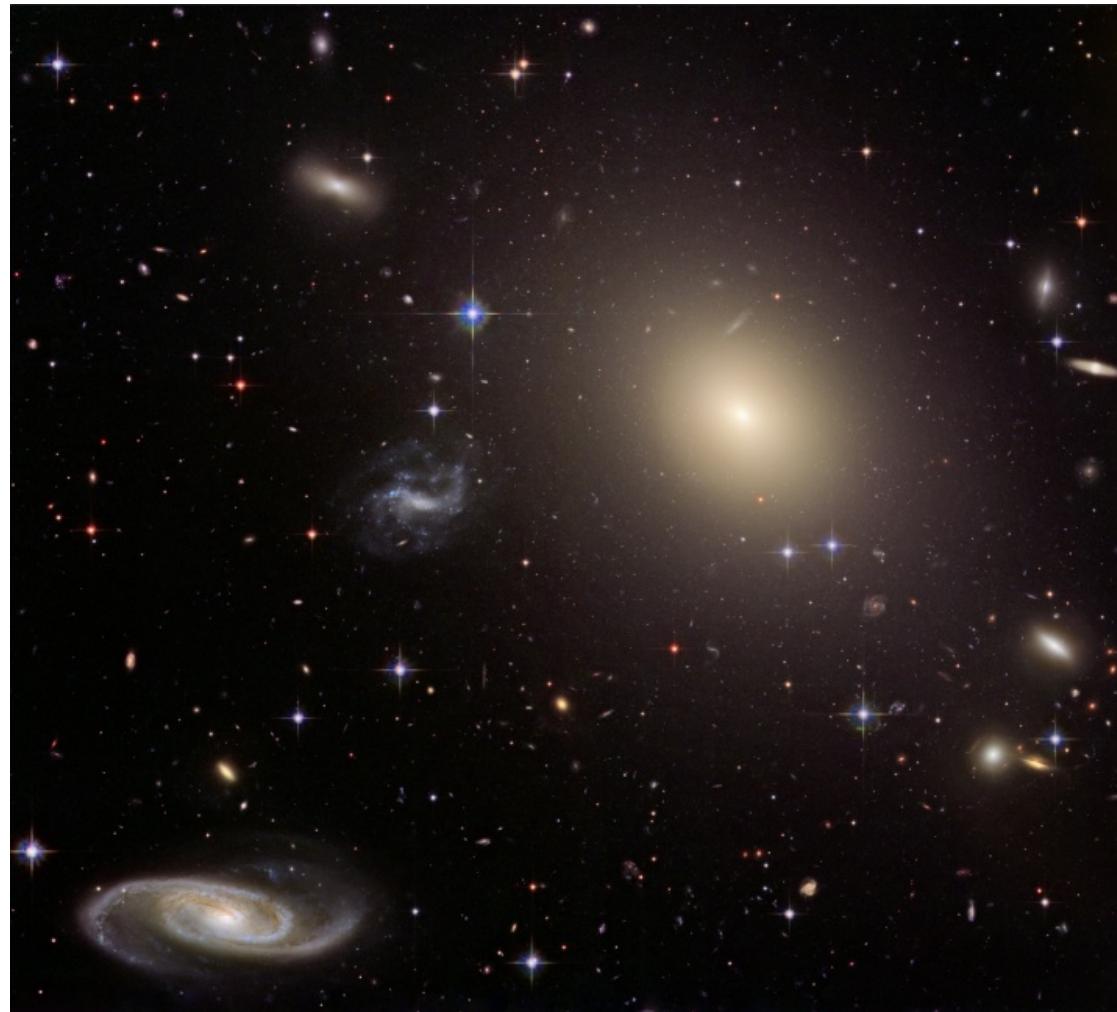


El cúmulo de Coma

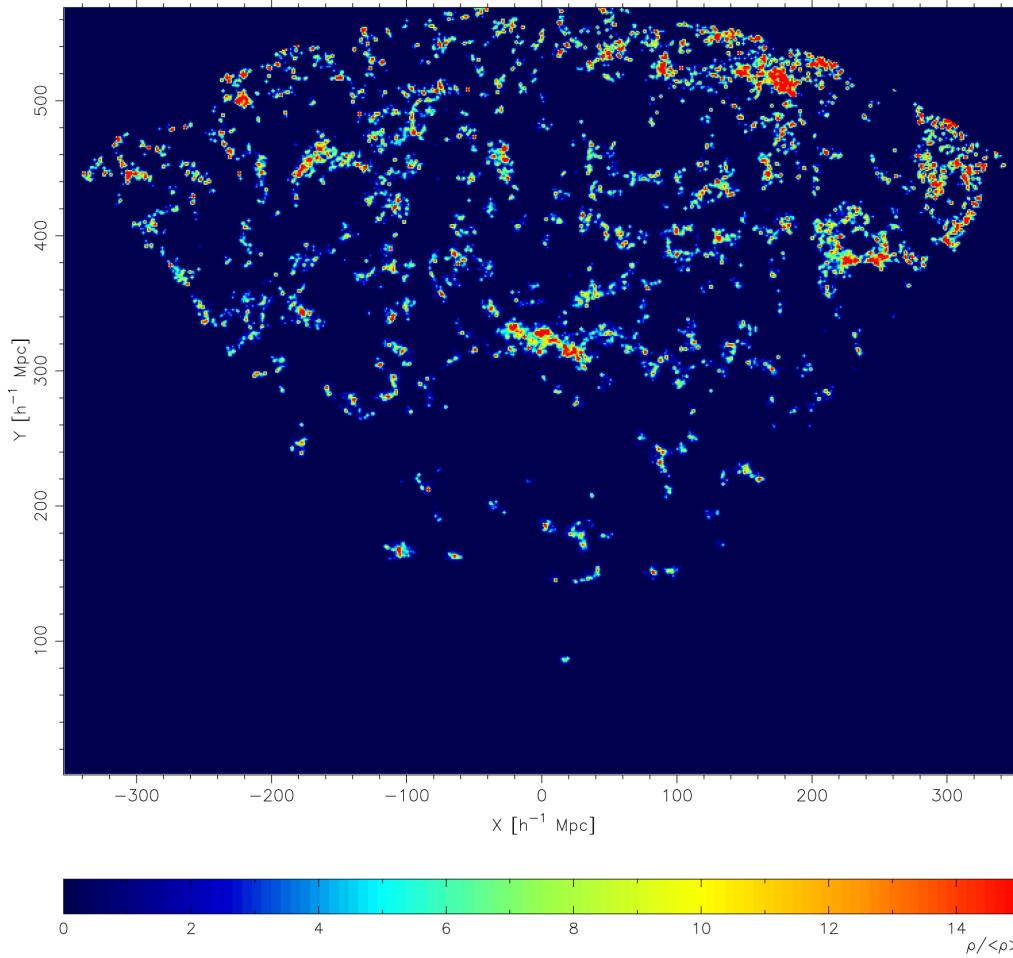


Se han identificado más de 1000 galaxias en este cúmulo. Es famoso por haber sido uno de los primeros lugares donde se detectaron anomalías gravitacionales que sugerían la presencia de materia oscura. En 1933 Fritz Zwicky demostró que las galaxias miembro de este cúmulo tenían velocidades demasiado altas para permanecer gravitacionalmente ligadas por la materia visible. Zwicky introdujo la idea de la presencia de alguna forma de *materia oscura* que incrementaba el campo gravitacional.

## Los supercúmulos de galaxias

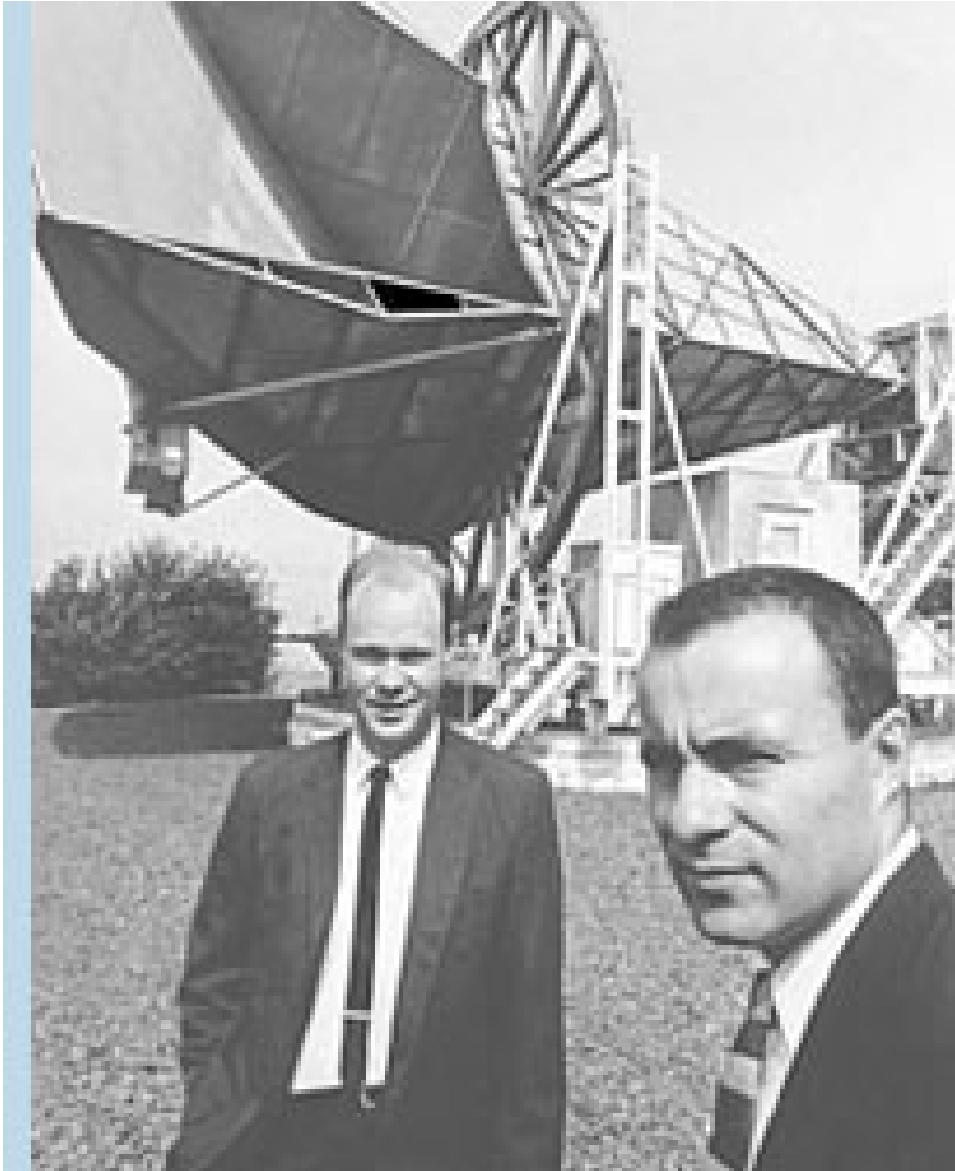


El cúmulo de galaxias de Abell distante 450 millones de años-luz de la Tierra (Telescopio Espacial Hubble, NASA).



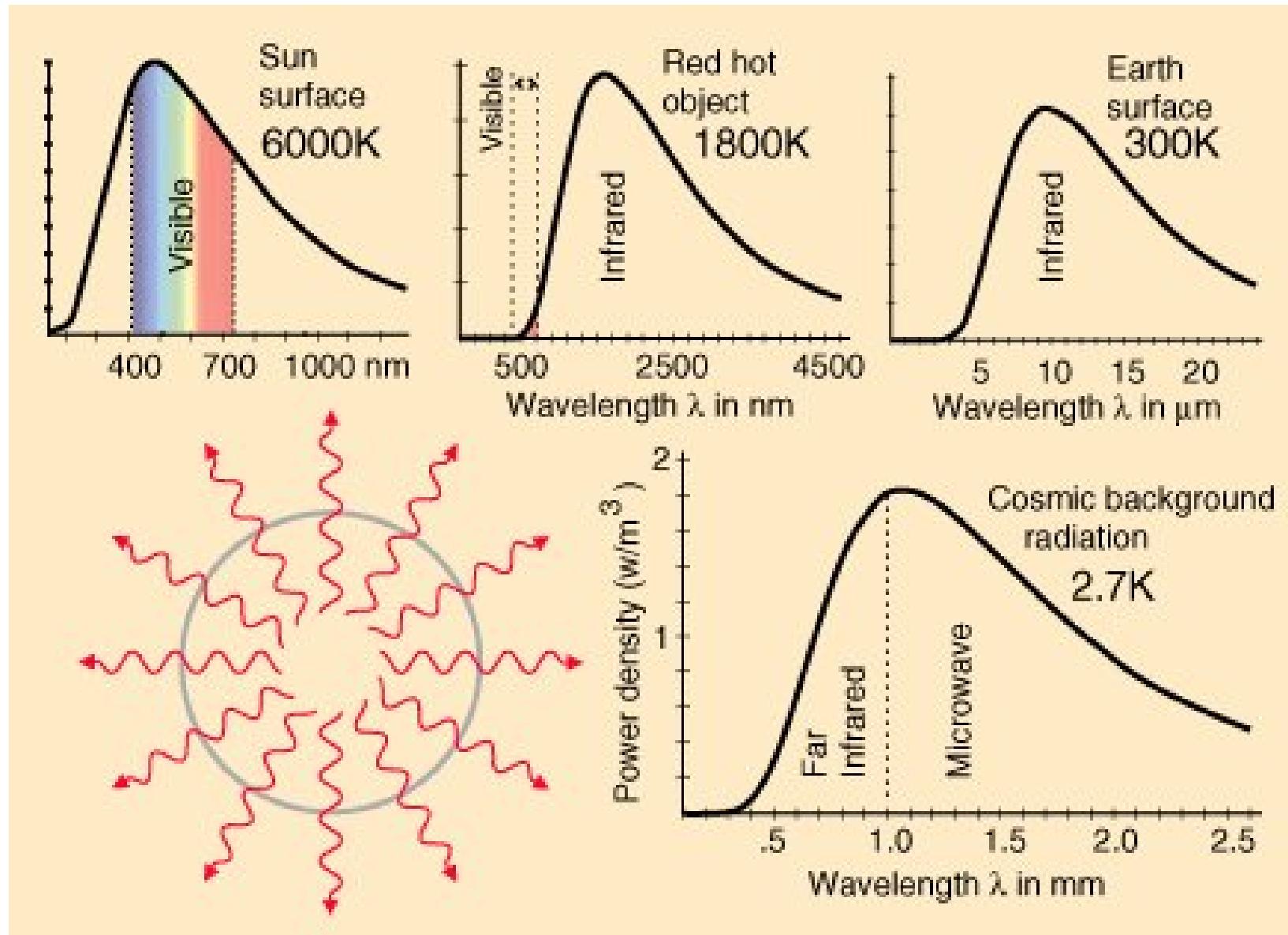
La observación de la distribución espacial de los supercúmulos muestra homogeneidad e isotropía a gran escala, y zonas de vacío a pequeña escala. La estructura se asemeja a una sección eficaz de burbujas con radios de decenas de Mpc. Las regiones en el interior de las burbujas están mayormente desprovistas de galaxias.

## El descubrimiento de la radiación de fondo



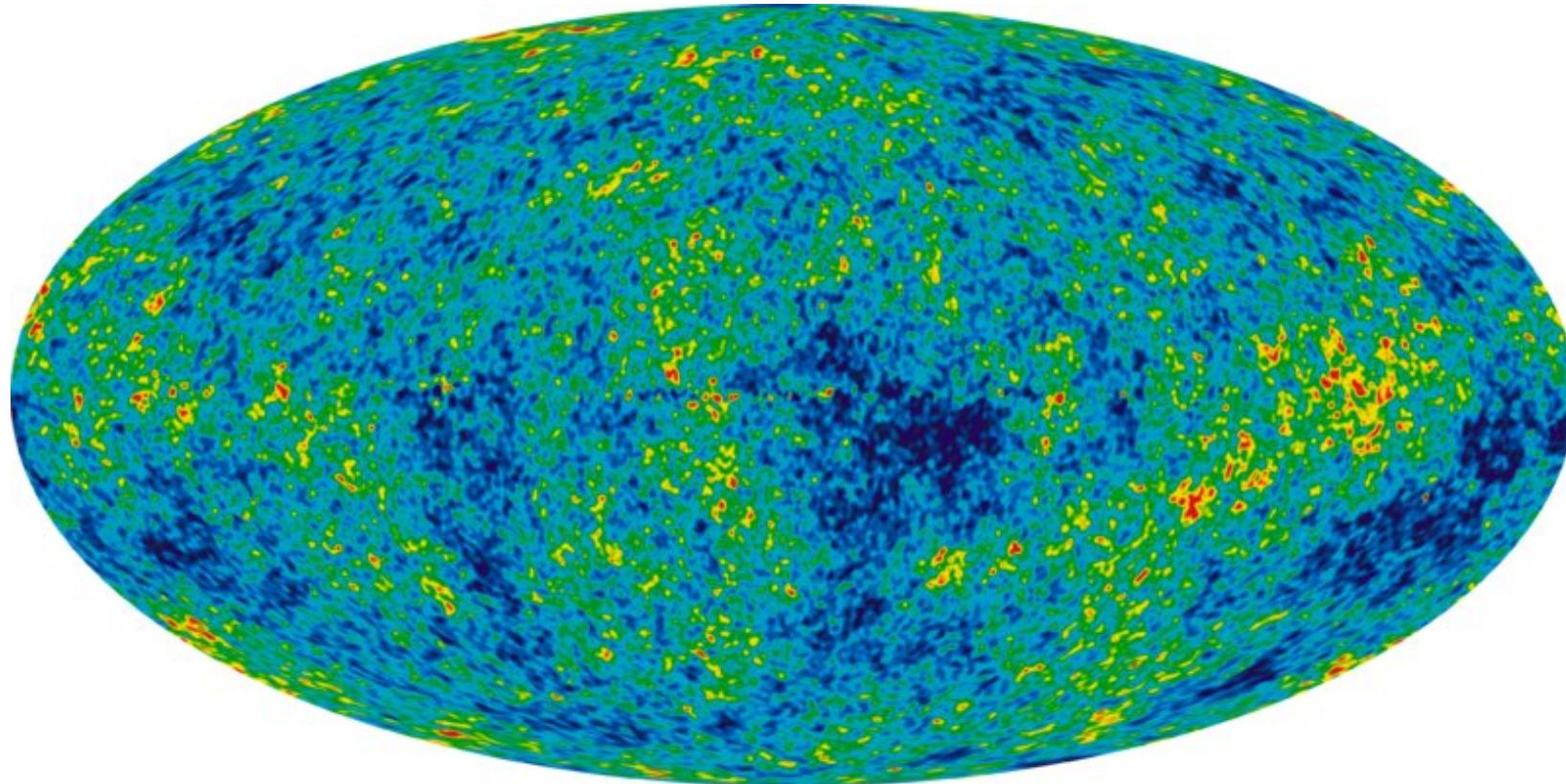
En 1965 Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron una radiación de fondo que corresponde a la de un cuerpo negro a una temperatura de 2,7 K.

Esta radiación sería una reliquia de la radiación extremadamente caliente que llenó el universo en sus primeras fases de expansión.



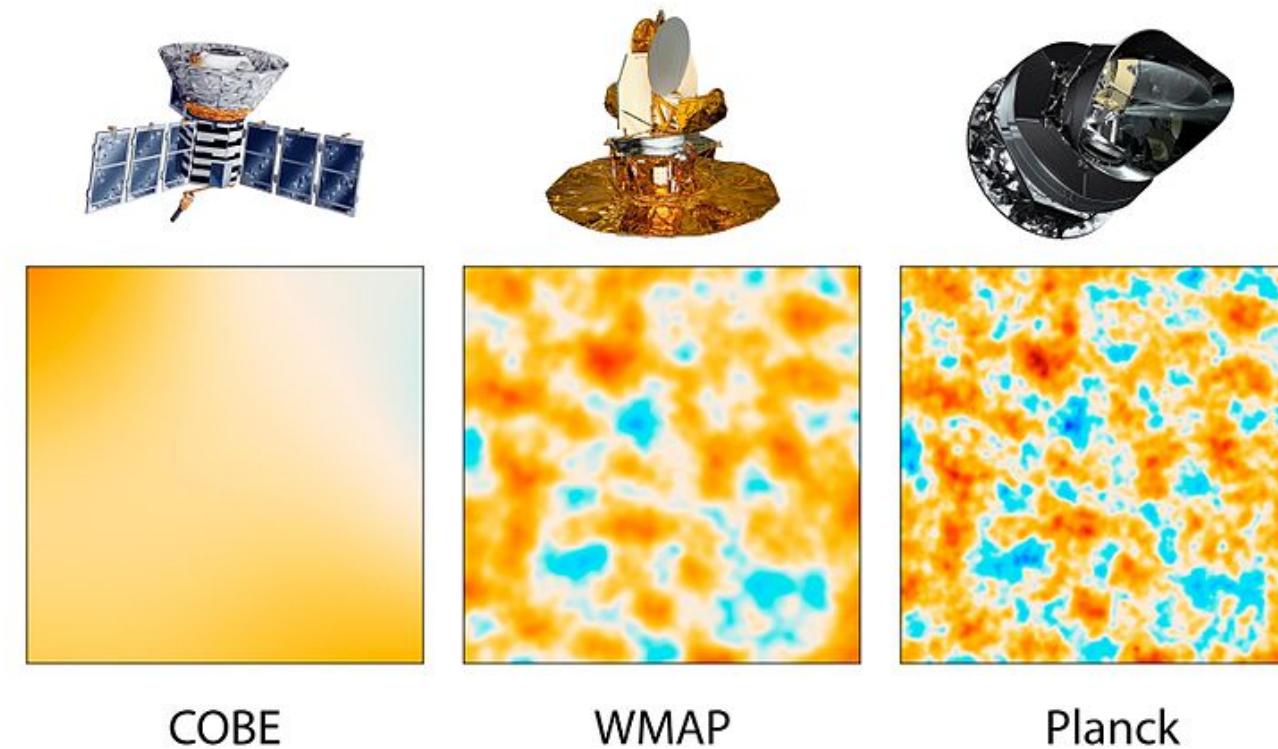
Curvas de Planck para objetos de diferentes temperaturas, incluyendo la radiación cósmica de fondo.

## Recientes observaciones de la radiación de fondo



El satélite COBE (*Cosmic Background Explorer*) refinó la temperatura al valor  $2,73 \pm 0,06$  K. Este satélite también detectó variaciones de temperatura de una amplitud de  $6 \times 10^{-6}$ . Estas se interpretan como un corrimiento gravitacional del fondo producido por las concentraciones de masa que posteriormente darían origen a las estructuras del universo.

## Datos de otras misiones espaciales



Despues de COBE, se lanzaron WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) en 2001 y Planck en 2009. El objetivo de estas misiones fue medir las diferencias de temperatura en la radiación de microndas de fondo, y de allí deducir la geometría, contenido y evolución del universo. Se refinó el valor de la constante de Hubble:  $H = 67,80 \pm 0.77$  (km/s)/Mpc.