

PERSPECTIVA ACTUAL DEL UNIVERSO

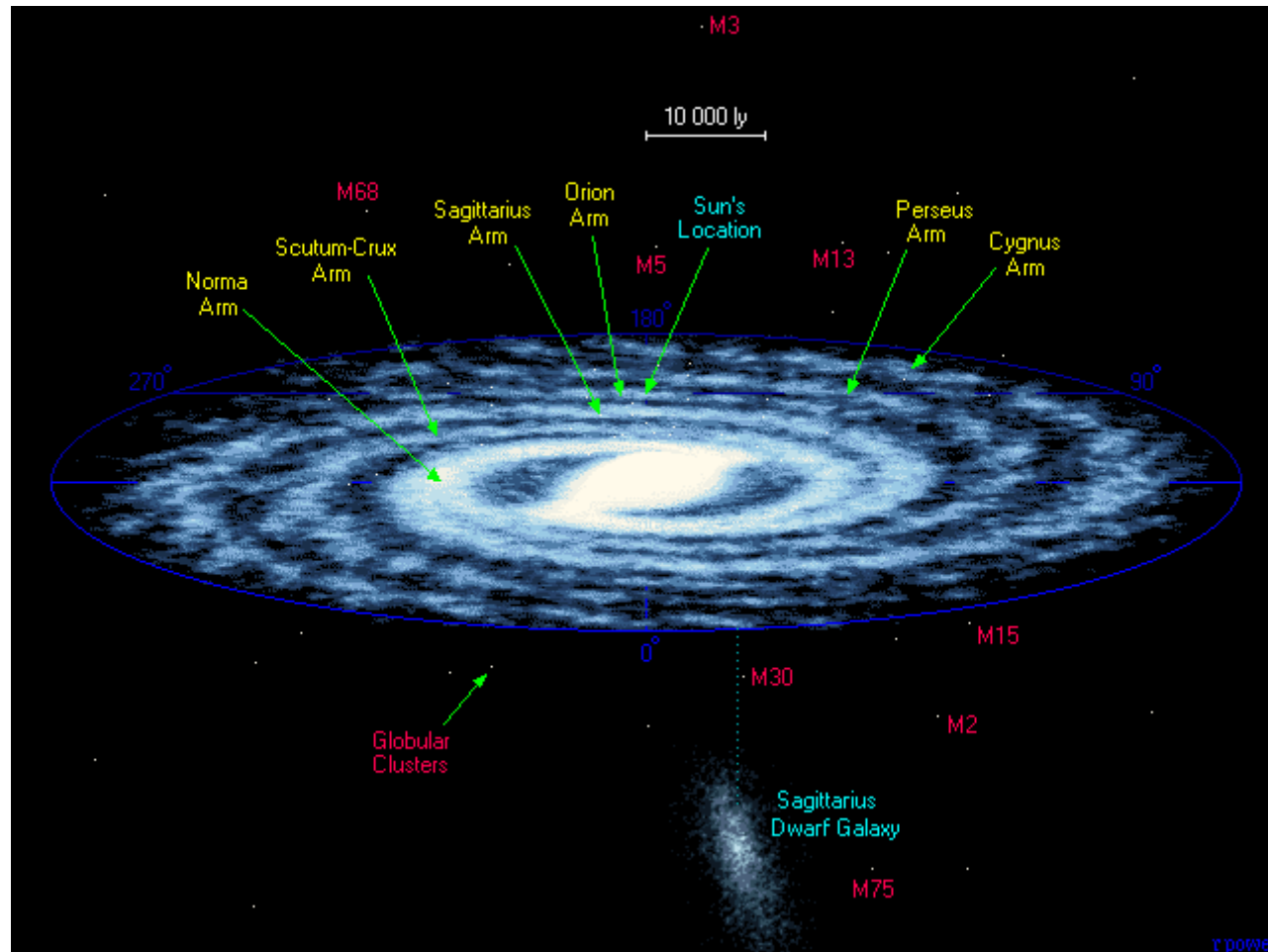
Diego Pavón

Dept. de Física, UAB

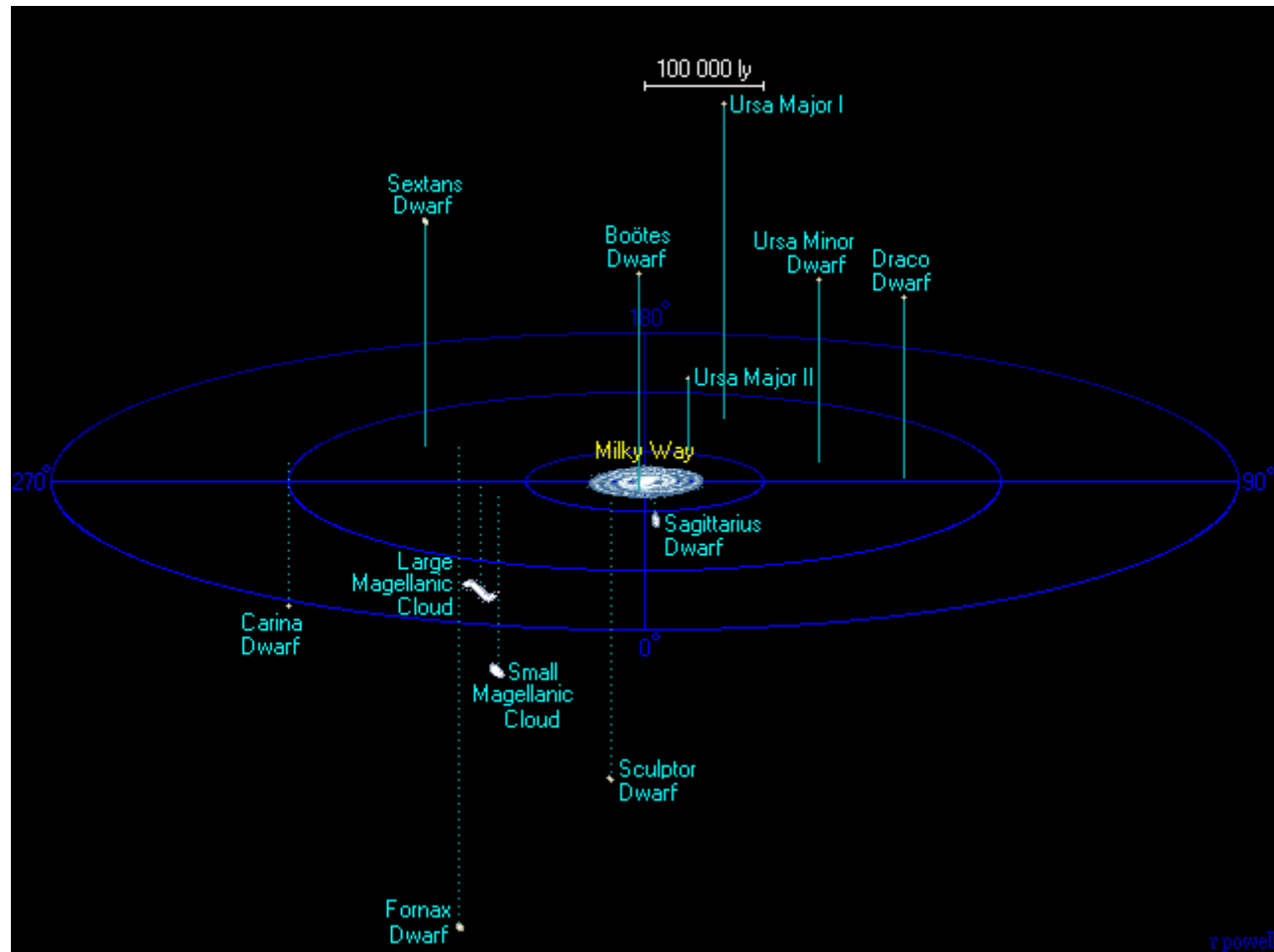
Sábados de la Física

Bellaterra, 22 febrero 2014

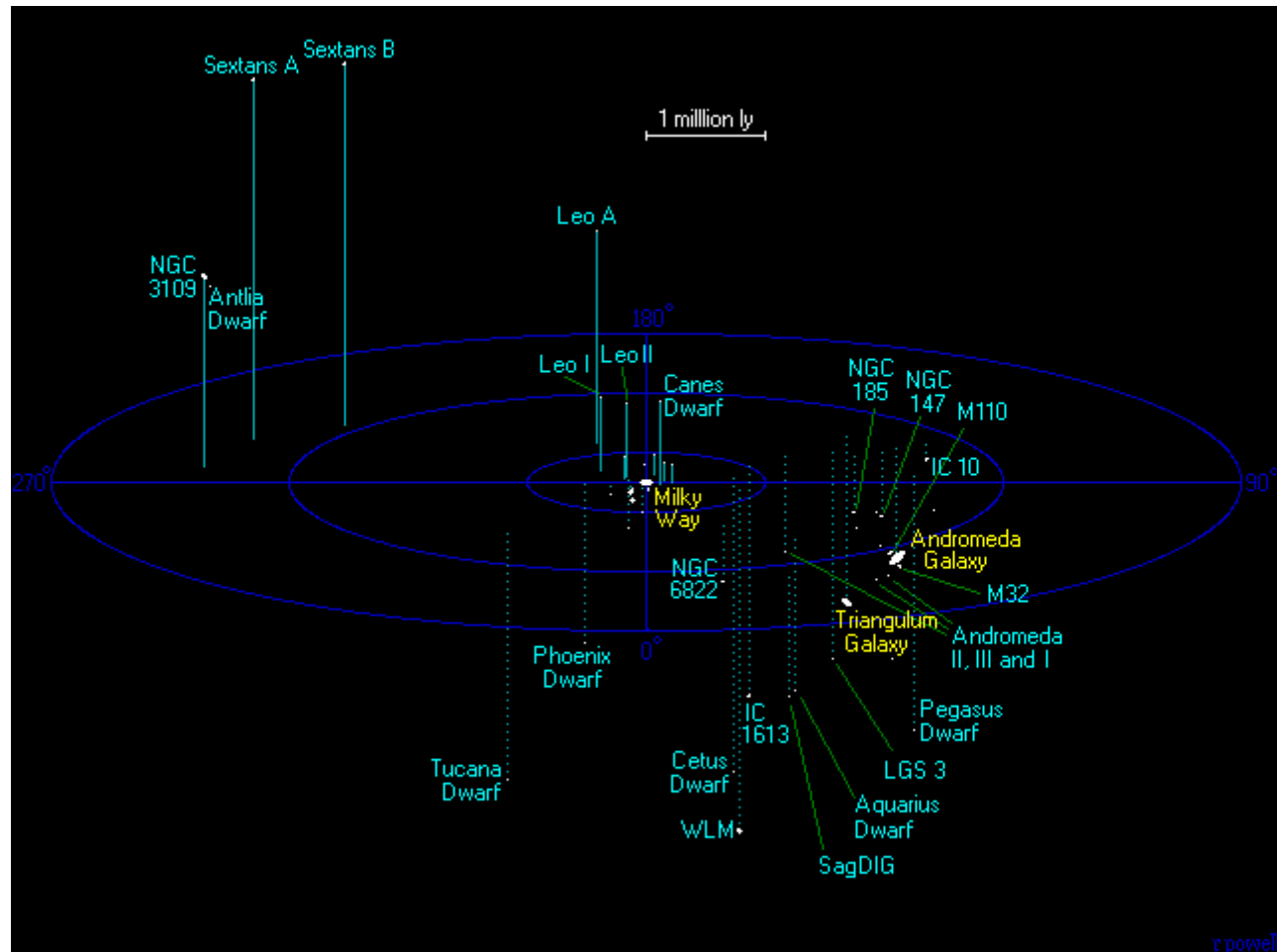




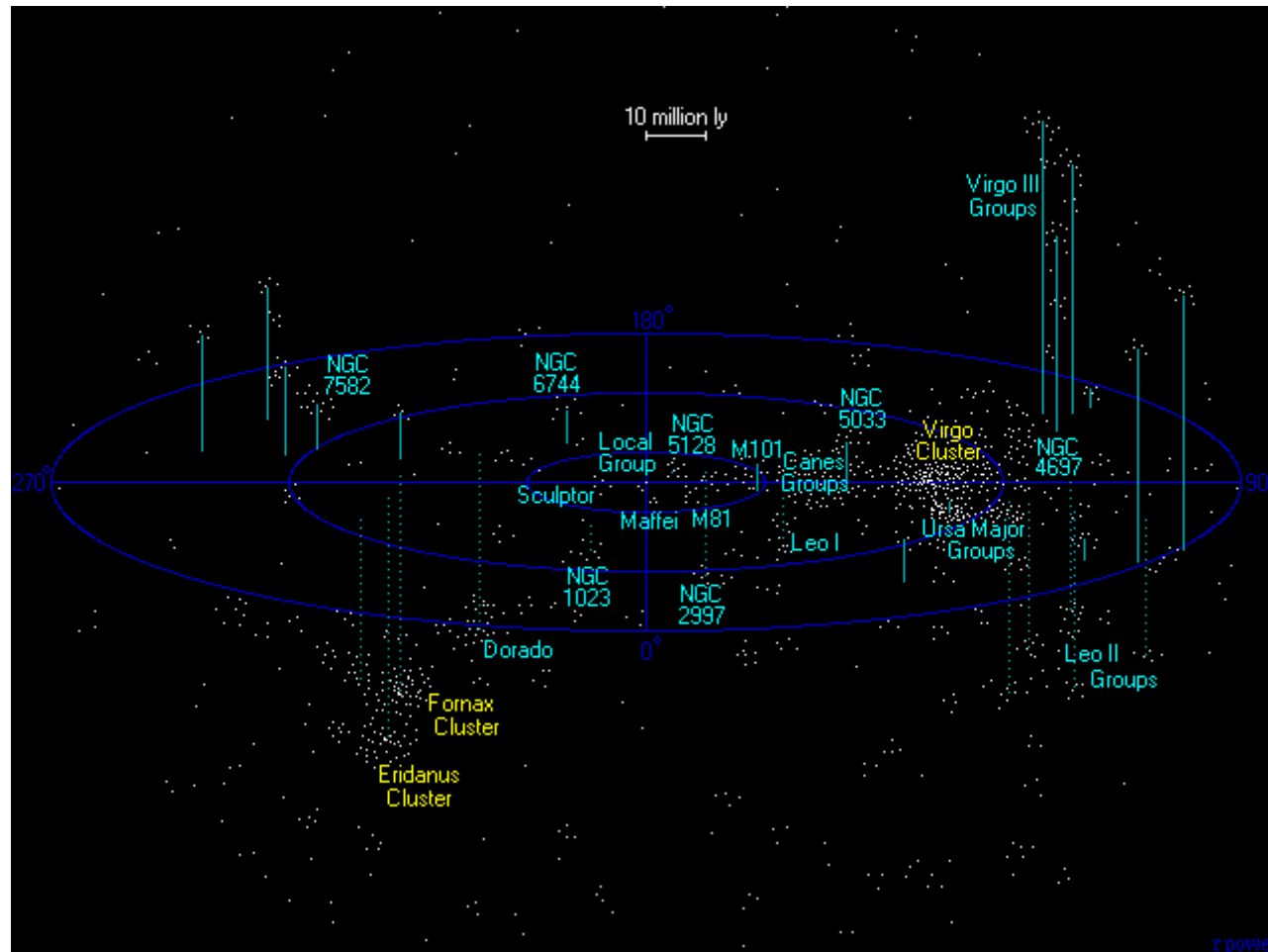
La Galaxia vista desde 50 mil años-luz



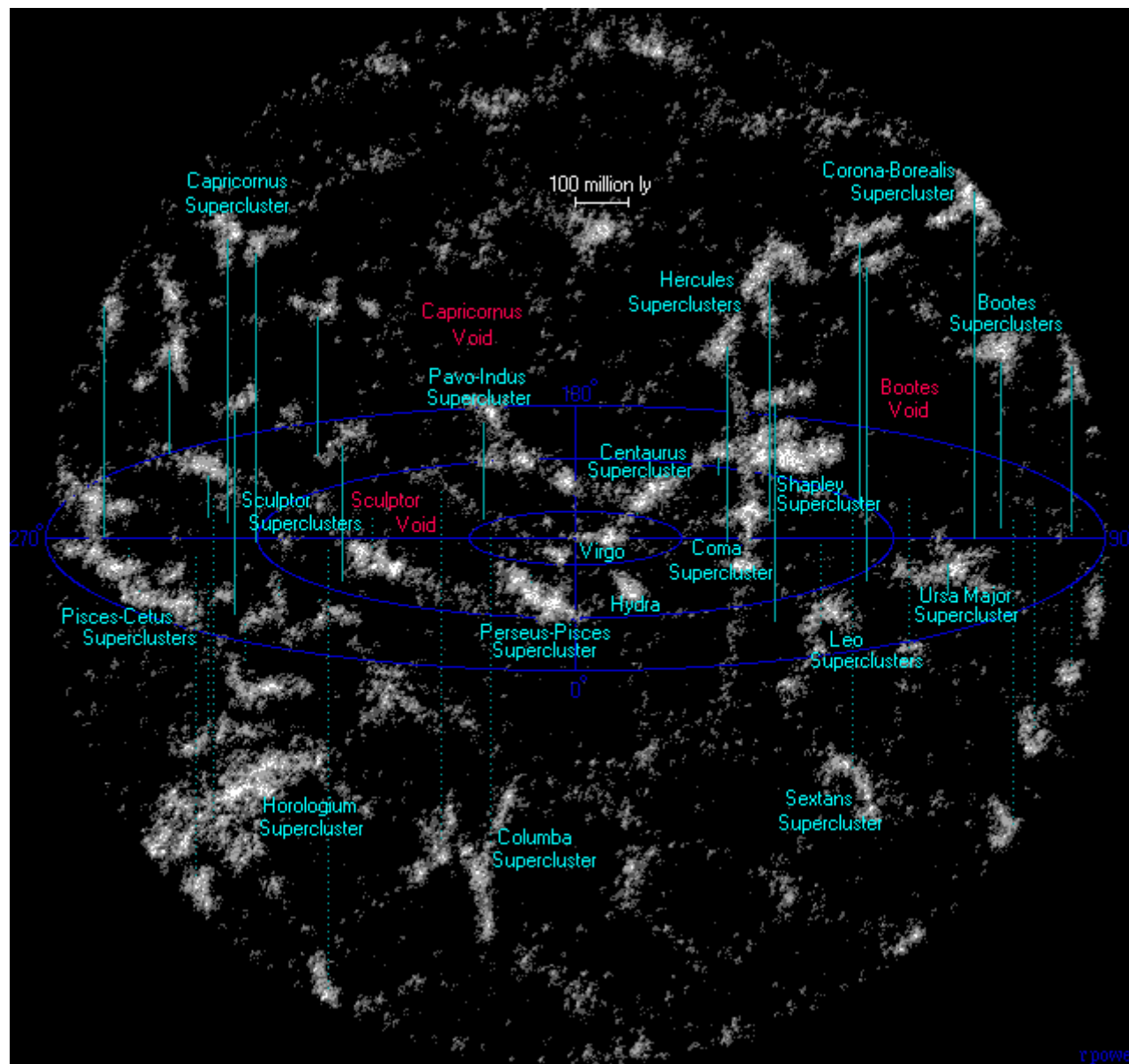
La Galaxia vista desde 500 mil años-luz



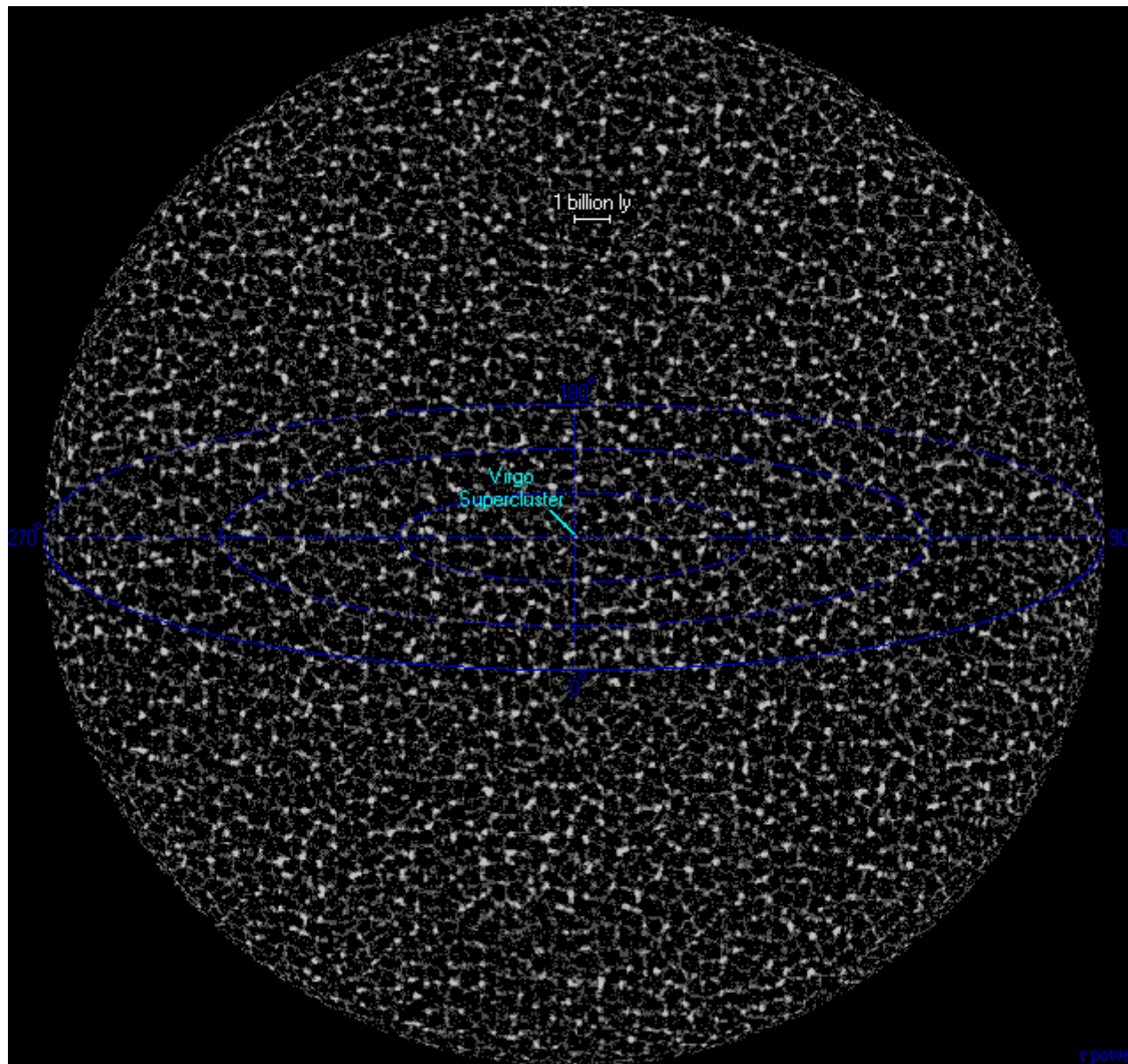
El Grupo Local (5 millones año-luz)



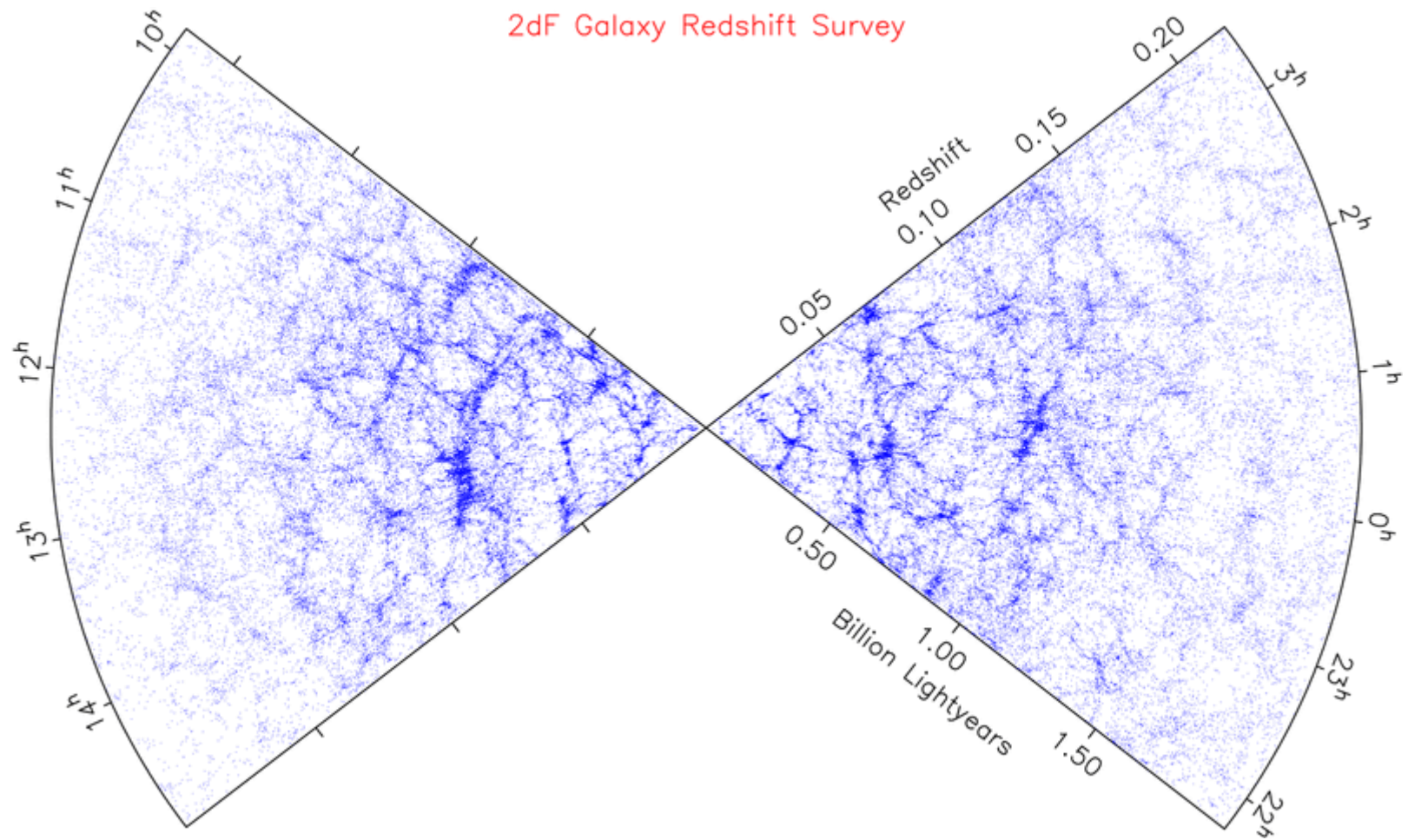
Supercúmulo de Virgo (100 millones de años-luz)



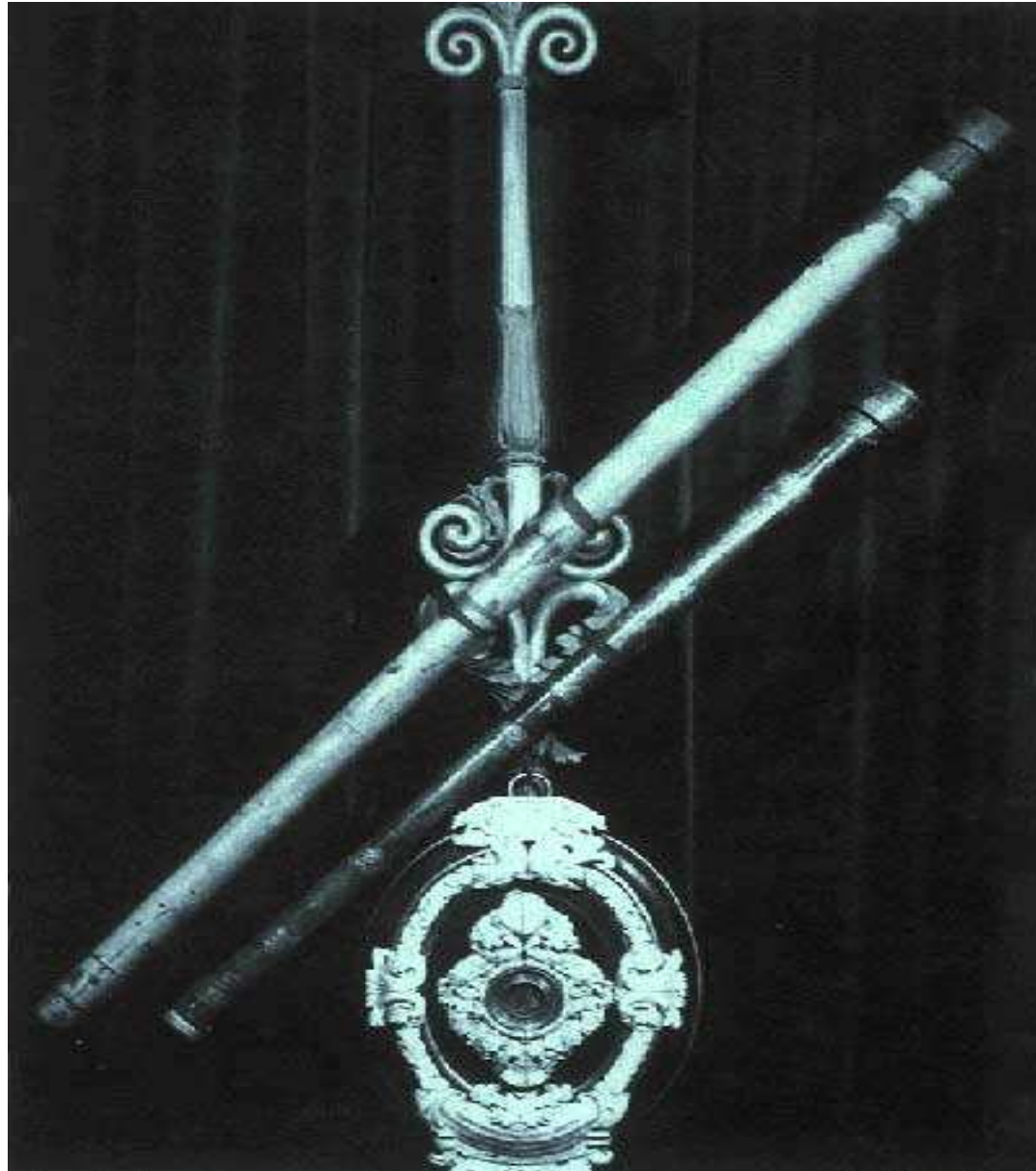
Supercúmulos vecinos (1000 millones de años-luz)



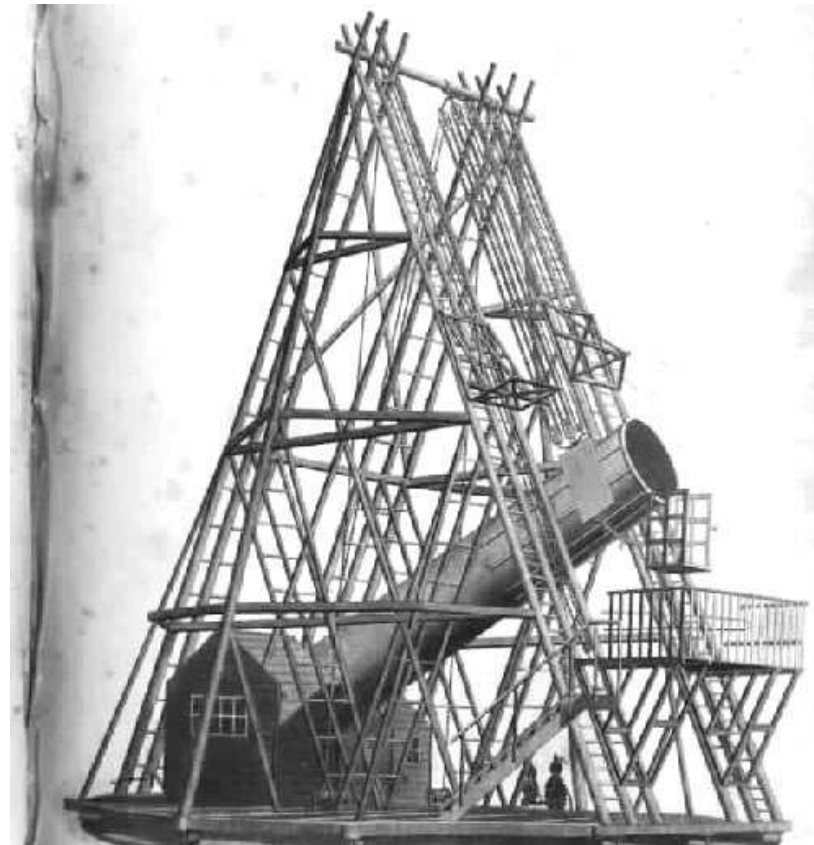
Snap-shot de 14 mil millones de años-luz
(Adviértase la uniformidad)



Cosmic web



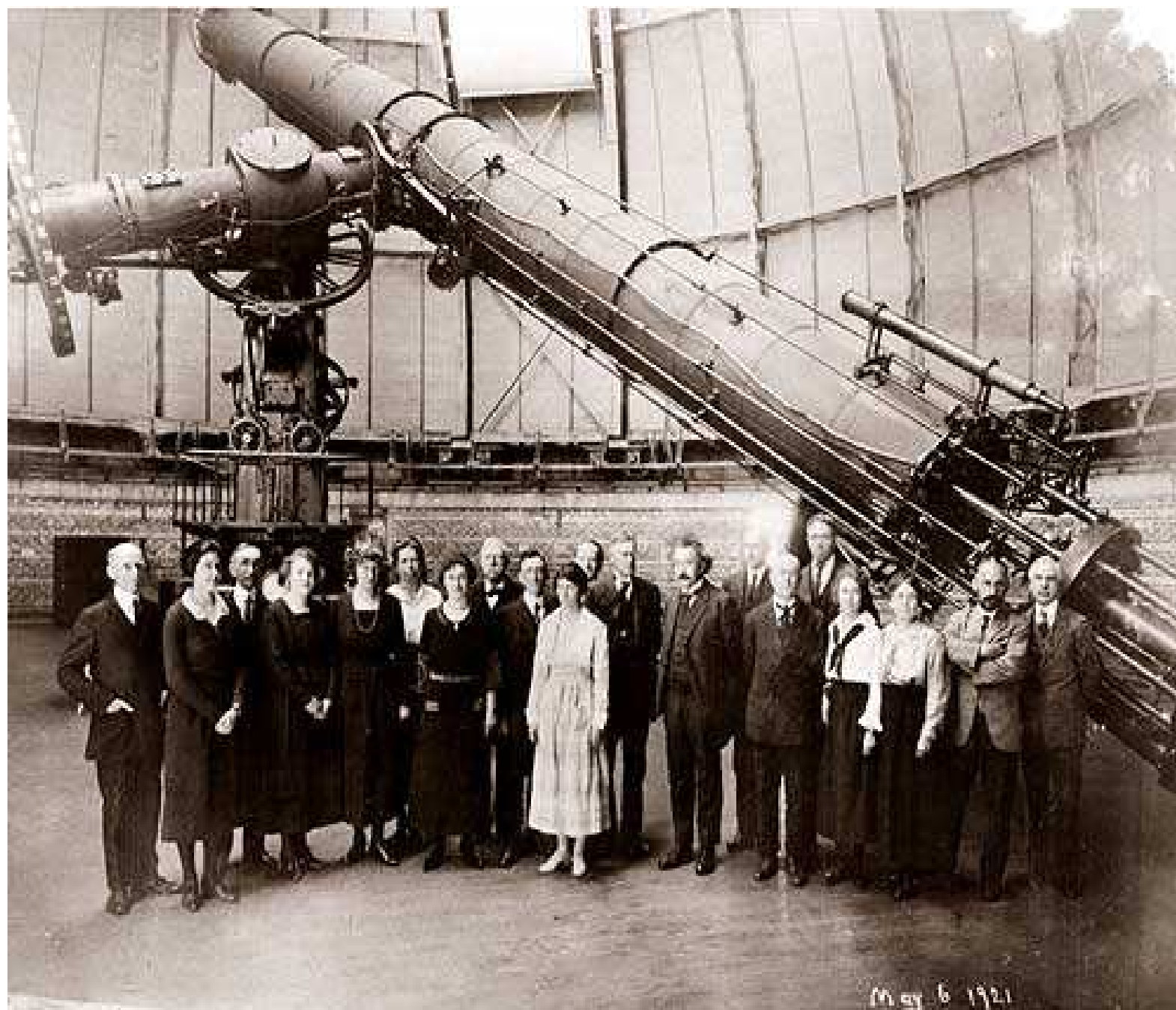
Telescopio de Galileo

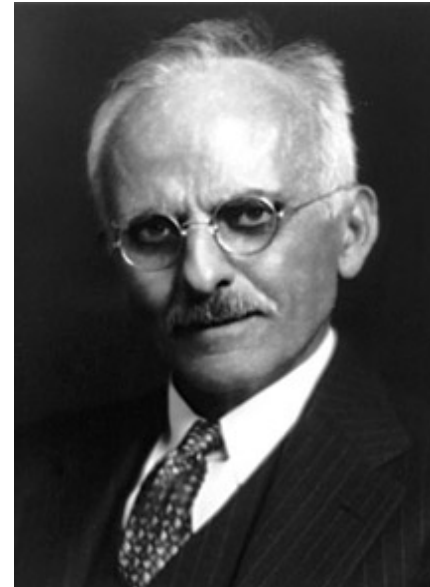


Telescopio Herschel



Rivabellosa (Álava), 1860





Harlow Shapley y Heber D. Curtis protagonizaron “el Gran Debate” (en 1920) sobre si las nebulosas espirales pertenecen o no a la Vía Láctea y si son sistemas de estrellas análogos a nuestra galaxia.



Galaxia espiral M101

Observación + Principio Cosmológico (Copérnico)

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - K r^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

$K=1$ (cerrado), $K=0$ (plano), $K=-1$ (hiperboloide)

Redshift

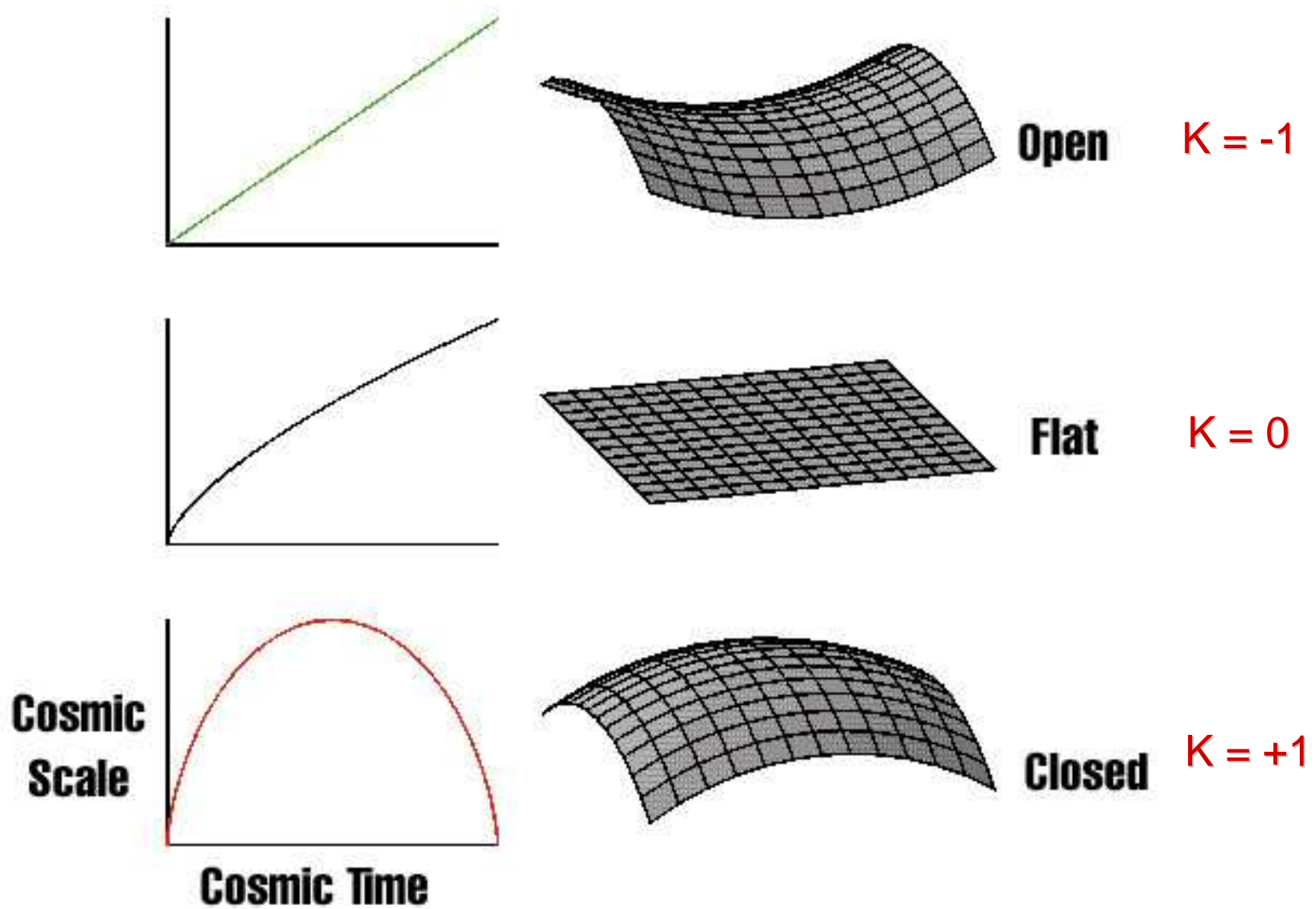
$$1 + z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}} = \frac{a_0}{a(t_{em})}$$

Factor de Hubble

$$H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$$

Factor de desaceleración

$$q \equiv - \frac{\ddot{a}}{a H^2}$$



Las 3 posibles geometrías de la parte espacial del espacio-tiempo

RELATIVIDAD GENERAL

- Principio de Equivalencia
- Principio de Covariancia
- Límite newtoniano

$$R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab}$$

Sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden, no lineales, en derivadas parciales para el tensor métrico g_{ab}

“El espacio le dice a la materia cómo se ha de mover y la materia le dice al espacio como se ha de curvar” (John Wheeler)

La conservación del momento y la energía es inherente a la teoría

$$T^{ab}_{;b} = 0$$

UNIVERSO DE EINSTEIN

Universo homogéneo e isótropo con materia polvo & constante cosmológica

$$3H^2 + 3\frac{K}{a^2} = 8\pi G \rho_0 + \Lambda$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + H^2 + \frac{K}{a^2} = \Lambda$$

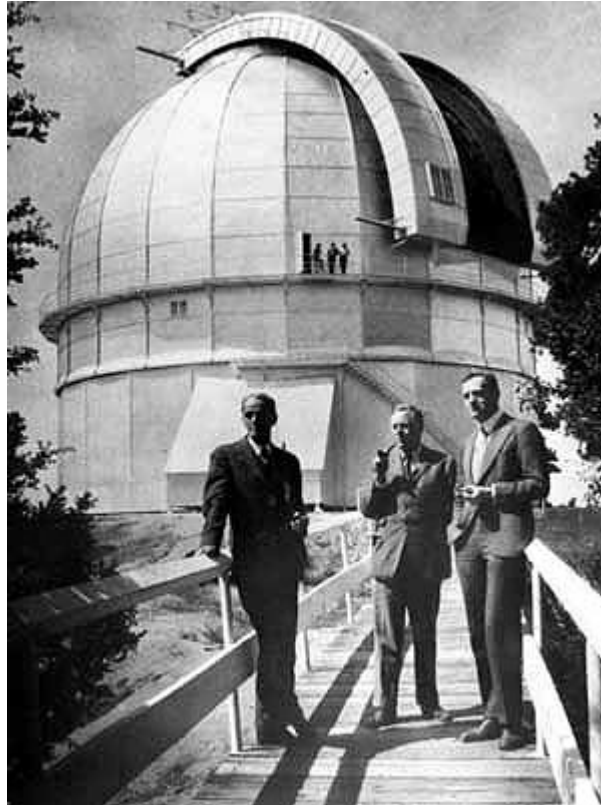
$$\dot{a} = \ddot{a} = 0 \quad \Rightarrow \quad \rho_0 = \frac{\Lambda}{4\pi G} > 0, \quad K = +1, \quad a = 1/\sqrt{\Lambda}$$

Inconveniente: una pequeña perturbación

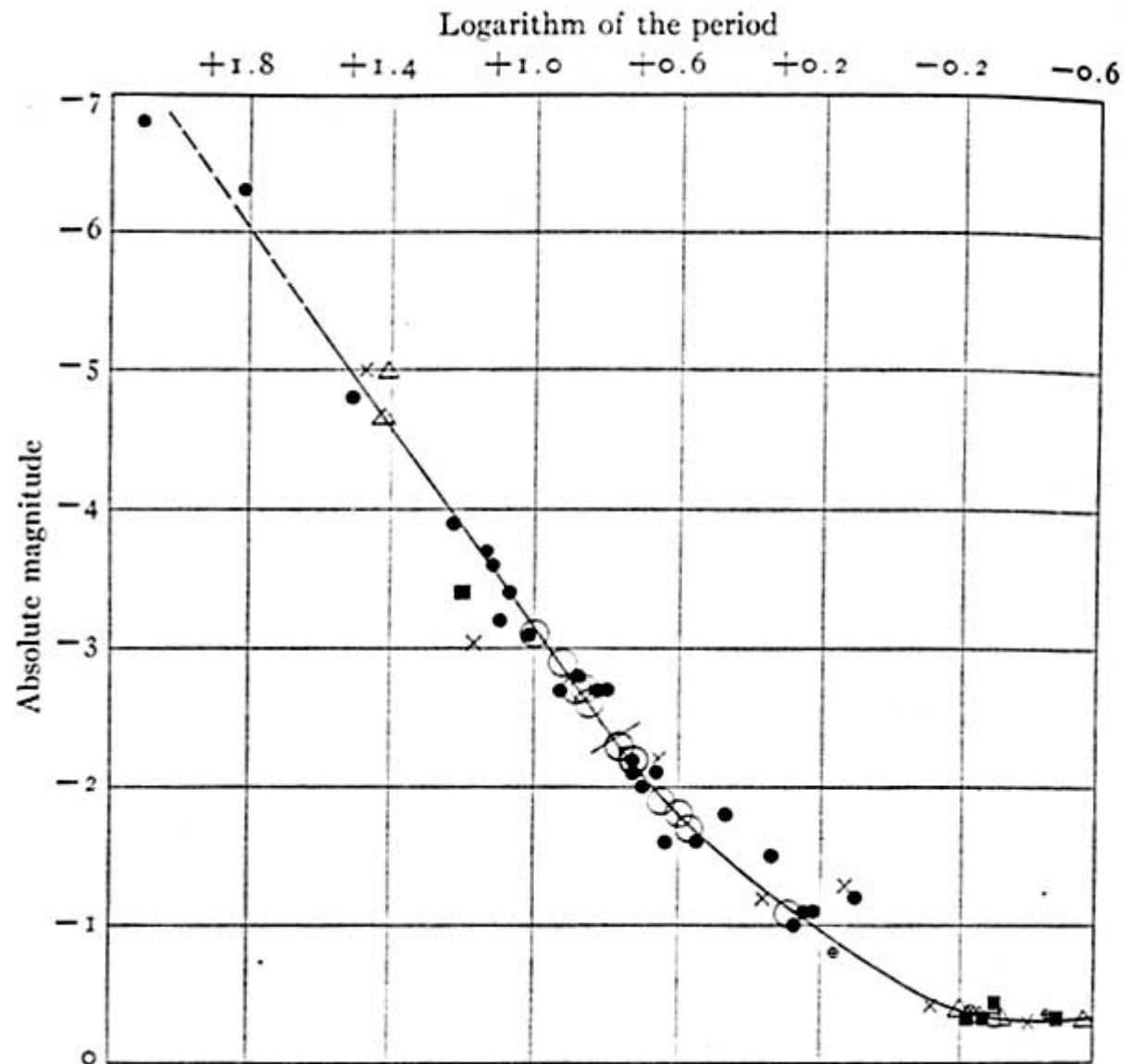
$$a = \frac{1}{\sqrt{\Lambda}} + \delta a \quad \rho_0 = \frac{\Lambda}{4\pi G} + \delta \rho_0$$

conduce a $\delta\ddot{a} = \Lambda \delta a \quad \Rightarrow \quad \delta a = A \exp(\sqrt{\Lambda} t) + B \exp(\sqrt{-\Lambda} t)$

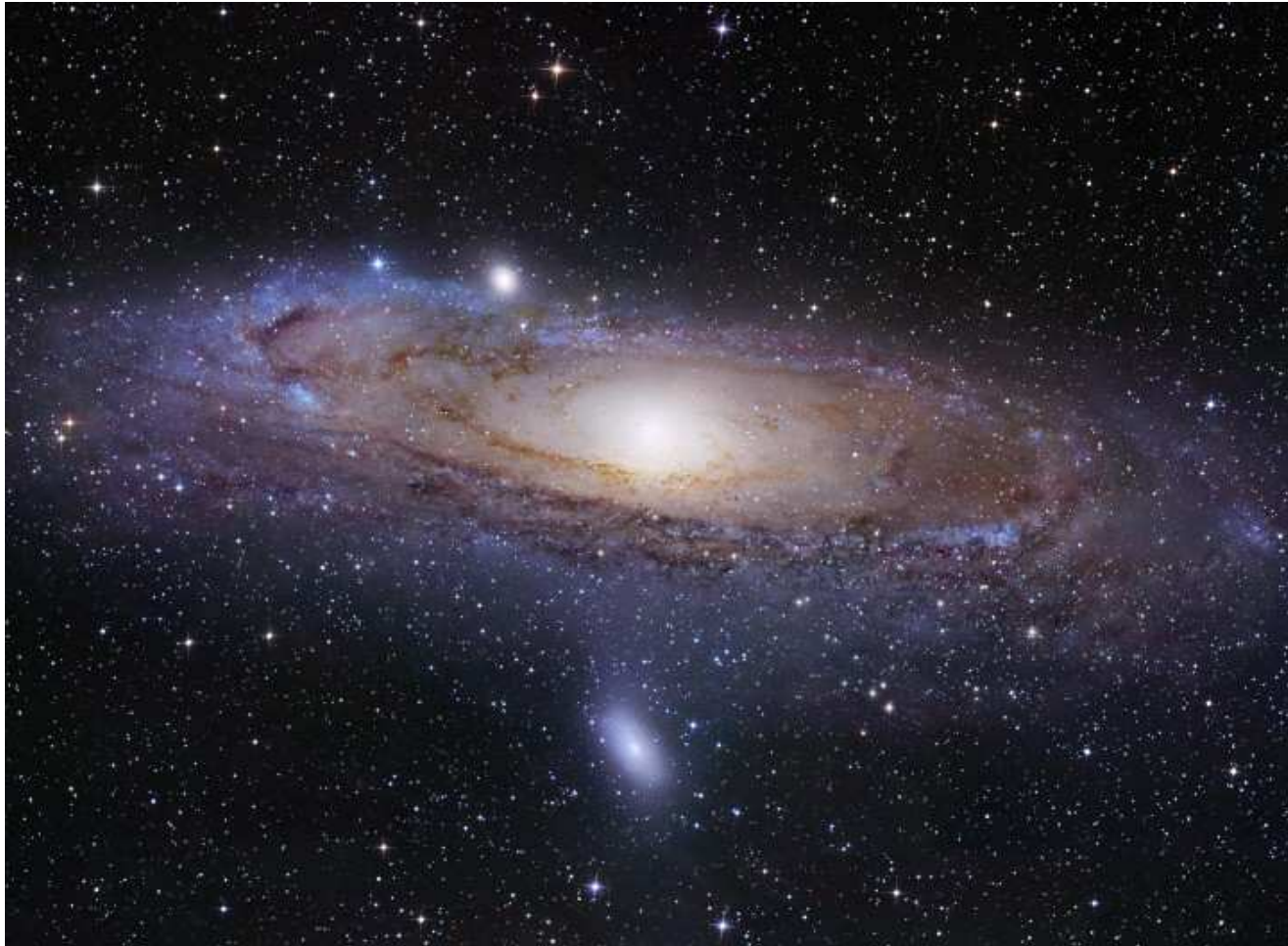
Inestabilidad



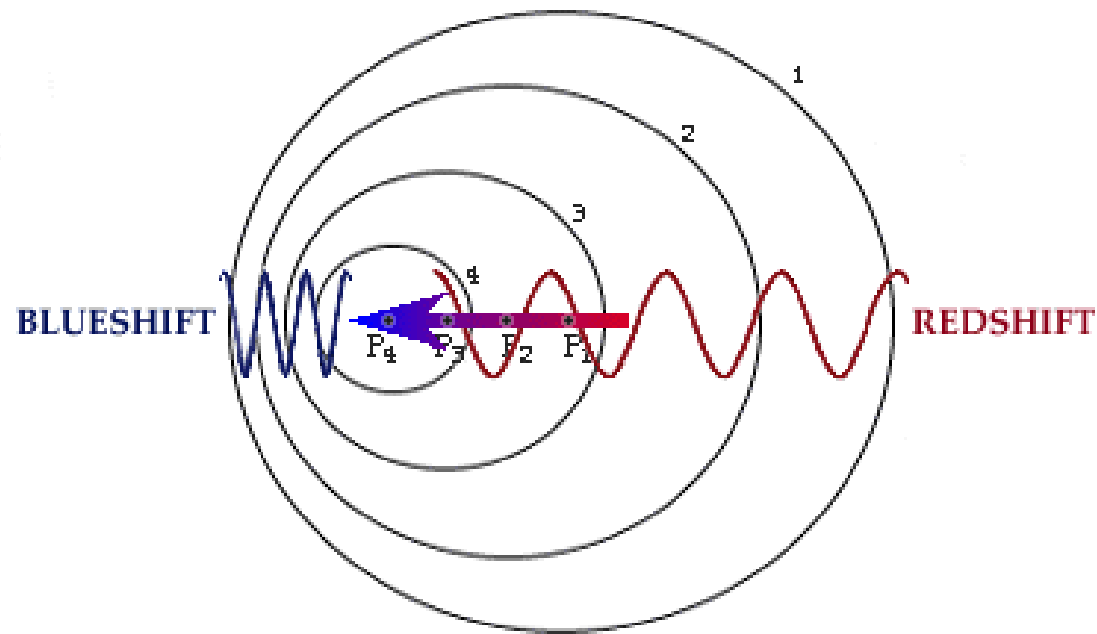
Edwin Hubble con dos colegas frente a la cúpula del telescopio de 100" de Mount Wilson



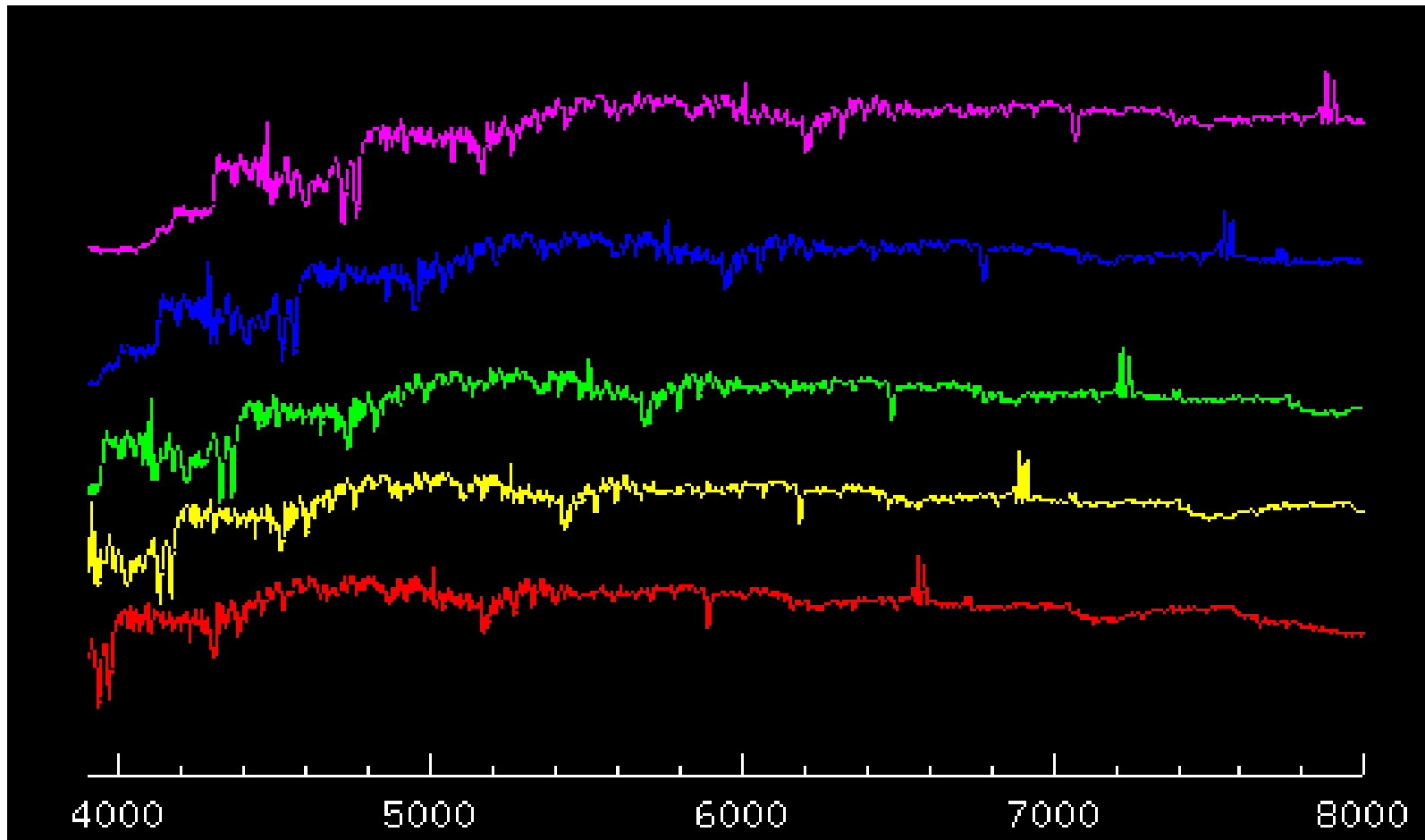
Relación Periodo-Luminosidad de estrellas tipo Cefeidas



El hallazgo de estrellas cefeidas en la galaxia espiral M31 (Andrómeda) permitió a Edwin Hubble estimar su distancia a la Vía Láctea

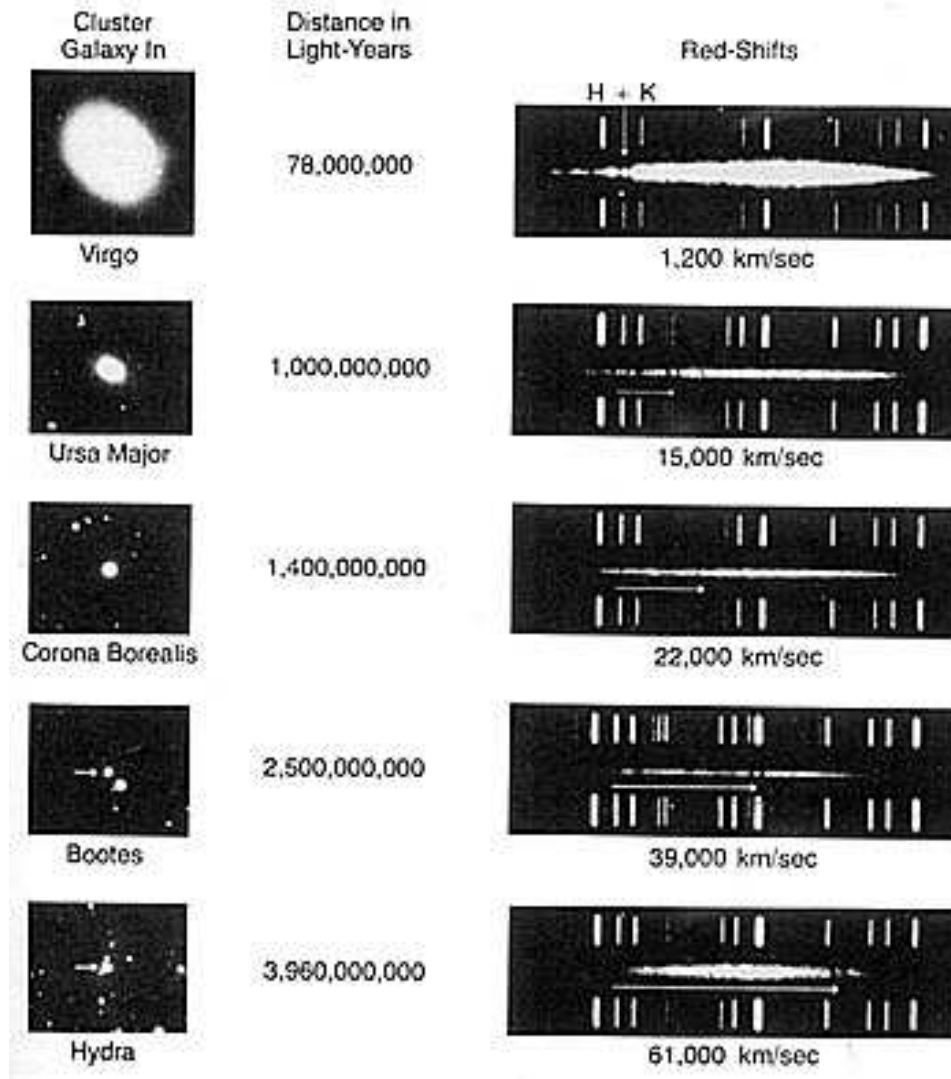


El efecto Doppler nos revela si una fuente de luz se acerca (desplazamiento hacia el azul) o se aleja (desplazamiento hacia el rojo) de nosotros

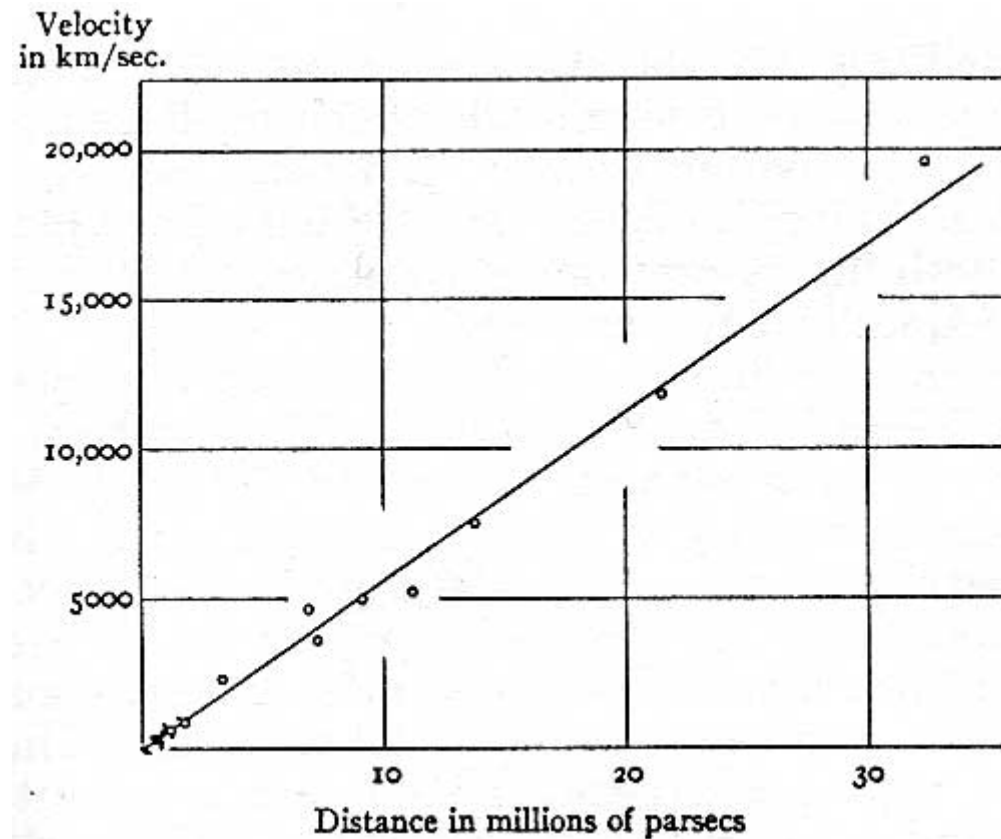


Espectros de emisión de galaxias a distintos redshifts.

Relation Between Red-Shift and Distance for Distant Galaxies



La velocidad de galaxias lejanas aumenta con el redshift y éste con la distancia.



Relación entre Velocidad y Distancia (Hubble 1931)

- Estas y subsiguientes medidas sobreestimaron grandemente el valor de H_0

MODELOS DE FRIEDMANN - LEMAÎTRE

Hipótesis: Teoría de RG + Isotropía, Principio cosmológico, radiación y materia polvo

$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho \quad \text{Radiación: } P = \rho/3 \quad \Rightarrow \quad \rho \propto 1/a^4$$

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + P) = 0 \quad \text{Polvo: } P \simeq 0 \quad \Rightarrow \quad \rho \propto 1/a^3$$

Consecuencia: etapa dominada por la radiación con

$$a(t) \propto t^{1/2} \quad \Rightarrow \quad H = 1/2t \quad \Rightarrow \quad \rho \propto 1/t^2$$

seguida de la etapa dominada por la materia con

$$a(t) \propto t^{2/3} \quad \Rightarrow \quad H = 2/3t \quad \Rightarrow \quad \rho \propto 1/t^2$$

(supuesta en ambos casos despreciable la curvatura espacial, K/a^2)



Alexander Friedmann (~ 1923)



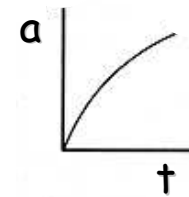
Georges Lemaître

the present universe is the
"ashes and smoke of bright
but very rapid fireworks."

LÍMITE SUPERIOR A LA EDAD DEL UNIVERSO

Como puede razonarse, siempre que $\rho + 3P > 0$
el tiempo transcurrido desde el comienzo de la expansión
no puede ser mayor que H_0^{-1}

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) \quad \Rightarrow \quad \ddot{a} < 0$$



Sea t_0 ese tiempo. Si \ddot{a} se anulase en todo el intervalo $[0, t_0]$,

tendríamos
$$a(t) = a(t_0) \frac{t}{t_0} \quad \Rightarrow \quad H_0 = \frac{1}{t_0}$$

Ahora, ya que $\ddot{a} < 0$ en todo ese intervalo, la edad del Universo, t_0
ha de ser menor que el "tiempo de Hubble",

$$t_0 < 1/H_0$$

\Rightarrow Conflicto con medidas de la edad de la Tierra

MODELO ESTACIONARIO

- Motivaciones: (i) Eliminar la necesidad del "Big Bang";
- (ii) en 1948 el valor estimado de $1/H_0$ era sólo de 1.8 Gyr, mucho más pequeño que la edad de la Tierra, ~ 4.5 Gyr.



Gold, Bondi & Hoyle (~ 1960)

Hipótesis: Homogeneidad e isotropía
+ principio cosmológico perfecto

⇒ Los observables han de ser constantes,
consecuentemente:

$$H = \dot{a}/a = \text{constante} = H_0 \quad \Rightarrow \quad a(t) \propto \exp(H_0 t)$$

&

$$q = -\ddot{a}/(aH^2) = q_0 = -1$$

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + \exp(2H_0 t) \left[dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

Además, ya que $H_0 > 0$ y la densidad es un observable
ha de haber una creación continua de materia a un ritmo
aproximado de 10^{-47} gramos/(cm³ · s)

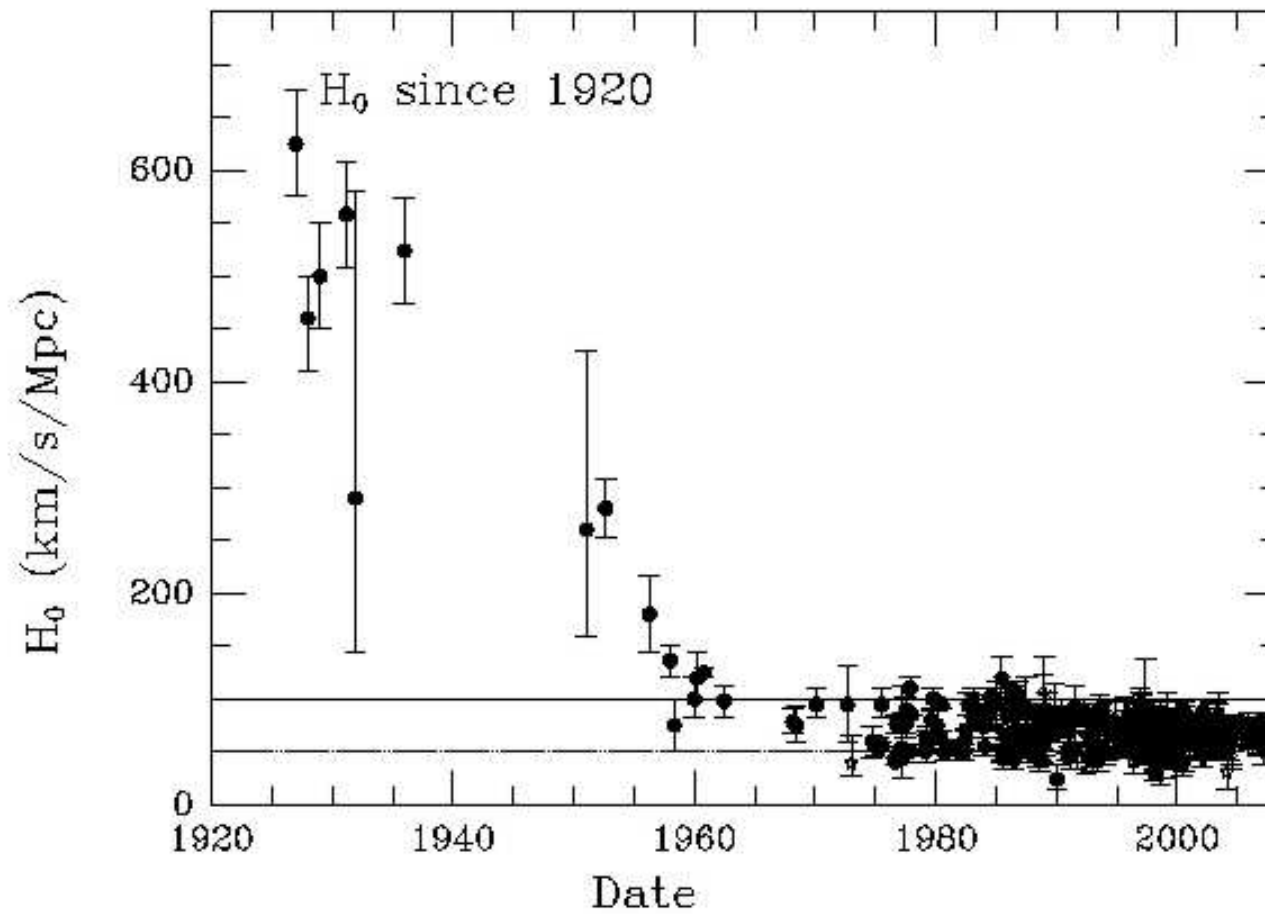
Dificultades: Evolución del número de galaxias con el redshift,
radiación cósmica de fondo de microondas (CMBR), ...



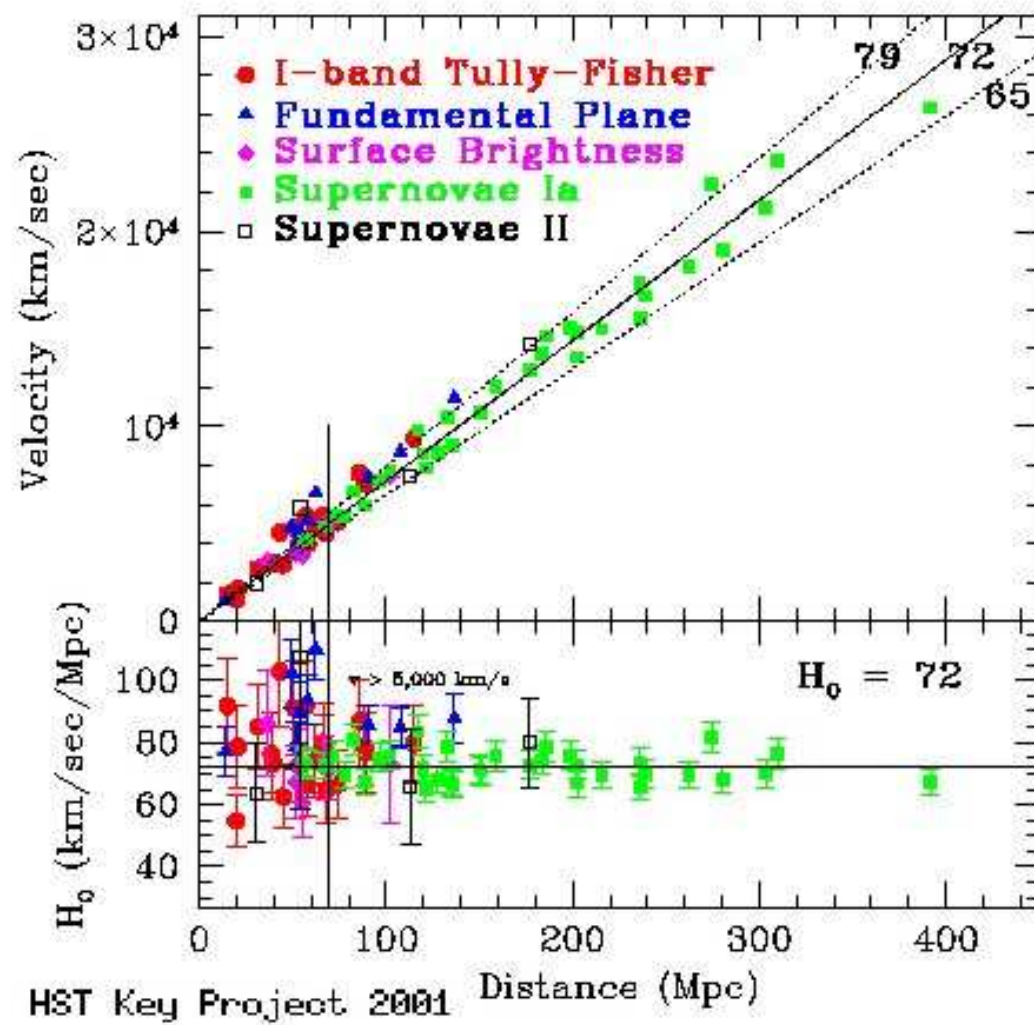
Telescopio Hooker (Mount Wilson)



Walter Baade -astrónomo de origen alemán- recalibró las distancias determinadas por Edwin Hubble, obteniendo
 $H_0 = 200 \text{ km/s/Mpc}$



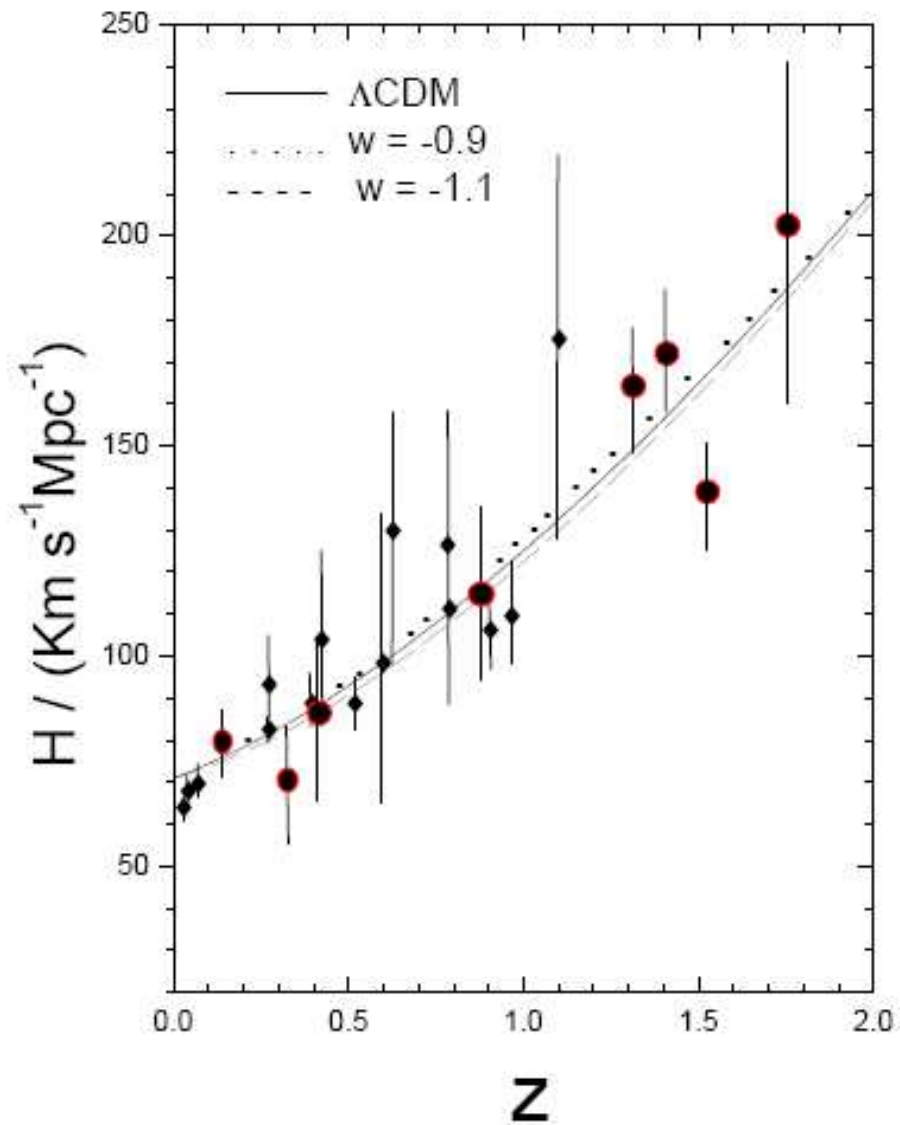
No siempre se ha obtenido el mismo valor para la constante de Hubble





Telescopio Espacial Hubble (HST), espejo de 95"

Intervalo más aceptado hoy: $68 < H_0 < 74$ km/s/Mpc

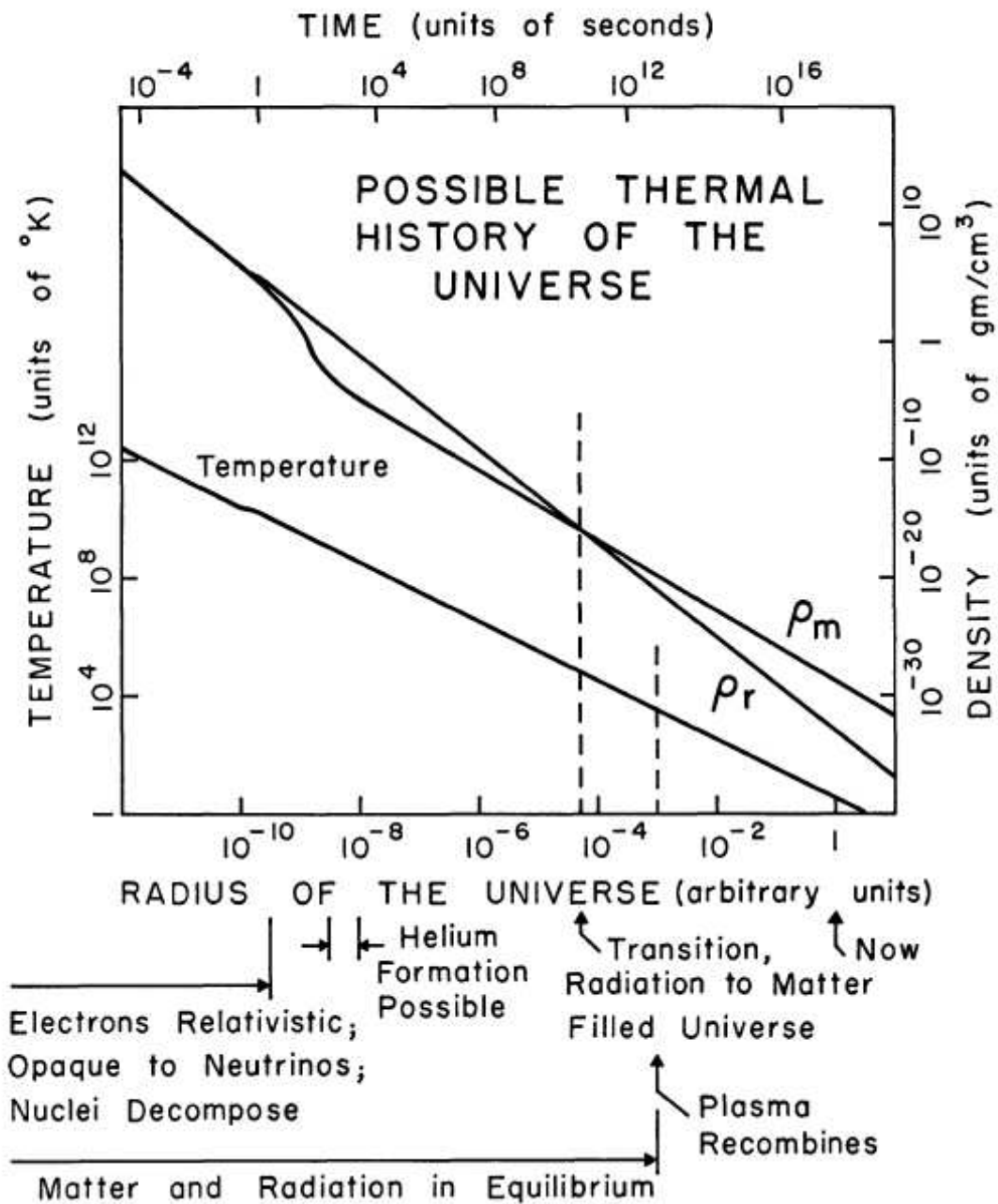


Evolución del factor de Hubble con el redshift. Las diversas curvas corresponden a distintos modelos tipo Friedmann-Lemaître

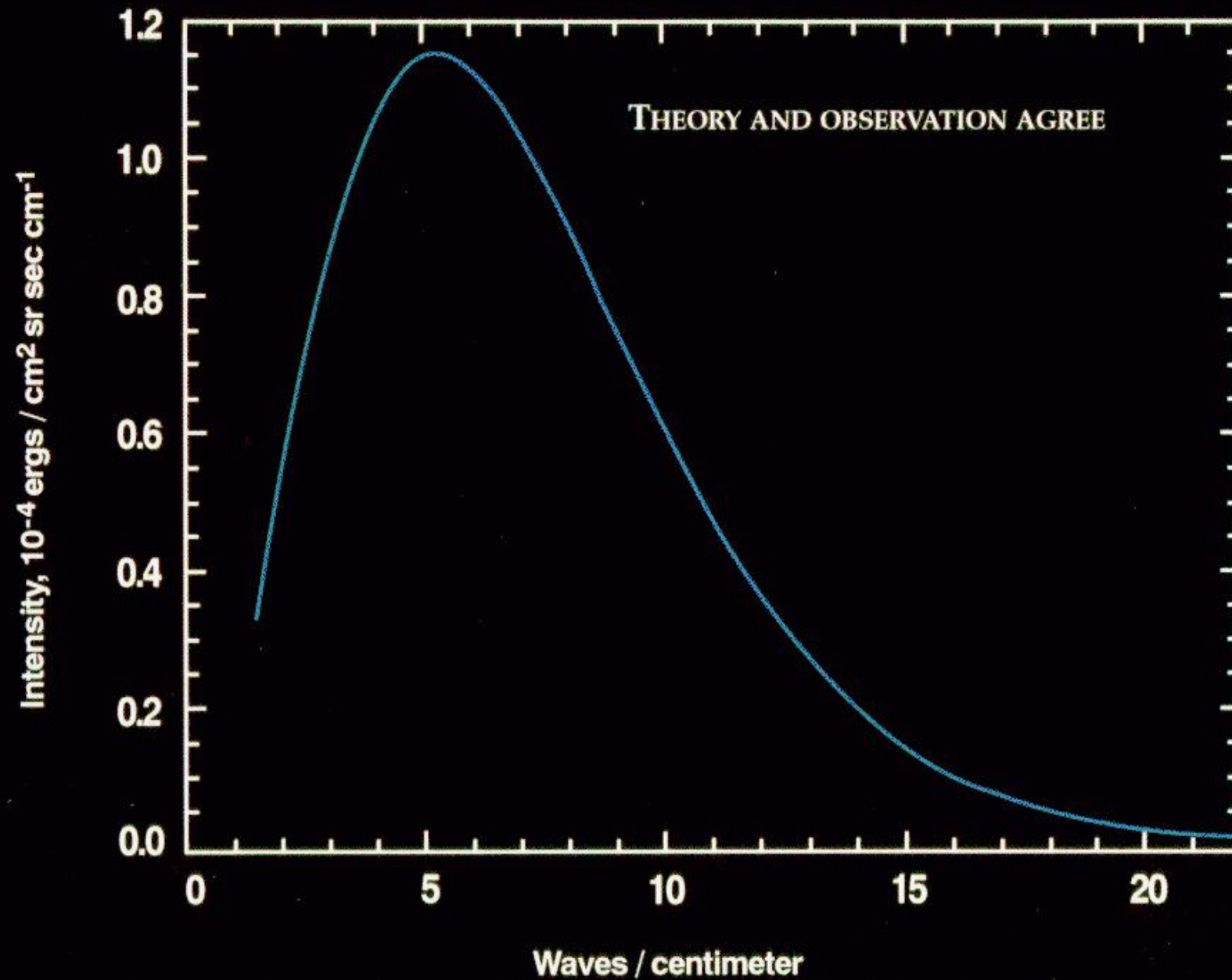
RADIACIÓN DE FONDO DE MICROONDAS



Arno Penzias & Robert Wilson (~ 1965)

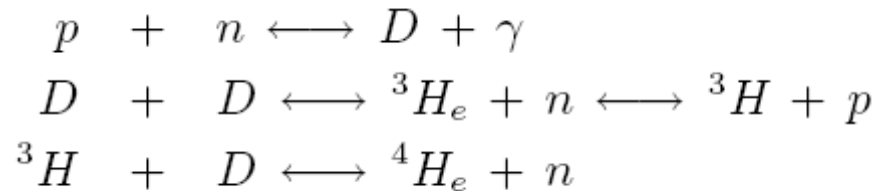


COSMIC MICROWAVE BACKGROUND SPECTRUM FROM COBE



NUCLEOSÍNTESIS PRIMORDIAL

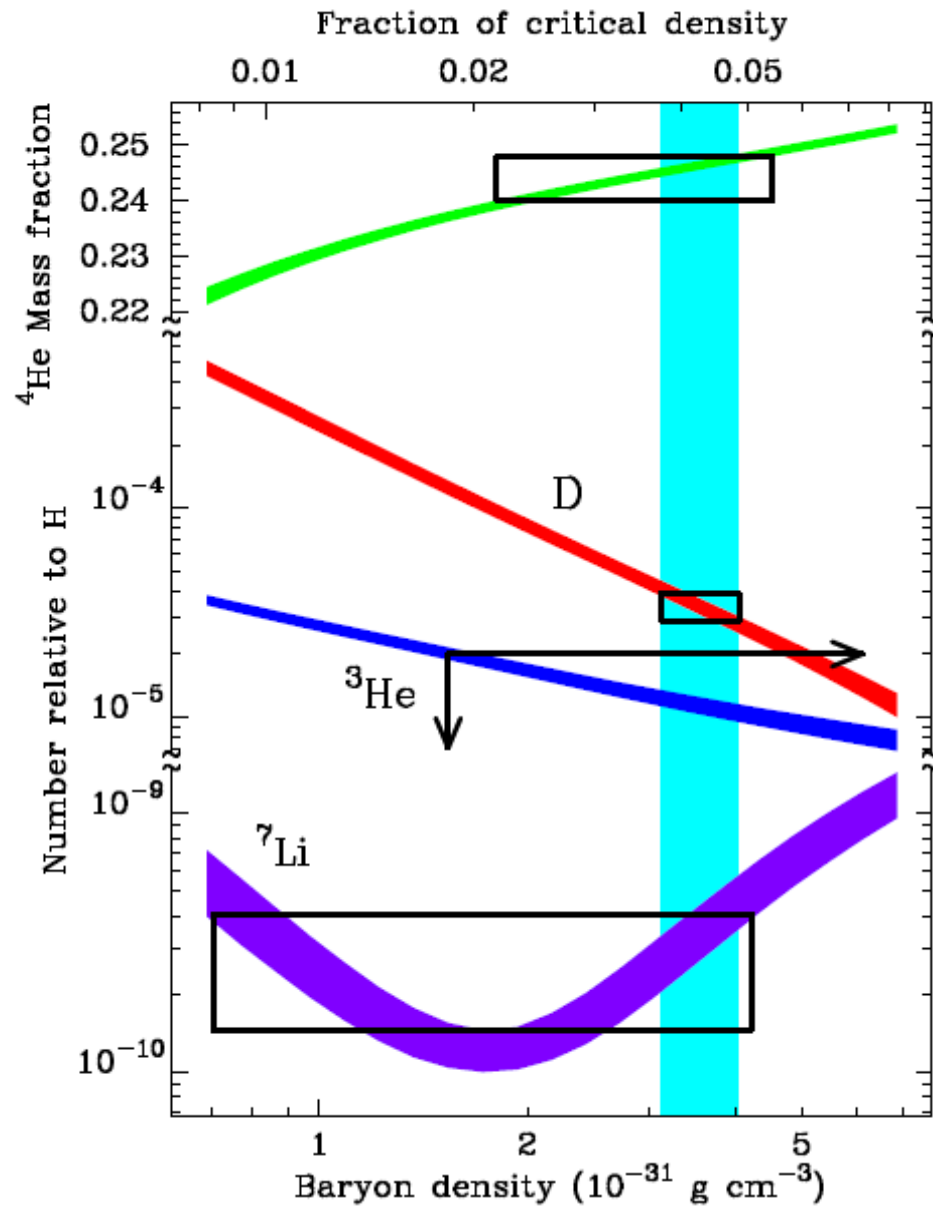
Reacciones conducentes a la formación de elementos ligeros:



Cuello de botella del deuterio: $\gamma + D \longrightarrow p + n$

Para $T \leq 0.8 \times 10^9$ Kelvin la cadena de reacciones procede sin impedimentos.

Número de bariones /Número de fotones $2.6 \times 10^{-10} < \eta < 6.2 \times 10^{-10}$



Abundancia de los elementos ligeros producidos en la nucleosíntesis primordial en función de la densidad bariónica. La franja vertical indica la región de concordancia.

MATERIA OSCURA

- Cociente Masa/Luz en el disco de la Galaxia: $\frac{M}{L} = 5 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$

Curvas planas de rotación:

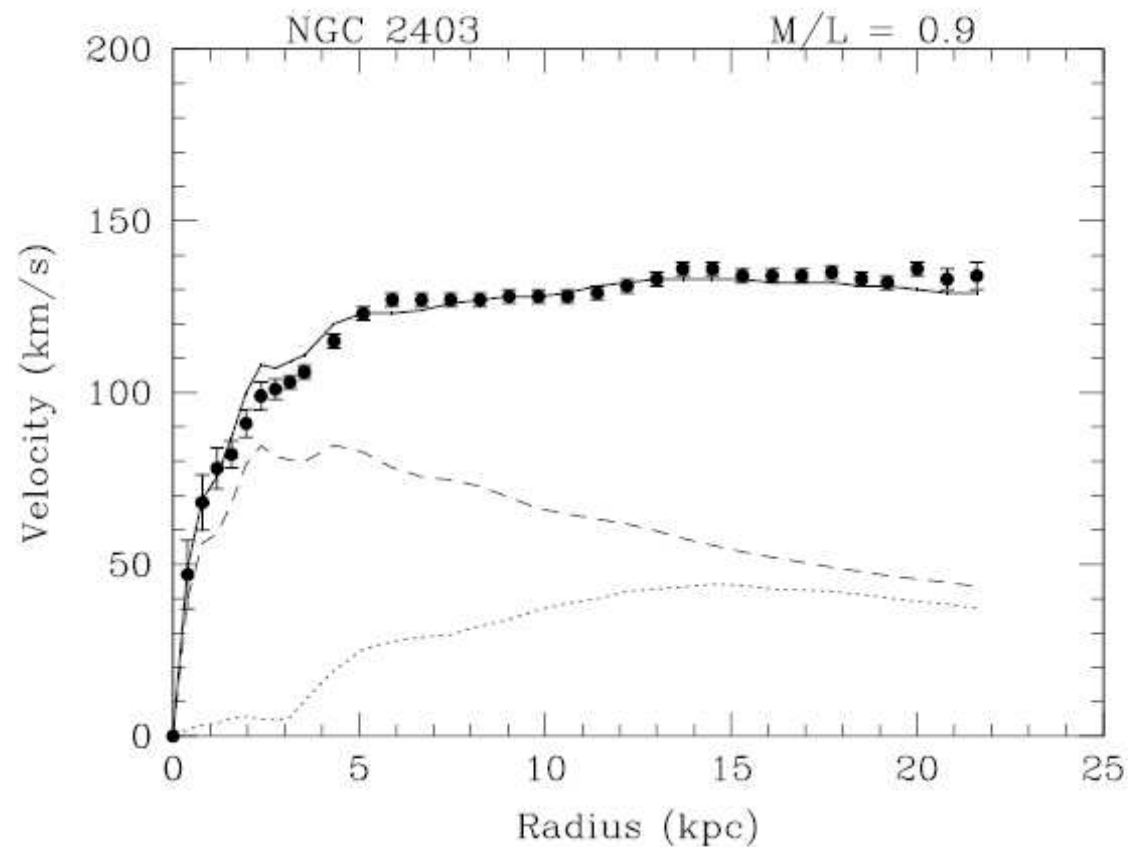
En principio $m \frac{v^2(r)}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \Rightarrow v(r) = \sqrt{G \frac{M(r)}{r}}$

Sin embargo Línea de 21 cm del hidrógeno atómico

en galaxias elípticas y espirales: $\frac{M}{L} \simeq (10 - 20) \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$

en galaxias de baja luminosidad: $\frac{M}{L} \simeq (200 - 600) \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$

en cúmulos (por el teorema del virial): $M \sim 20$ Masa Luminosa



Curva de rotación de la galaxia NGC 2403 a partir de observaciones de la línea de 21 cm de hidrógeno atómico. La línea de trazos corresponde a la de la teoría de Newton sin materia oscura.

PARTÍCULAS CANDIDATOS A MATERIA OSCURA

Han de ser

- Estables, o de vida media superior a la edad del Universo
- No relativistas (para contribuir a la formación de estructuras)
- No bariónicas (para no interferir con la nucleosíntesis primordial)

axion, sneutrino (spin = 0), gravitino (spin 3/2), neutralino (spin 3/2),

...

Experimentos para detectarlas

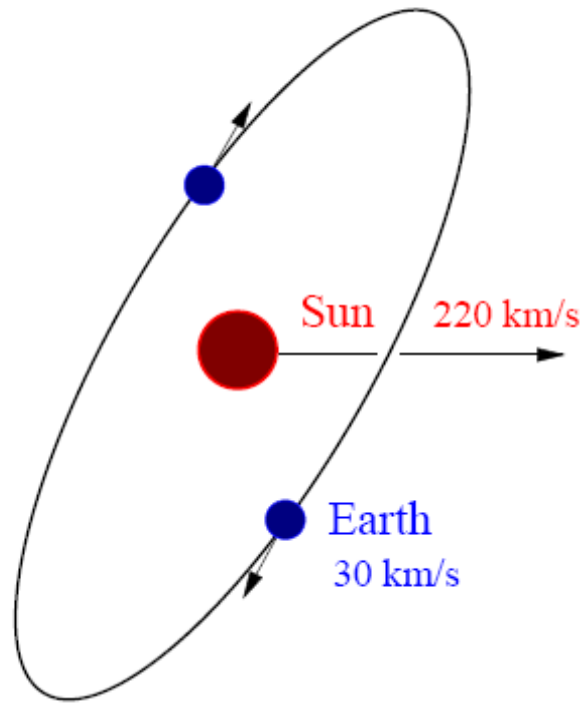
- DAMA/LIBRA

(annual modulation signature)

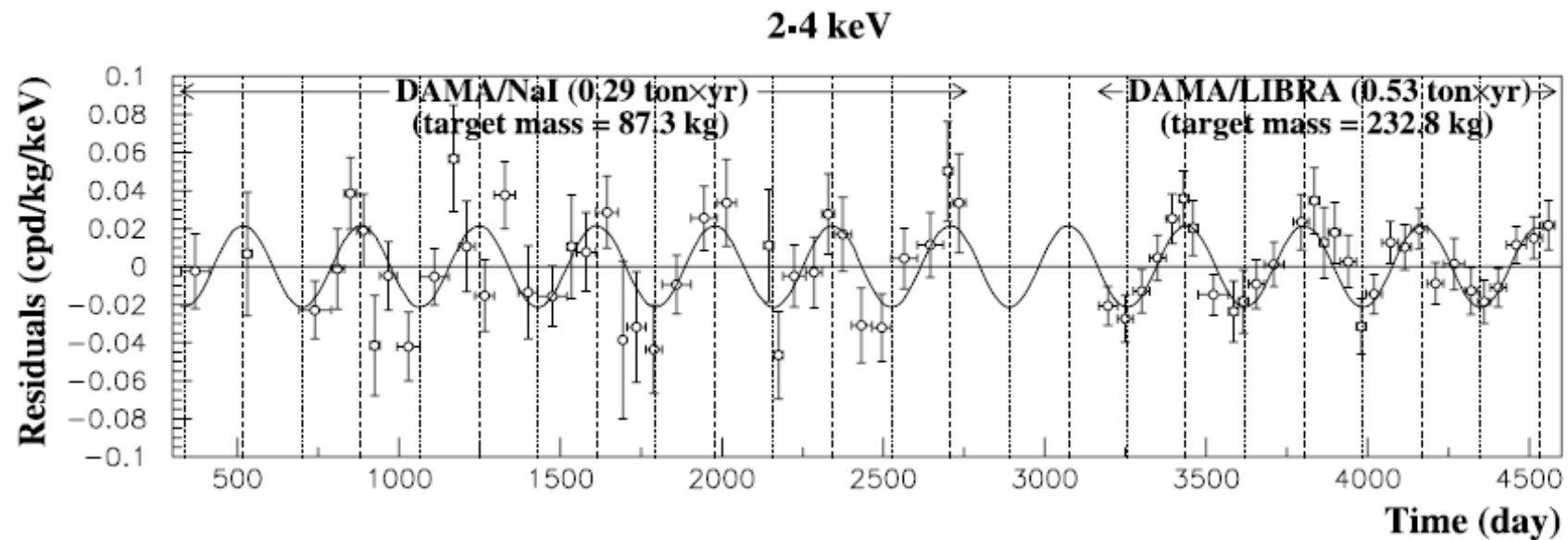
- PAMELA Satellite

(Pay-load for Anti-Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)

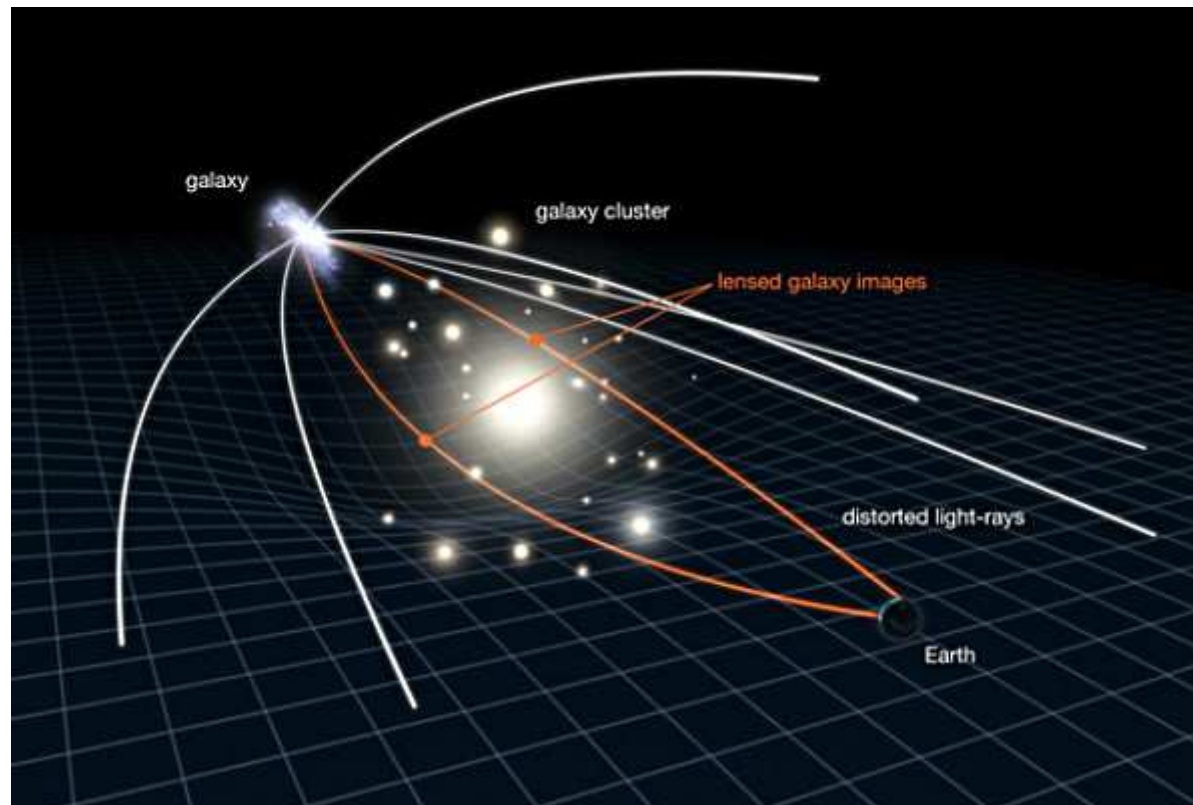
Exceso de radiación cósmica de positrones en el intervalo
de energías $10 < E < 100 \text{ GeV}$



Movimiento de la Tierra en torno al Sol. La diferencia de velocidades entre junio y diciembre se espera permita detectar el flujo de WIMPs.



Ritmo residual de scintilaciones en el intervalo (2–4) keV en función del tiempo observado en el experimento DAMA/LIBRA.



Efecto lente gravitacional. Los rayos de luz son desviados por el campo gravitatorio de una galaxia

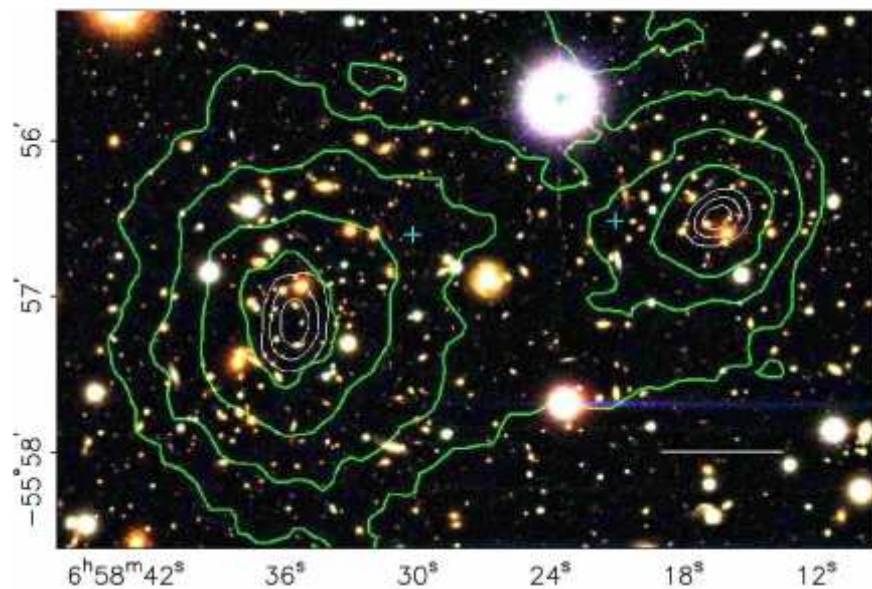


Imagen óptica del cúmulo 1E0657-558
(un par de galaxias que colisionaron
hace 100 millones de años). Se muestran
las curvas de nivel de densidad de la materia
bariónica + no bariónica obtenidas mediante
distorsión gravitatoria del camino seguido
por la luz de galaxias lejanas.

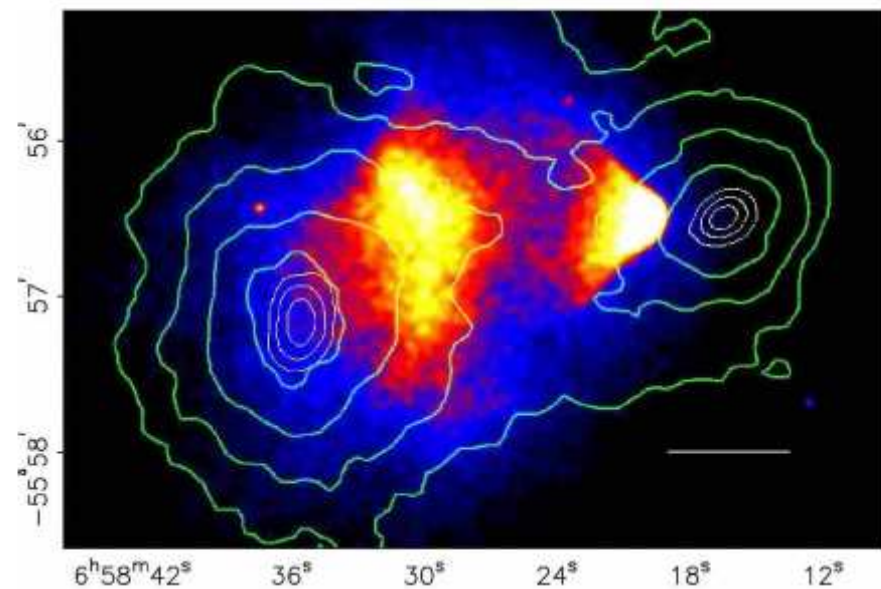
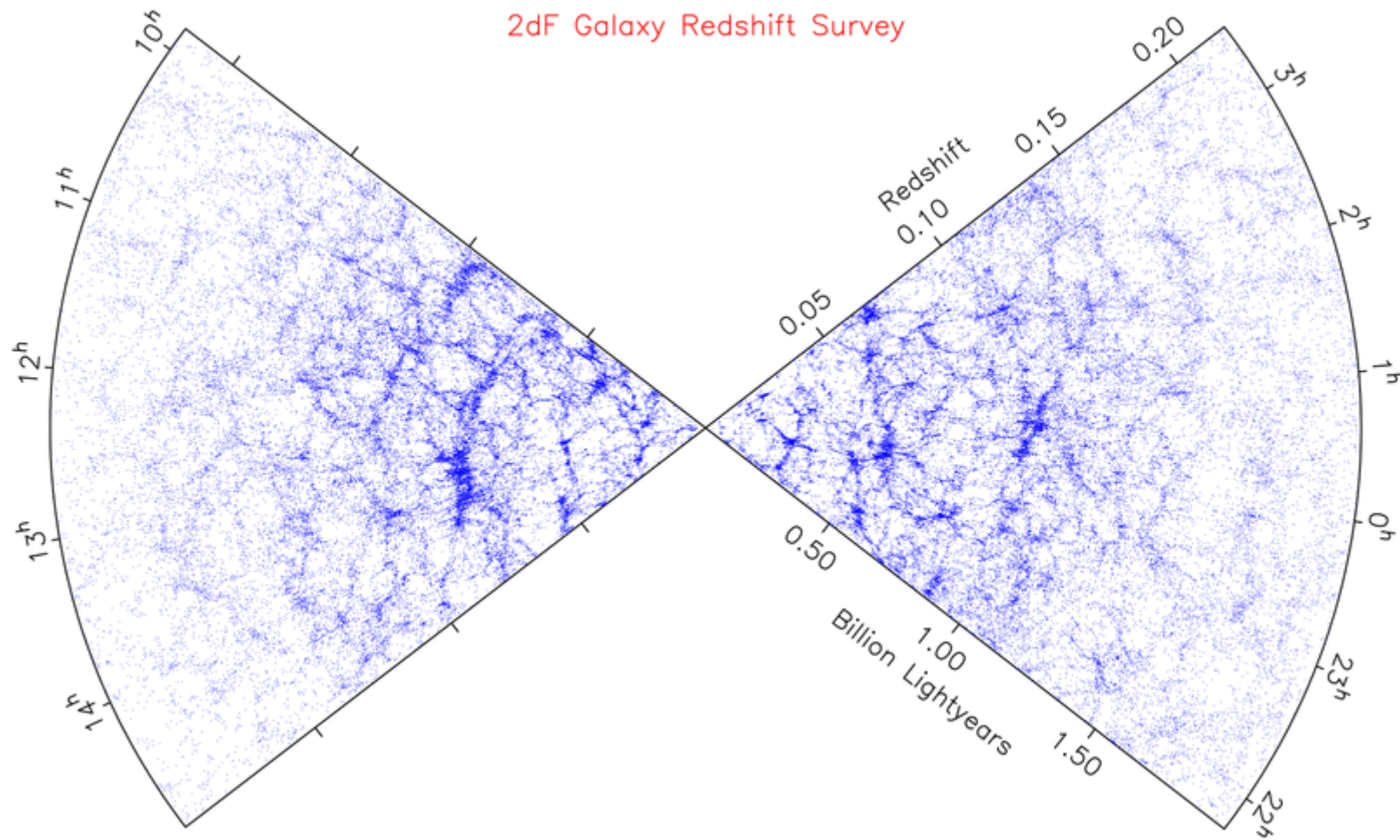


Imagen de rayos X del cúmulo
1E0657-558. Se aprecian dos distintas
concentraciones (brillantes) de plasma
intergaláctico los cuales están dominadas
por materia bariónica. Los contornos
sobreimpuestos de la figura de la
izquierda muestran que la colisión retrasó
al plasma con respecto a la masa total.

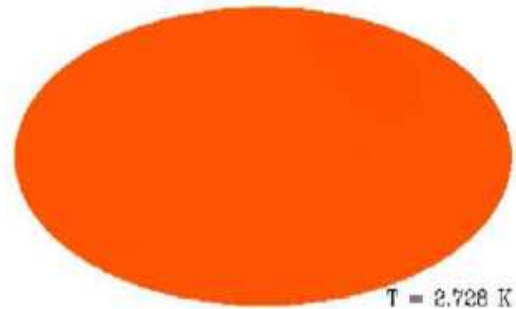


Distribución de materia a gran escala

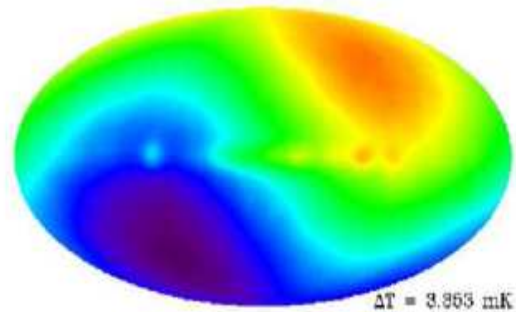
FLUCTUACIONES EN LA RADIACIÓN DE FONDO DE MICROONDAS



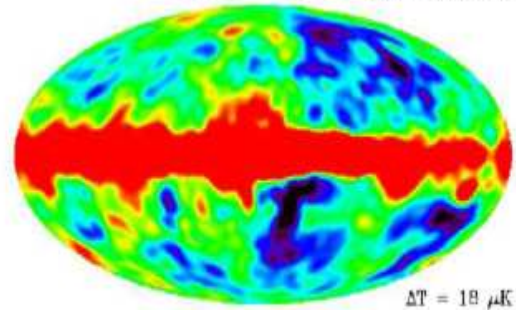
El CMBR no es exactamente térmico. El radiómetro del satélite COBE puso de manifiesto fluctuaciones $\langle \Delta T/T \rangle$ del orden de la cientmilésima. Si el CMBR fuese perfectamente térmico, el modelo cosmológico estándar tendría serias dificultades a la hora de explicar la existencia de galaxias y cúmulos.



Monopolo, $T = 2.728 \text{ K}$

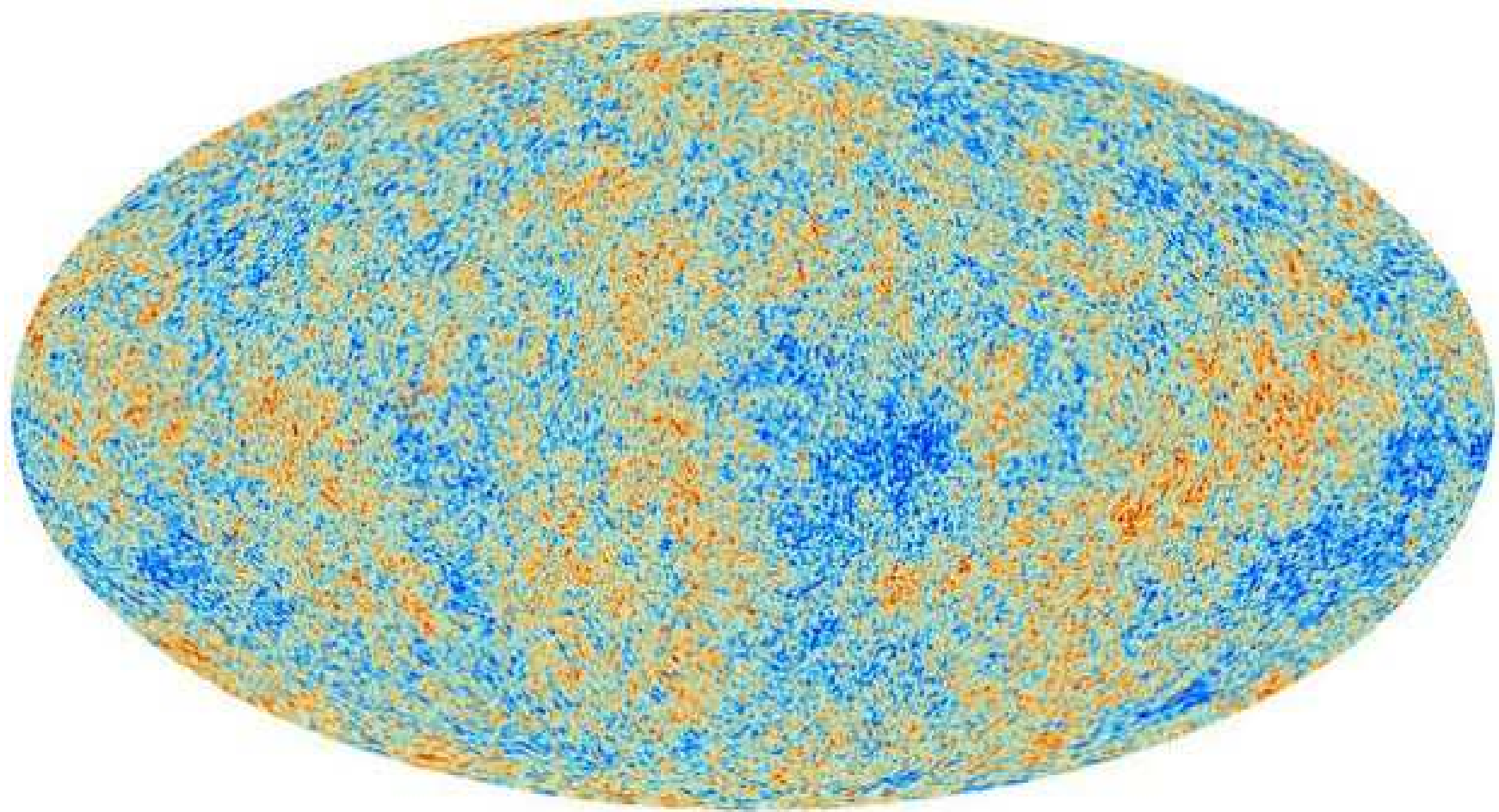


Dipolo

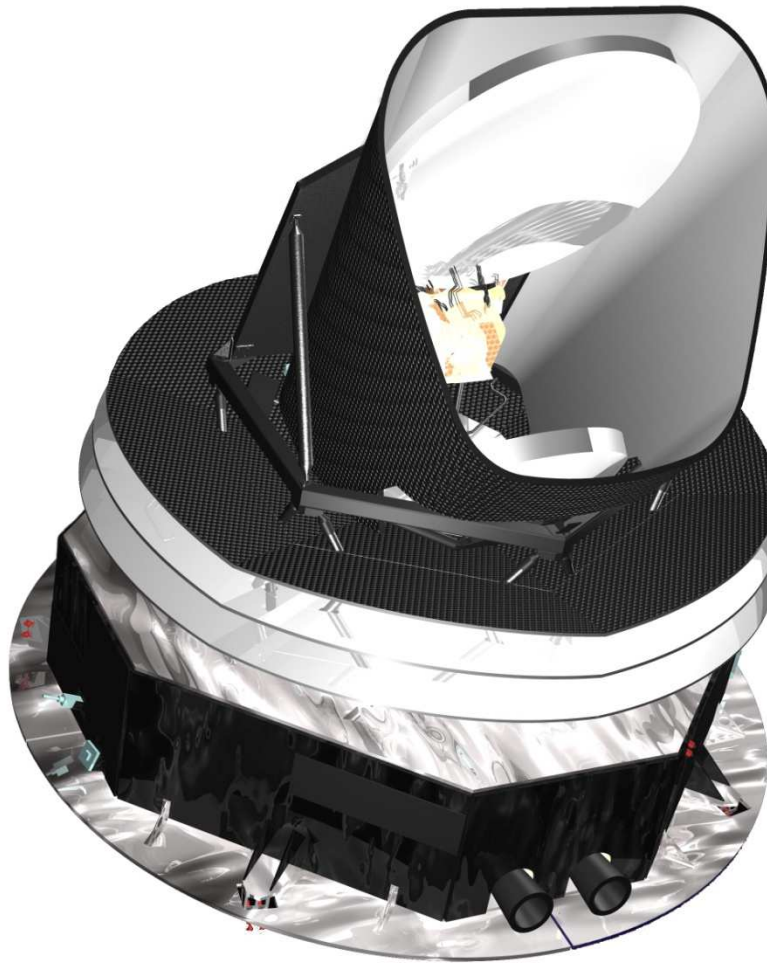


Cuadrupolo

Espectro de radiación visto por el radiómetro del satélite COBE



Anisotropías del CMBR observadas por el
satellite Planck con resolución de 1'

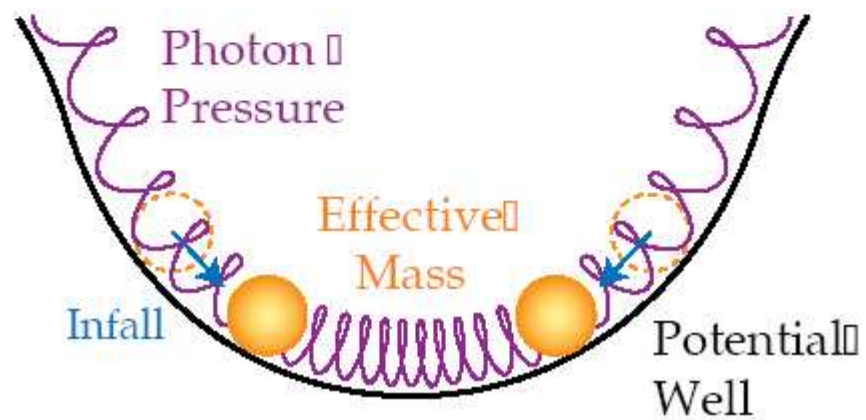
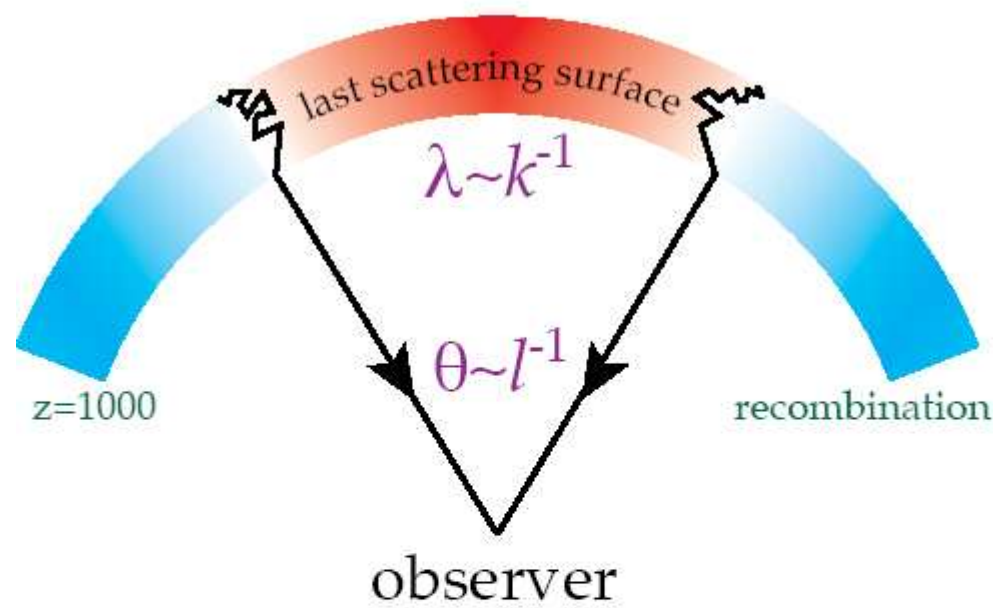


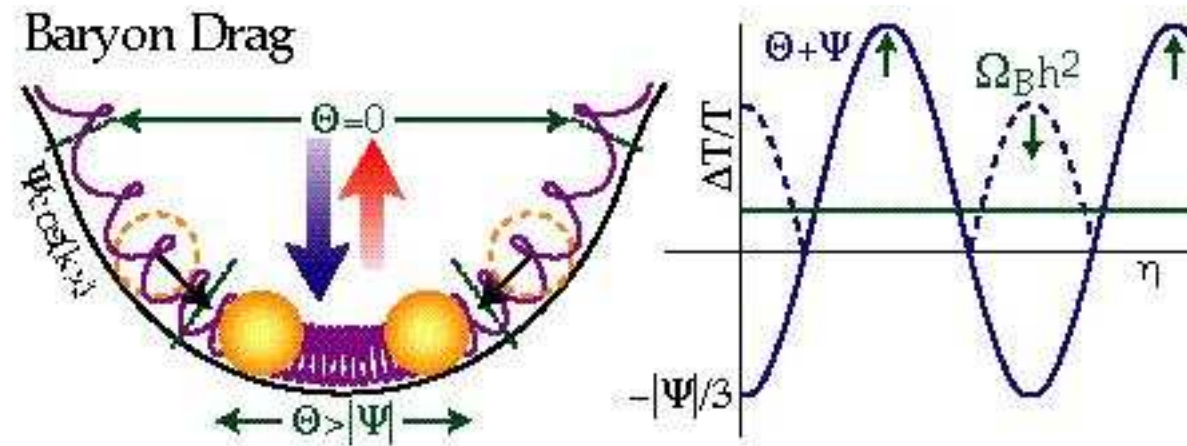
Satélite Planck. En órbita desde mayo 2009

All right reserved ALCATEL SPACE INDUSTRIES

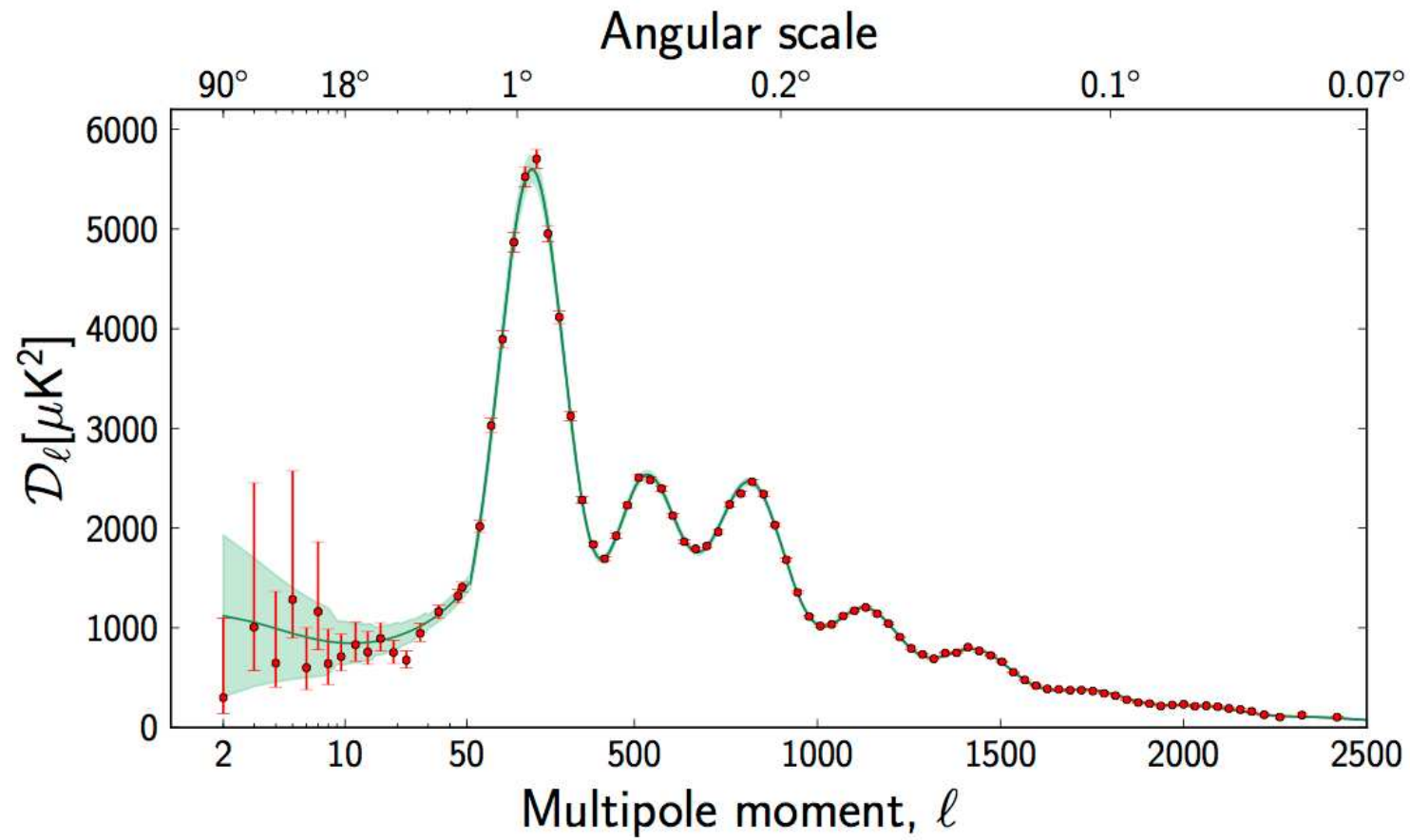


South Pole Telescope





Los muelles y masas representan el plasma de fotones y bariones. En conjunto, simulan un acordeón. La altura relativa de los picos acústicos nos informa de la densidad de bariones del Universo.



Espectro de anisotropías en la temperatura de la radiación de fondo de microondas vistas por el satélite Planck

EXPANSIÓN ACELERADA ACTUAL

¿Cómo sabemos que el Universo está acelerando su expansión?

La explosión de una estrella enana blanca puede dar lugar a

supernova tipo Ia 15×10^9 veces más brillantes que el Sol,
 6×10^{43} ergios/s.

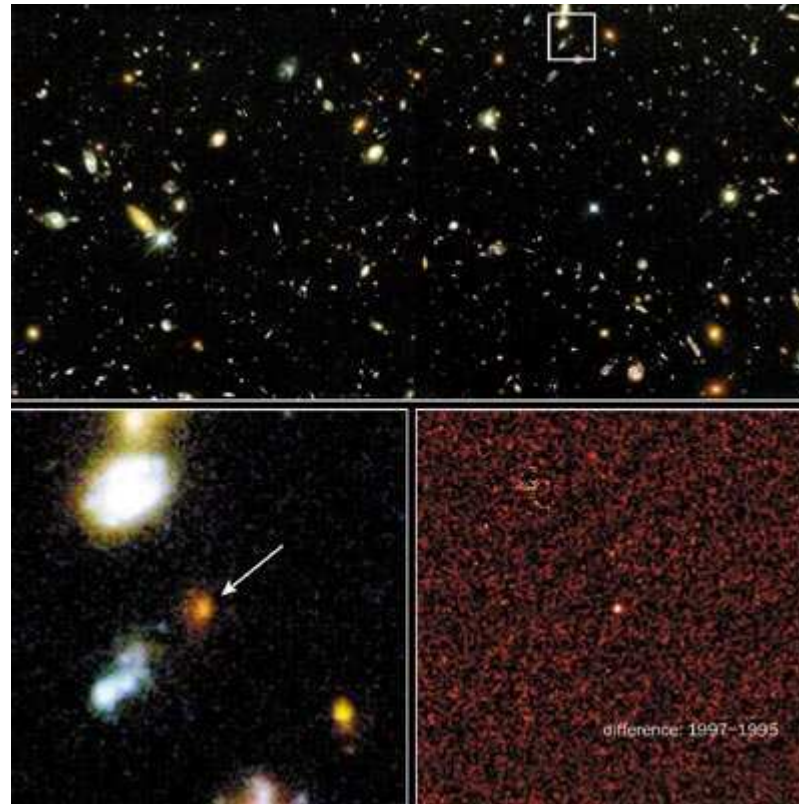
(En promedio se dan 3 ó 4 supernovas por galaxia y milenio).

El brillo observado en las supernovas lejanas muestra que éstas se hallan aún más lejos de lo esperado en universo que estuviese desacelerando. Habida cuenta de la ecuación de aceleración,

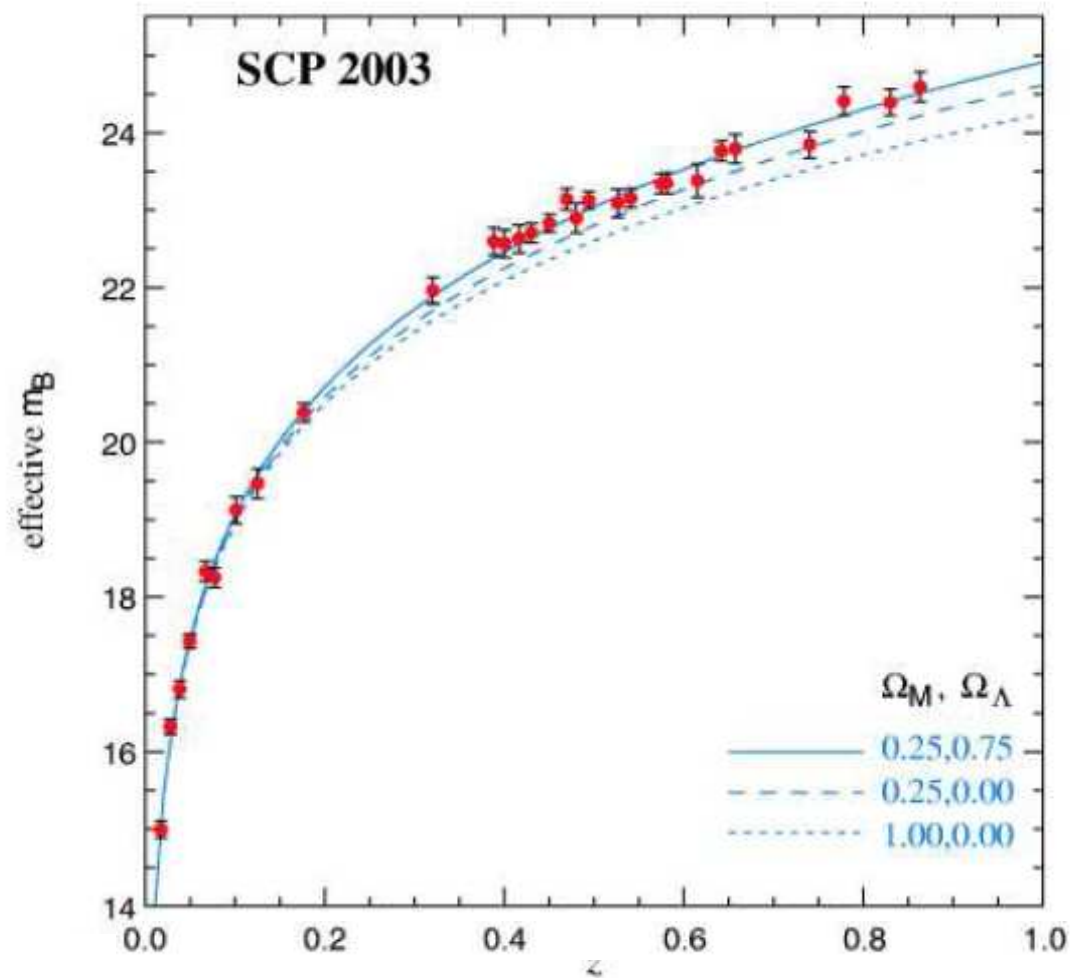
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P)$$

la relatividad de Einstein puede explicar este fenómeno admitiendo la existencia de energía de presión altamente negativa (energía oscura).

Para $P < -\rho/3 \Rightarrow \ddot{a} > 0$



Supernova 1997ff. La imagen de arriba muestra su entorno cosmológico; la inferior izda, la galaxia donde tuvo lugar la explosión; y la de la dcha, la propia supernova. Imágenes tomadas por el telescopio espacial Hubble.



El brillo vs. desplazamiento hacia el rojo (redshift) de supernovas tipo Ia fuertemente sugiere que el Universo está acelerando su expansión. Esto a su vez requiere la existencia de energía con alta presión negativa como, p. ej., la constante cosmológica.

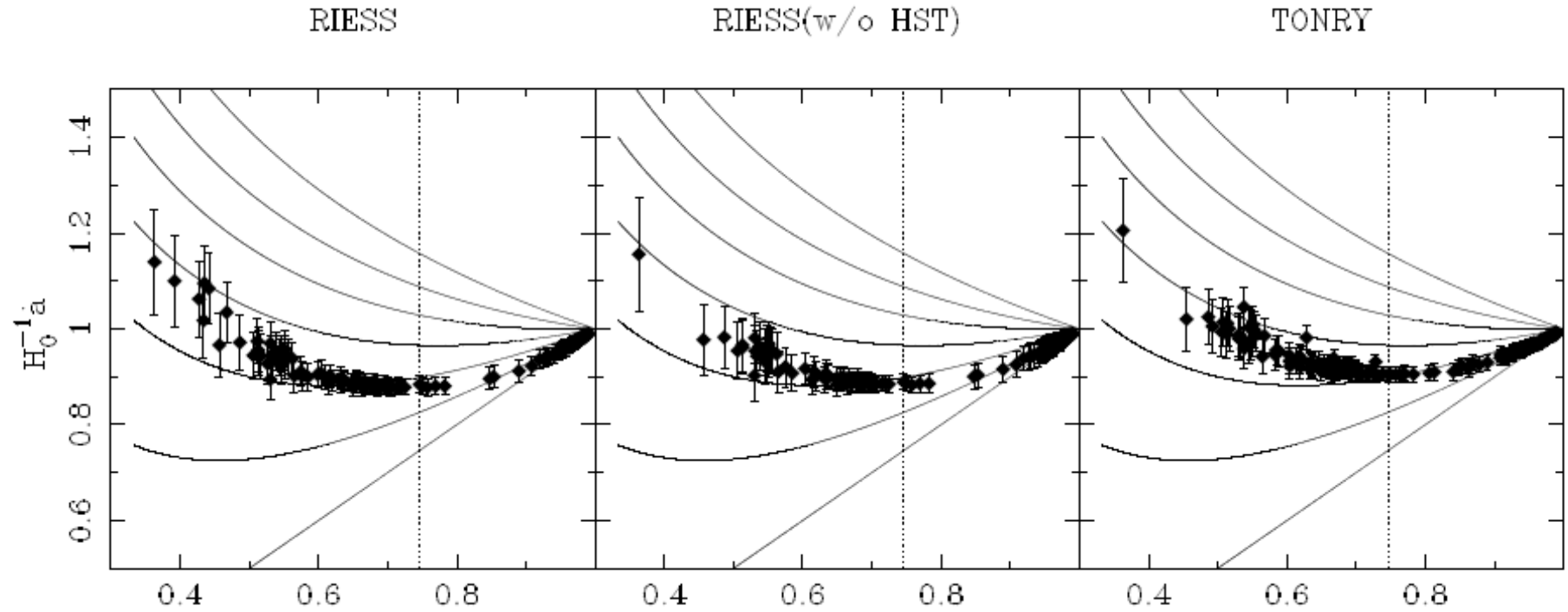


Fig. 2. The observed supernova data points in the $\dot{a} - a$ plane for flat models. The error bars for the data points are correlated (see text for detailed description). The solid curves, from bottom to top, are for flat cosmological models with $\Omega_m = 0.00, 0.16, 0.32, 0.48, 0.64, 0.80, 1.00$ respectively. The left, middle and right panels show data points for the data sets RIESS, RIESS(w/o HST) and TONRY respectively. The vertical dashed line shows the redshift $z = 0.34$.

astro-ph/0311622

MODELO LCDM

Universo dominado por materia no relativista (bariones + energía oscura)
y energía del vacío cuántico de presión negativa

$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}(\rho_b + \rho_c + \rho_\Lambda) \quad \Rightarrow \quad \Omega_b + \Omega_c + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1$$

$$\Omega_b = \frac{8\pi G \rho_b}{3H^2} \quad \Omega_c = \frac{8\pi G \rho_c}{3H^2} \quad \Omega_\Lambda = \frac{8\pi G \rho_\Lambda}{3H^2} \quad \Omega_K = -\frac{K}{a^2 H^2}$$

$$\rho_m = \rho_b + \rho_c \quad \rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G} \quad P_\Lambda = -\rho_\Lambda$$

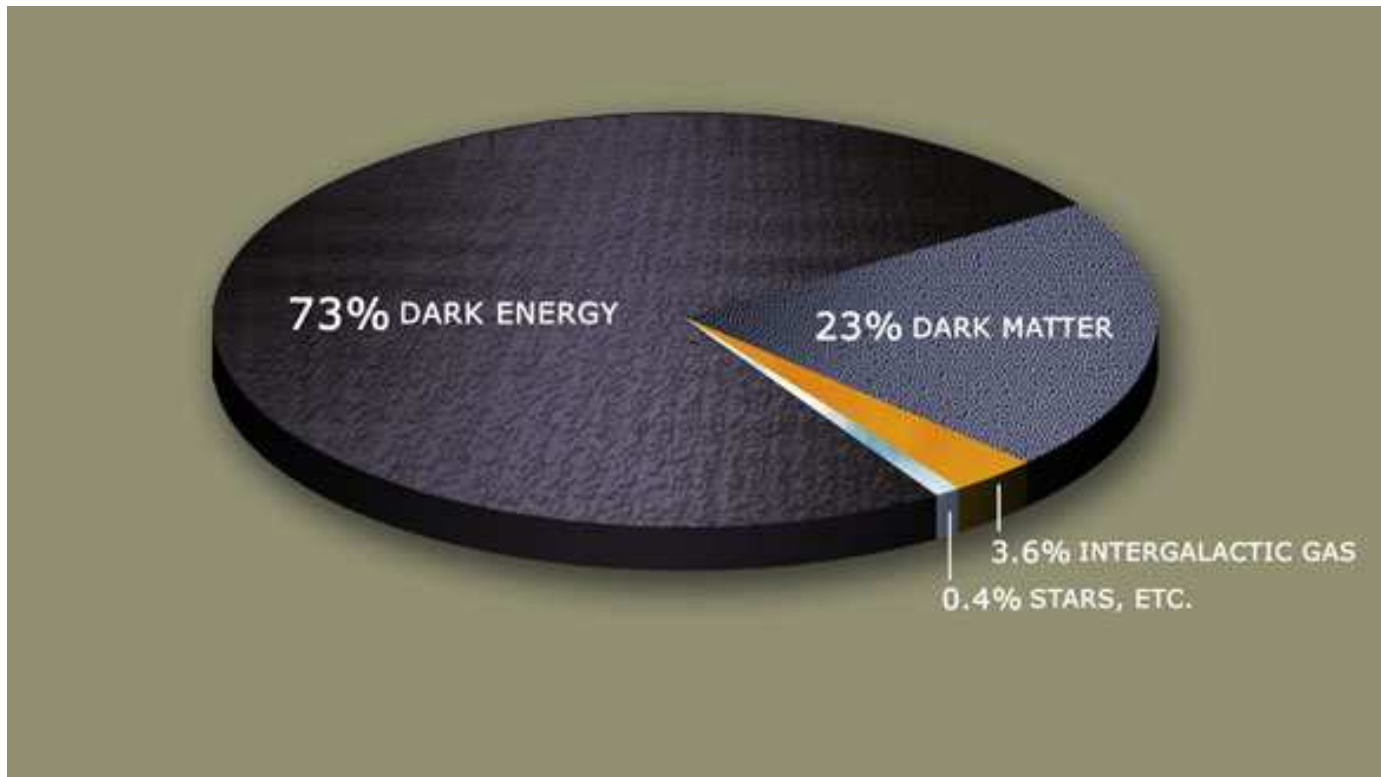
Parámetros Cosmológicos de LCDM

$$-0.0175 < \Omega_K < 0.0085 \quad \Omega_b = 0.0462 \pm 0.0015 \quad \Omega_c = 0.233 \pm 0.013$$

$$\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_b - \Omega_c - \Omega_K \simeq 0.72$$

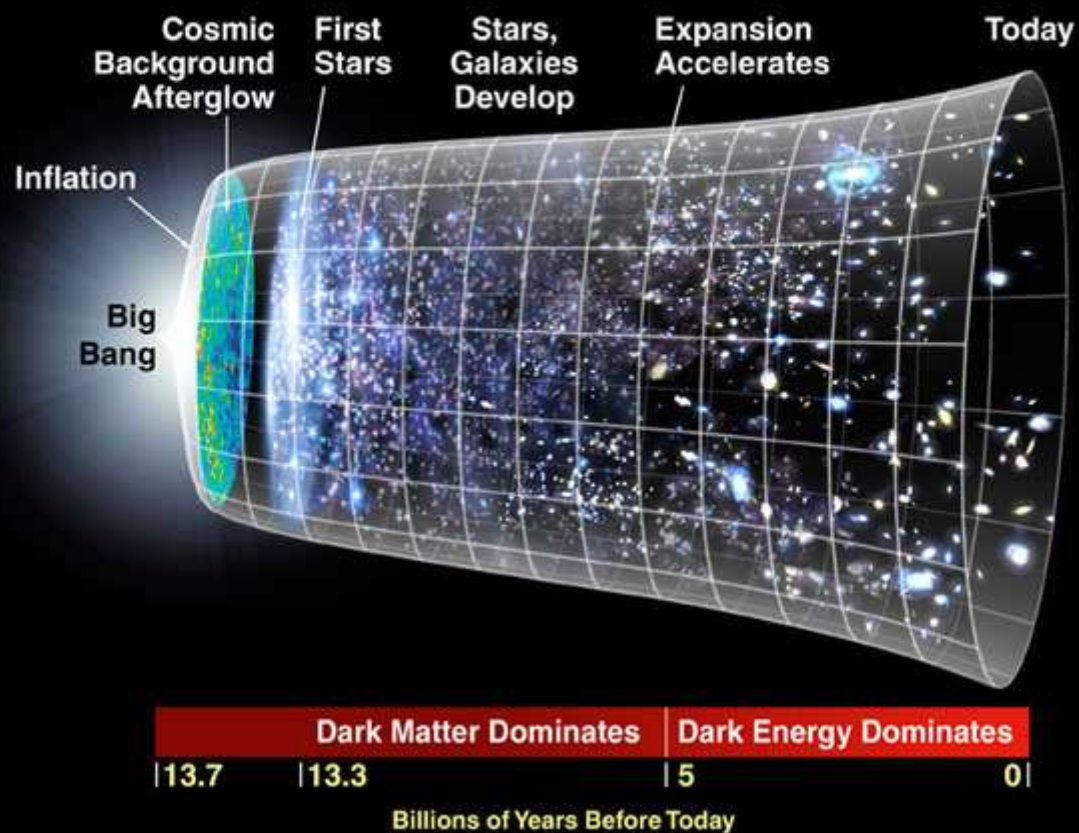
Constante de Hubble $H_0 = 70.1 \pm 1.3 \text{ km/s/Mpc}$

Edad del Universo $t_0 = 13.73 \pm 0.12 \text{ Gyr}$



Proporción relativa actual de los componentes
dominantes del Universo

THE EXPANDING UNIVERSE: A CAPSULE HISTORY



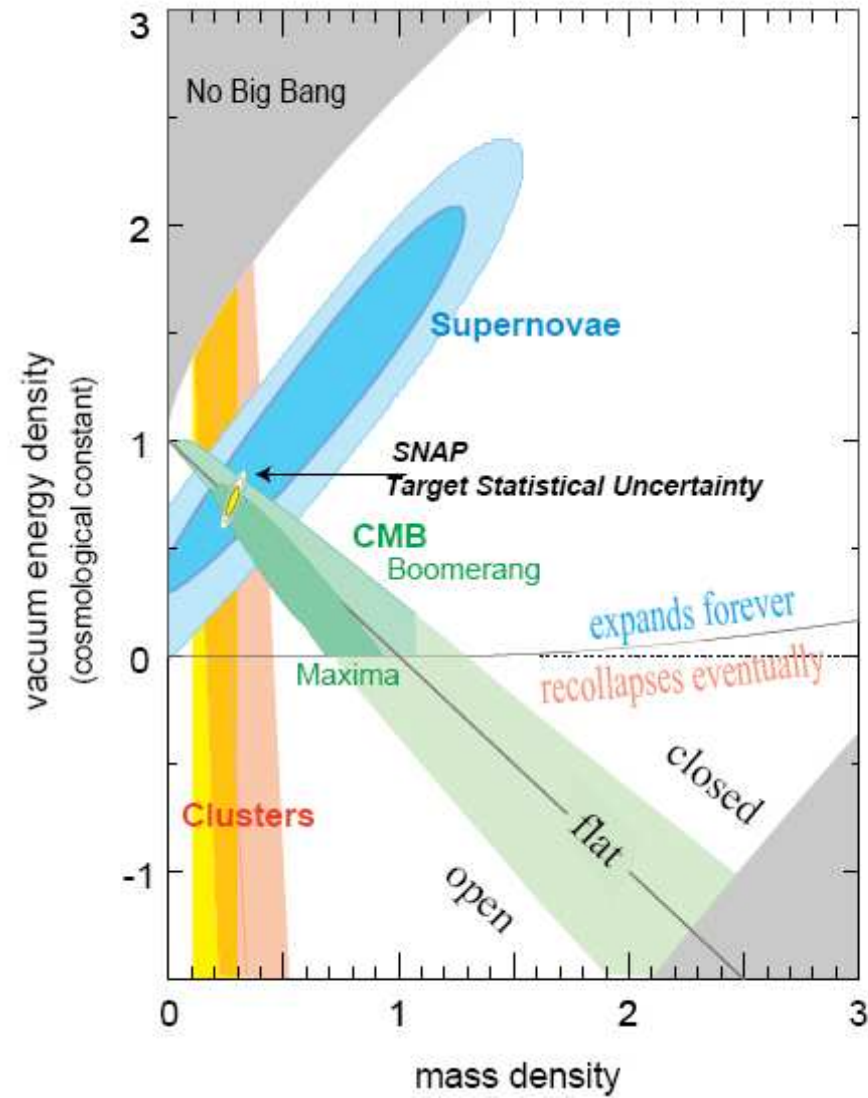
MIRANDO AL FUTURO

Existen diversos experimentos, en marcha o en proyecto, con la potencialidad de alterar en relativamente poco tiempo nuestra perspectiva del Universo.

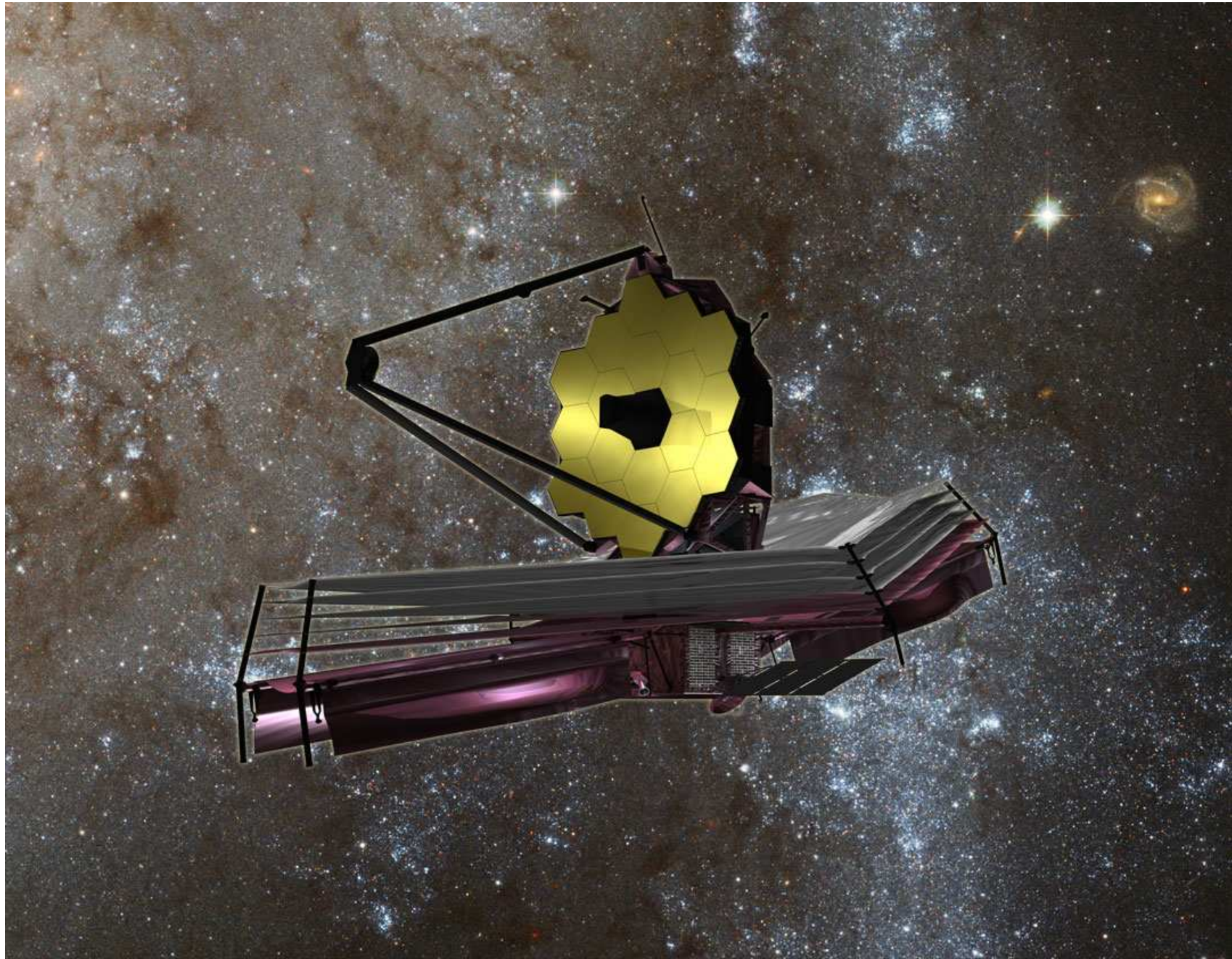
- ¿Es Λ CDM el modelo definitivo? → SNAP, JWST, Proyecto EUCLIDES
- ¿Es Λ la energía oscura o es otro campo aún por descubrir?
- ¿Cuáles son, si realmente existen, las partículas de materia oscura?
→ LHC
- ¿Es la relatividad general la teoría correcta de gravitación?
→ STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle),
→ LISA (Laser Interferometer Space Antenna).
- ¿Es el espacio-tiempo continuo a la escala de Planck?
→ VLT (Very Large Telescope Interferometer).
- ¿Es realmente válido el Principio Cosmológico?



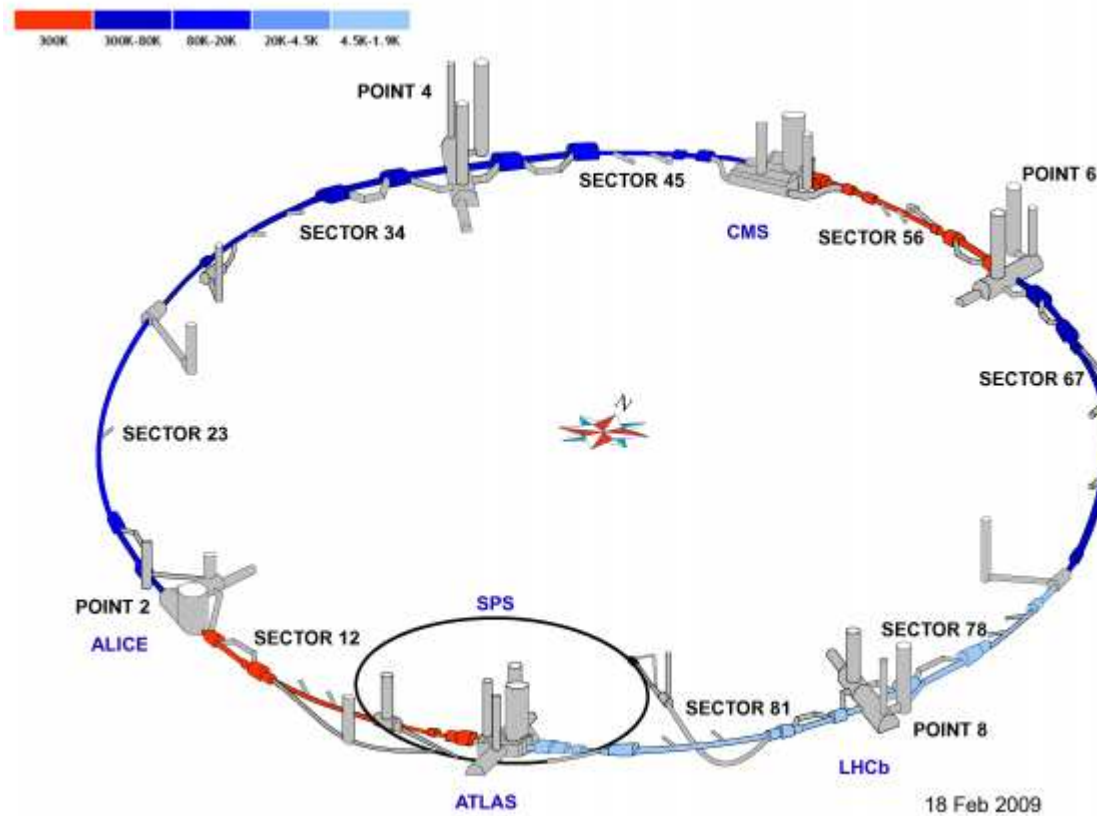
El satélite SNAP (Supernova Astrophysical Probe) irá equipado con un telescopio de óptico 2 metros de diámetro. Se espera capte un promedio de 2500 supernovas por año, y permita determinar el parámetro de ecuación de estado de la energía oscura con una precisión del 5%, y su variación con el redshift con precisión del 15%.



astro-ph/0403324



El satélite de infrarrojos James Webb sustituirá al satélite Planck.



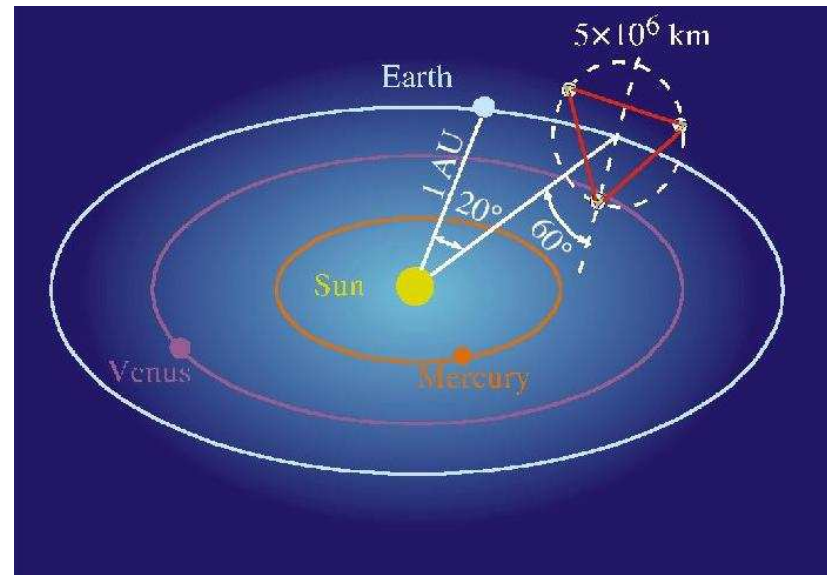
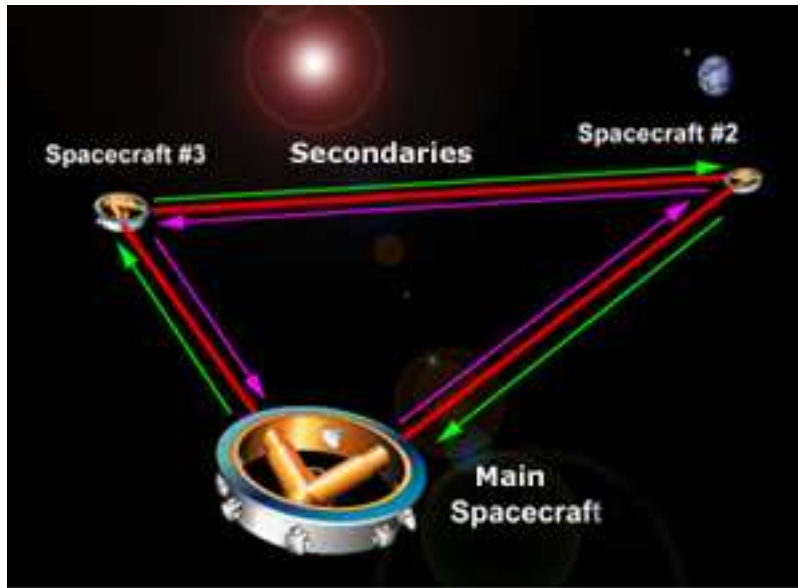
Posiblemente el LHC (Large Hadron Collider) ayude a identificar las partículas constituyentes de la materia oscura no bariónica.



El satélite STEP repetirá el experimento de Galileo en el espacio para testear con precisión de una parte 10^{18} la igualdad numérica entre las masas inercial y gravitatoria.

arXiv:0902.2247

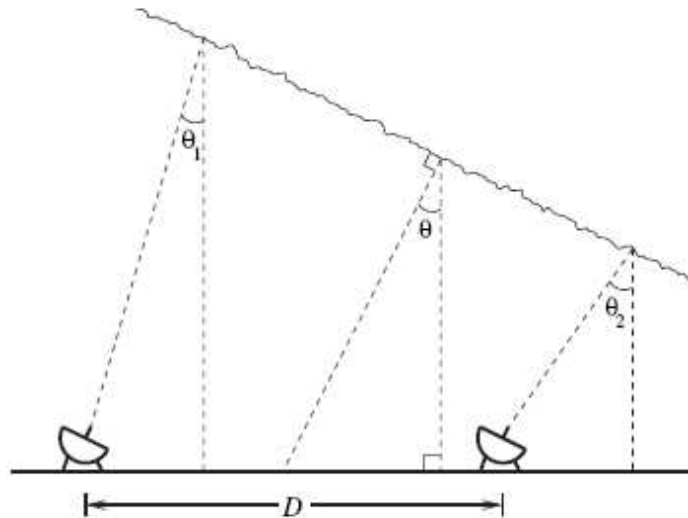
La detección y análisis de ondas gravitatorias producidas en el Big Bang podrían ayudarnos a reconstruir la evolución del factor de escala, $a(t)$, del Universo. Es de esperar que antenas de la siguiente generación a LISA cumplan esa misión en un futuro no lejano.



Se confía que en pocos años el satélite LISA (Laser Interferometer Space Antenna) se halle en órbita solar y en condiciones de detectar ondas gravitatorias de origen astrofísico.

El VLTI (Very Large Telescope Interferometer) consistirá en 4 telescopios fijos 8.2 metros de diámetro, más otros 4 móviles de 1.8 metros.

Debido a las fluctuaciones cuánticas el espacio-tiempo puede no ser continuo a la escala de Planck. Se ha sugerido que el VLTI podría detectar la textura del espacio-tiempo.



La figura muestra un interferómetro observando una onda electromagnética procedente de una galaxia lejana. Si el espacio-tiempo es discontinuo, se originarán pequeñas arrugas en el frente de ondas y la velocidad de fase presentará fluctuaciones que el interferómetro podría detectar.

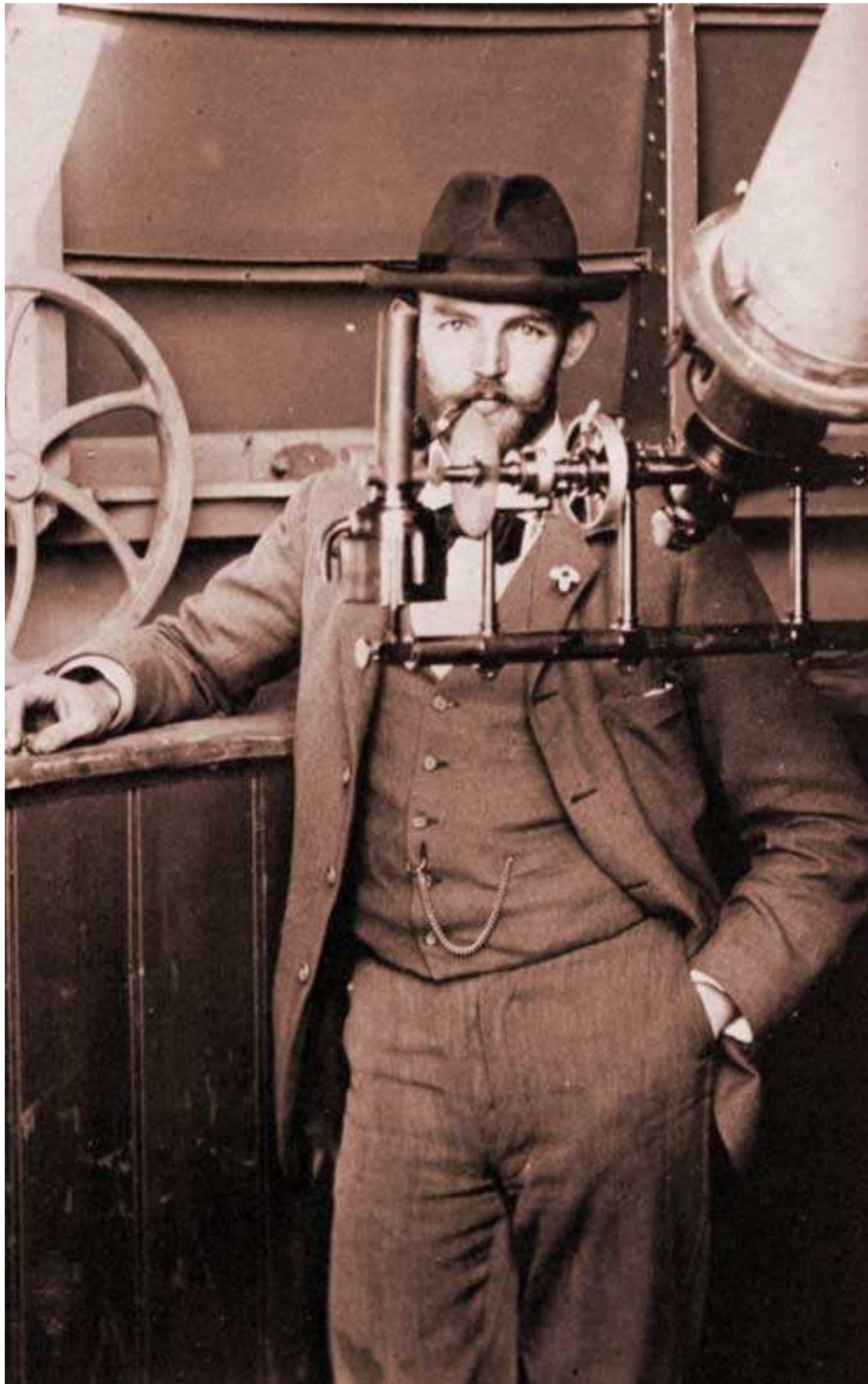


There is nothing new to be discovered in physics now.
All that remains is more and more precise measurement.

Lord Kelvin en 1900 ante “the British Association for the
Advancement of Science”

CONCLUSIONES

- Vivimos en la era de oro de la cosmología.
(Se ha afirmado, no sin cierta exageración, que hemos entrado en “la época de precisión” de esta ciencia).
- El advenimiento de una gran abundancia de datos de notable calidad permite sospechar que los pilares básicos de nuestra visión del Universo pueden verse alterados en los decenios inmediatos.
- La evolución del Universo es incierta pues predecir es muy difícil, especialmente el futuro.
- Al avanzar la cosmología más lentamente que las otras ciencias de su entorno no es atrevido decir que aún se halla en su infancia.



"It should not be forgotten that all this talk about the universe involves a tremendous extrapolation, which is a very dangerous operation."

Willen de Sitter,
Nature 128, 706
(1931)