A Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map showing temperature variations across the sky. The map is a complex, noisy pattern of colors ranging from dark blue (cooler) to red and white (warmer). The fluctuations are distributed in a somewhat isotropic but non-uniform manner, with some larger-scale structures and smaller-scale noise. The overall appearance is that of a textured, grainy surface with subtle variations in color intensity.

COSMOLOGÍA FÍSICA

COSMOLOGÍA FÍSICA

La Cosmología Física, producto del siglo XX, es sin duda uno de los temas científicos más fascinantes en la actualidad. Esta rama de la Astrofísica nace de la fusión de resultados de la Astronomía Observacional (particularmente del estudio de las galaxias) con las grandes teorías de la Física (inicialmente, con la Relatividad General de Einstein y posteriormente con la Mecánica Cuántica y demás). En esta charla se presenta un panorama general del desarrollo que ha tenido desde sus orígenes hasta nuestros días.



**Inicios de la Cosmología
Observacional:
Ley de Hubble**



Vesto Melvin Slipher (1875-1969)

Lowell Observatory, Flagstaff, Arizona

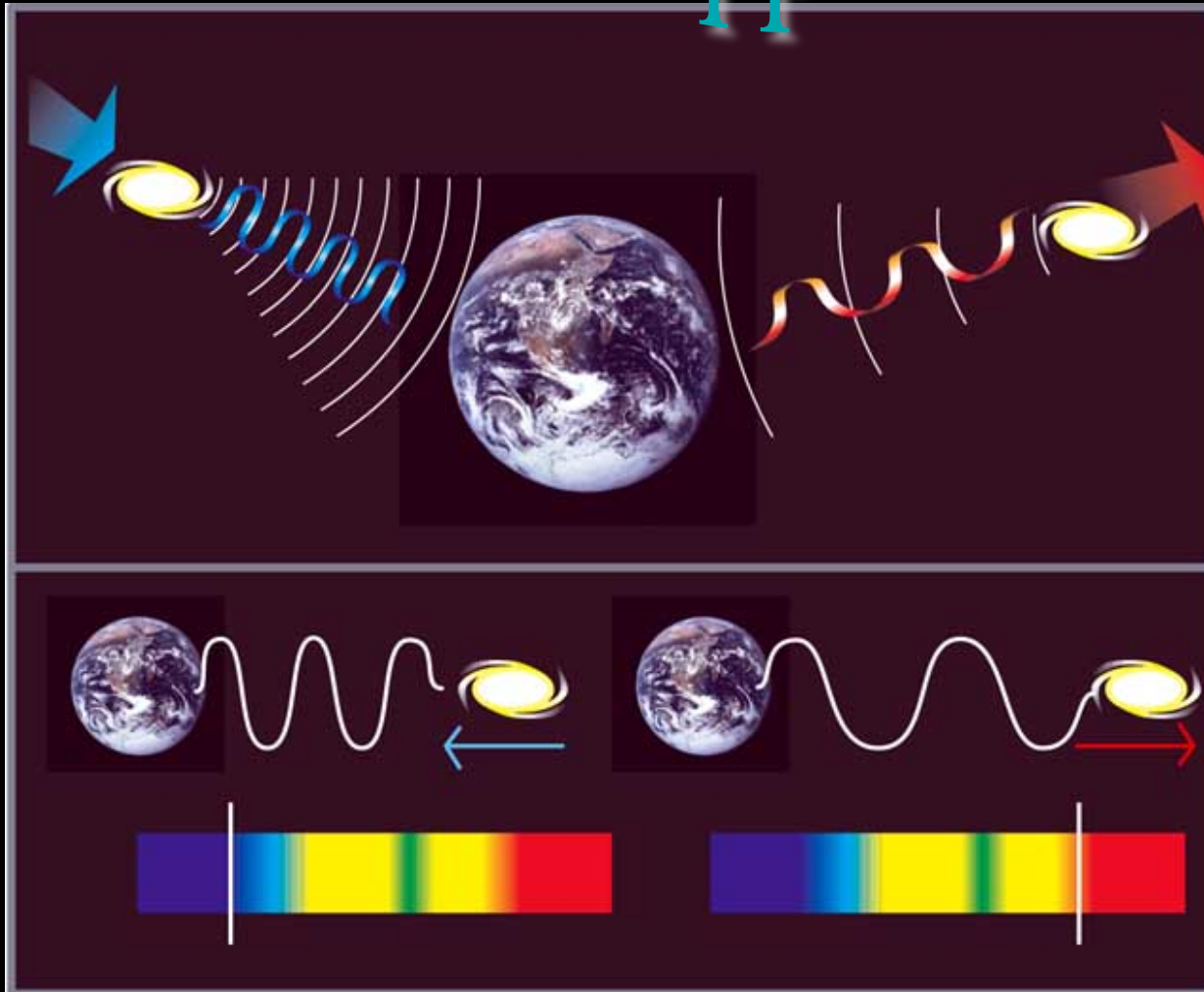
Primero en medir la velocidad de las galaxias (la primera fue Andrómeda, en 1912). Al tomar espectros de hasta 80 horas de exposición descubrió que las galaxias se alejan de nosotros. Esta fue la primera evidencia física de la expansión del Universo.

¿Cómo se mide la velocidad de las galaxias?

En las líneas del espectro se mide el corrimiento Doppler $\Delta\lambda$ para una cierta longitud de onda λ . La velocidad se determina mediante la ecuación del efecto Doppler:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

Efecto Doppler



Primero estudió y por un breve tiempo practicó la carrera de Leyes, pero luego decidió dedicarse a la Astronomía.

Sus enormes contribuciones a la Cosmología incluyen:

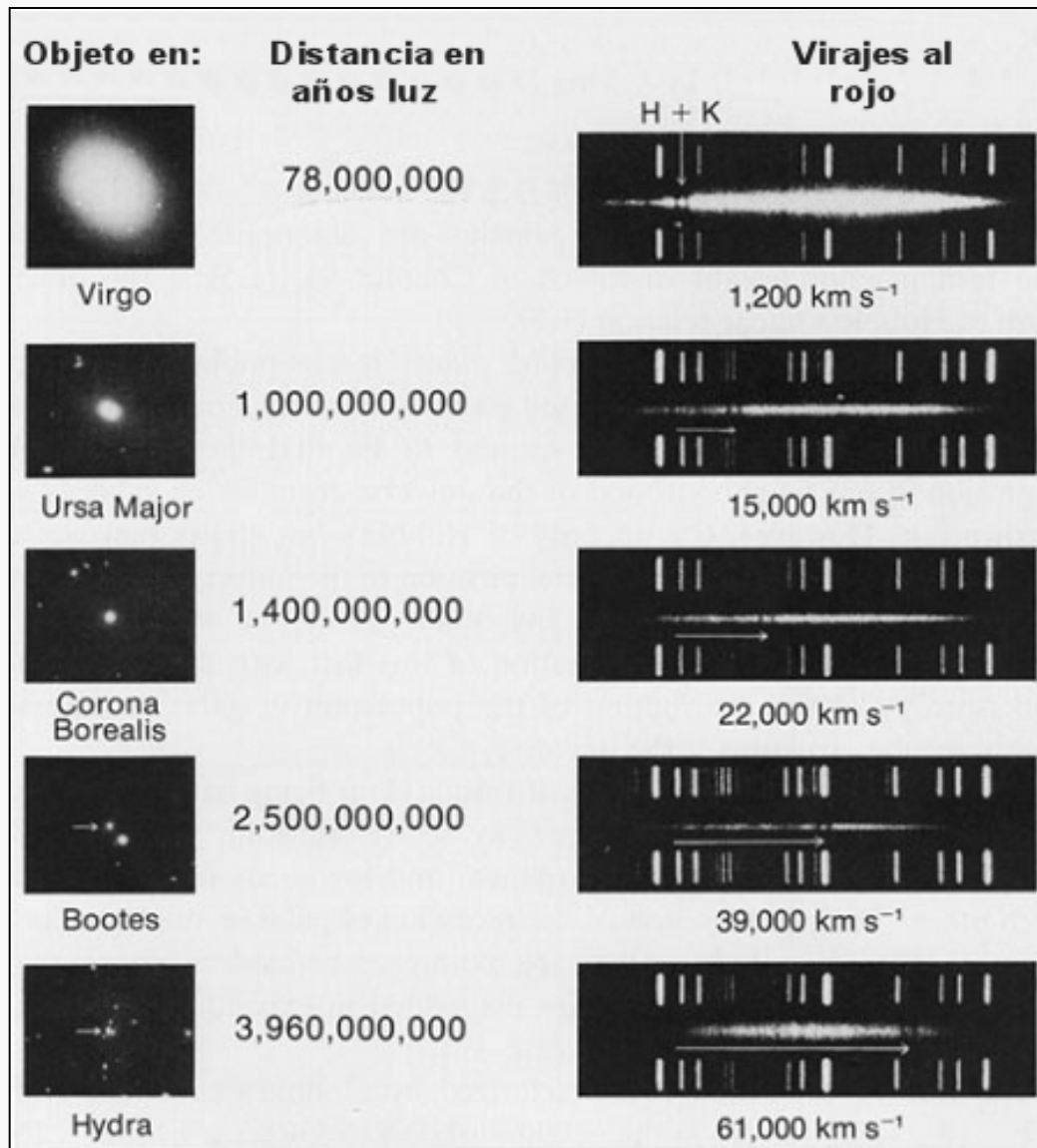
- ❖ Las galaxias son universos-isla.
- ❖ Clasificación morfológica de las galaxias.
- ❖ El Universo se expande de acuerdo a la Ley de Hubble:
 $c z = H_0 D$ $[v = H D]$
- ❖ Estudios acerca de la homogeneidad e isotropía del Universo.



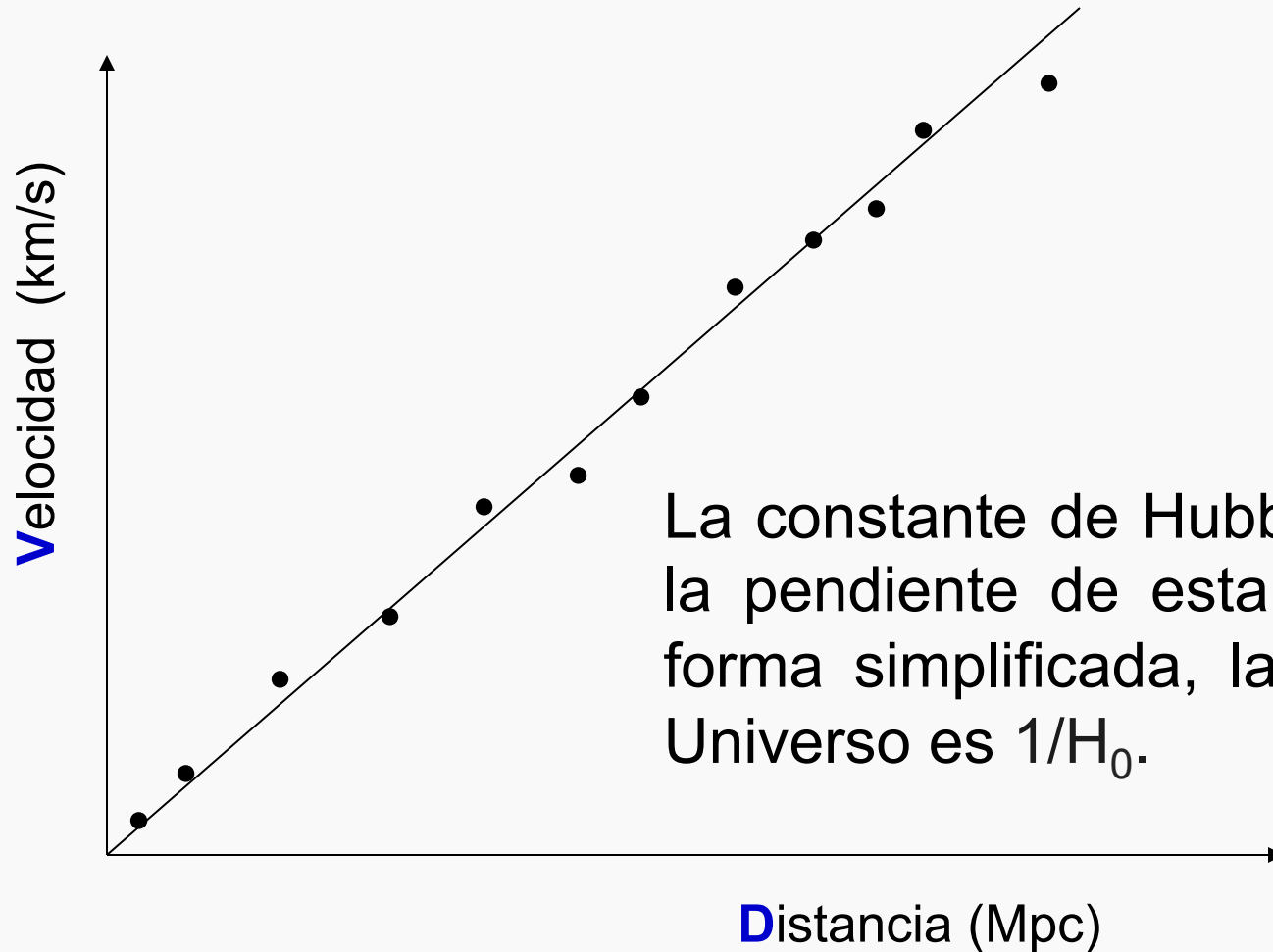
Edwin Hubble (1889-1953)

Sus principales resultados aparecen en su libro *The Realm of the Nebulae*.

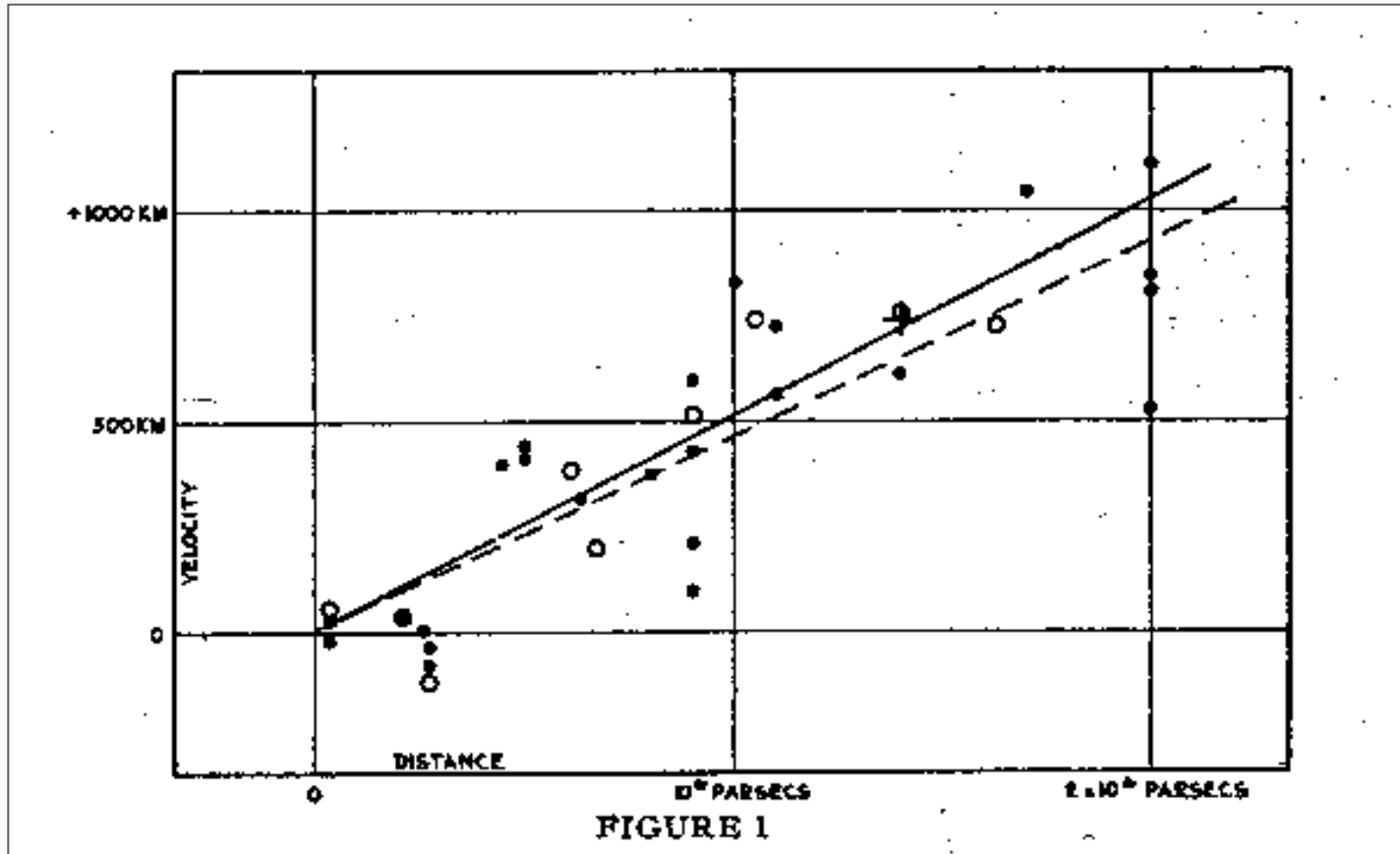
Distancia y velocidad para algunos objetos



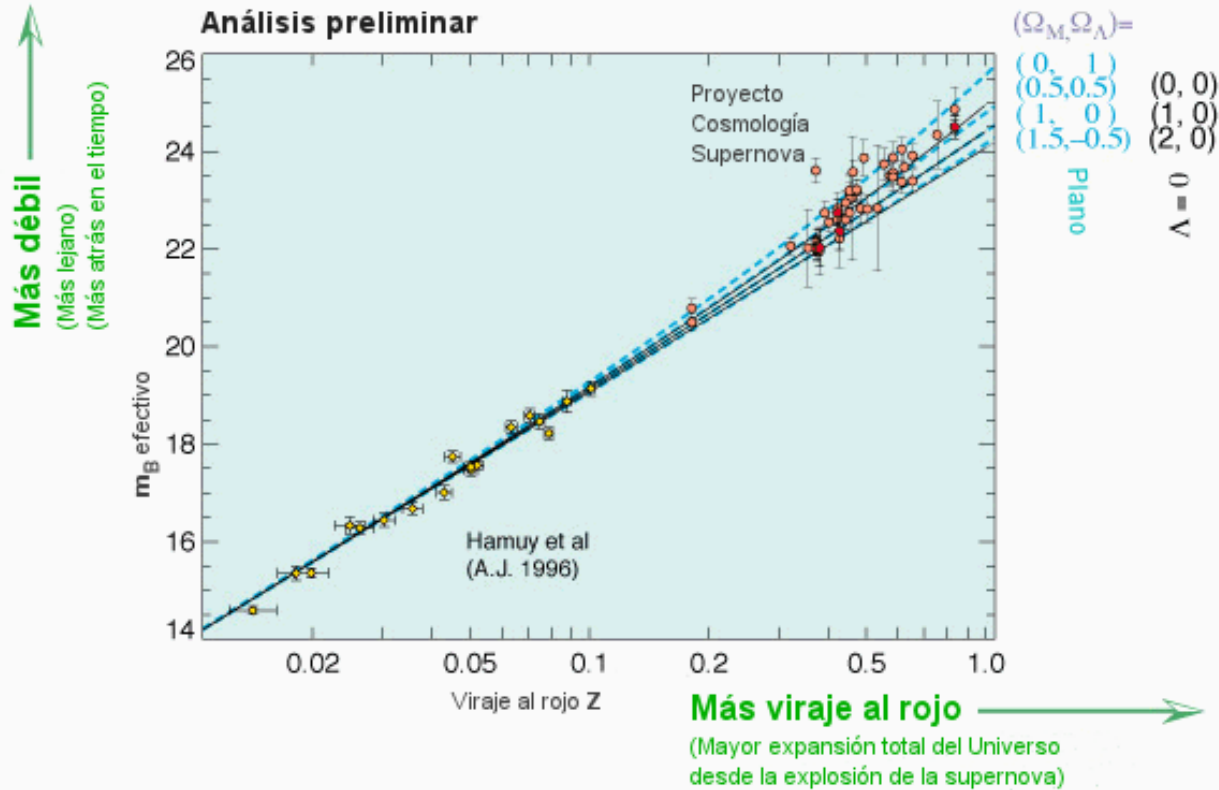
Ley de Hubble: $V = H_0 D$



Relación Distancia-Velocidad entre nebulosas extragalácticas (diagrama original de Hubble)



Gráficas Hubble

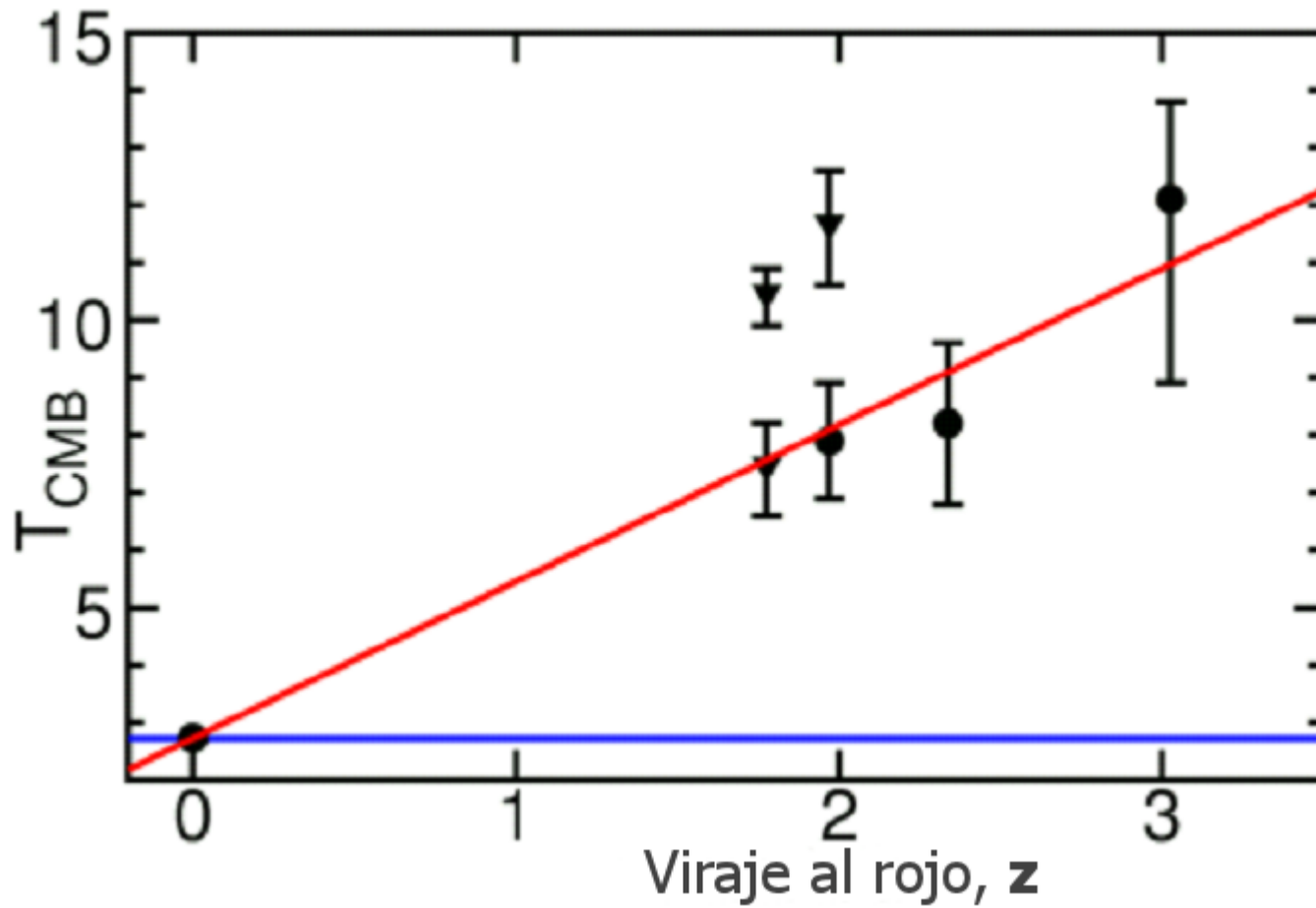


Por muchos años se discutió sobre la Constante de Hubble, debate resuelto en favor del valor 72 km/s/Mpc a principios de los 1990's, gracias a los trabajos con las supernovas la y con el Telescopio Hubble, entre otros. En consecuencia, la edad estimada del Universo es de 14,000 millones de años.

La distancia a las galaxias se determina utilizando candelas estándar. Las más comunes son las estrellas variables de tipo cefeida y las supernovas de tipo Ia. La candela estándar proporciona el valor de la magnitud absoluta. Con una simple medición fotométrica de la magnitud aparente la distancia se determina con la siguiente ecuación (por simplicidad no se ha tomado en cuenta el efecto del polvo en esta ecuación):

$$d = 10^{(m-M+5)/5}$$

$$T_{CMB} = T_o(1+z)$$



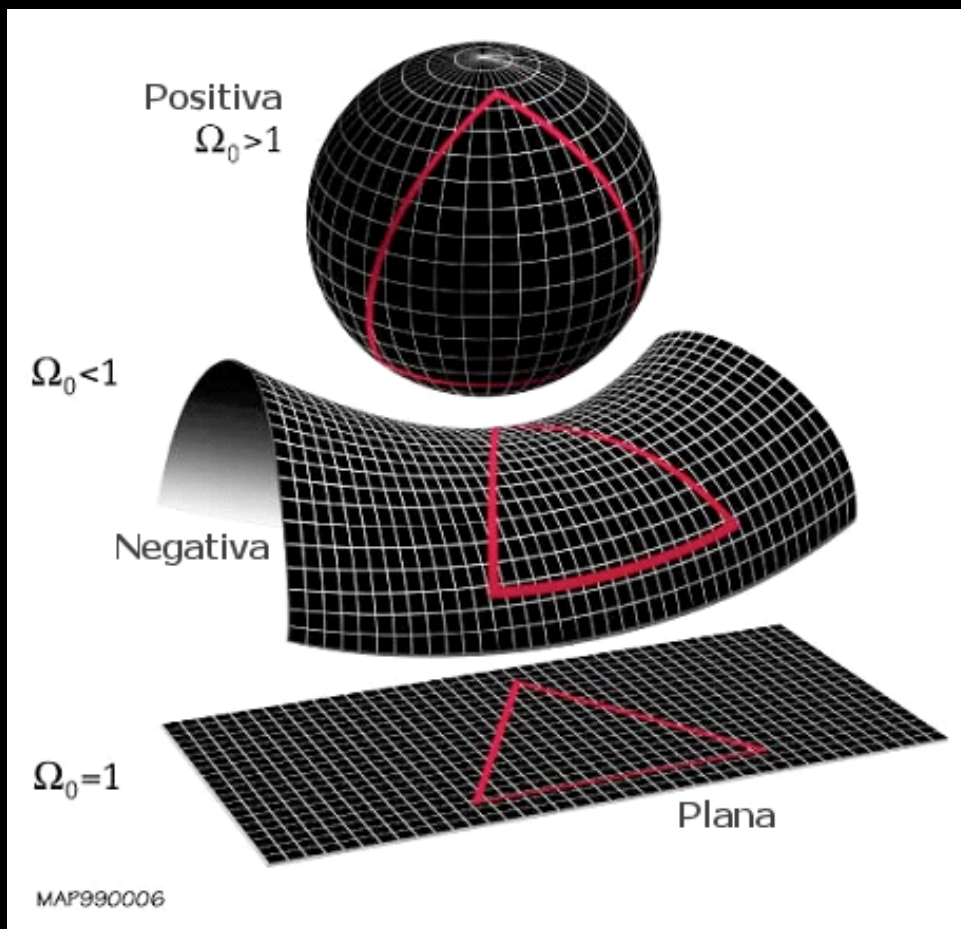
Geometría del Espacio



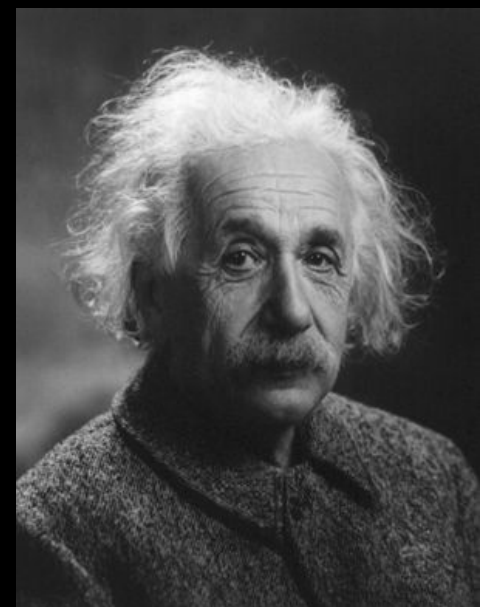
Nicolai Ivanovich
Lobachevski
(1793-1856)



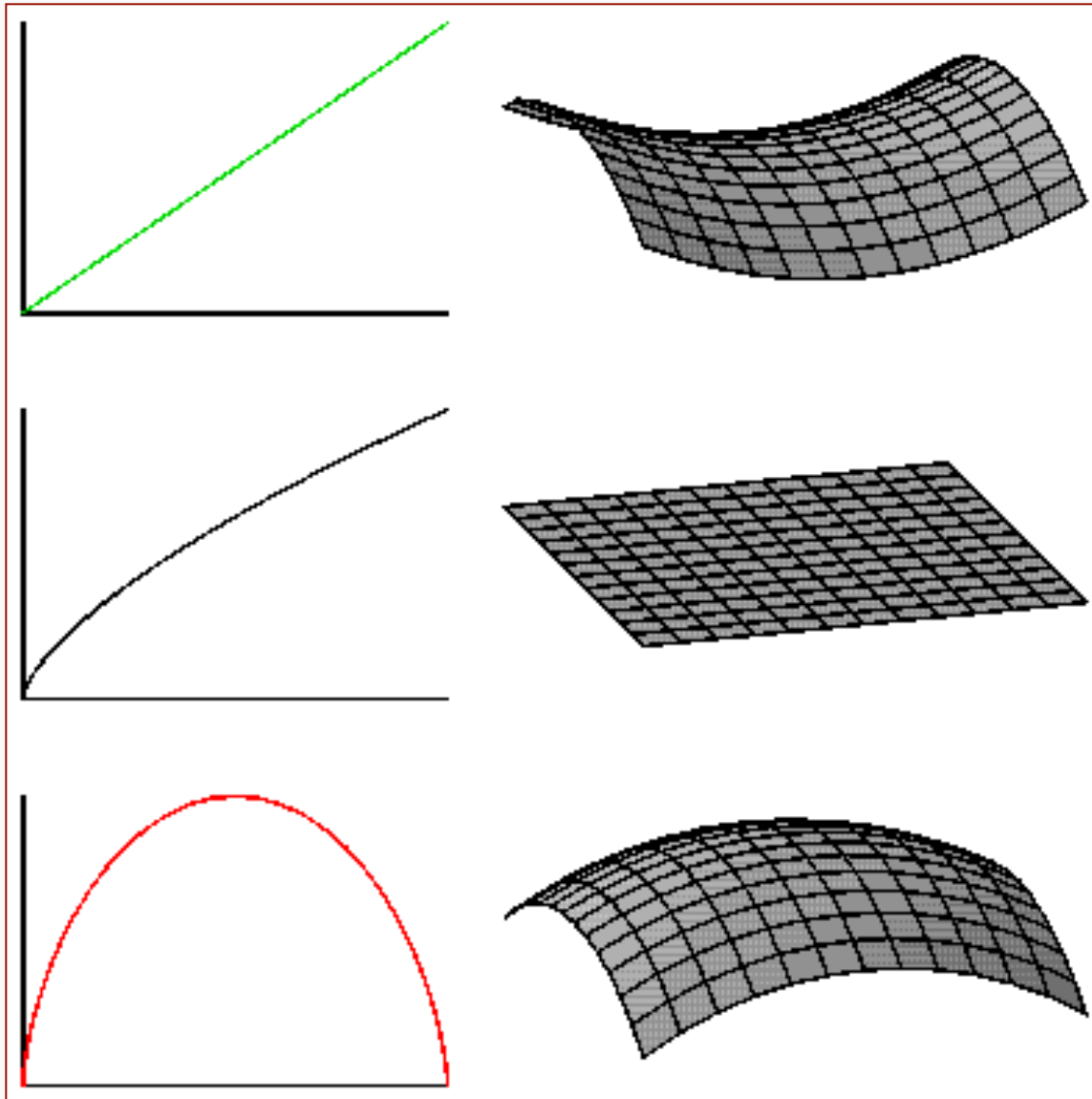
Carl Friedrich Gauss
(1777-1885)

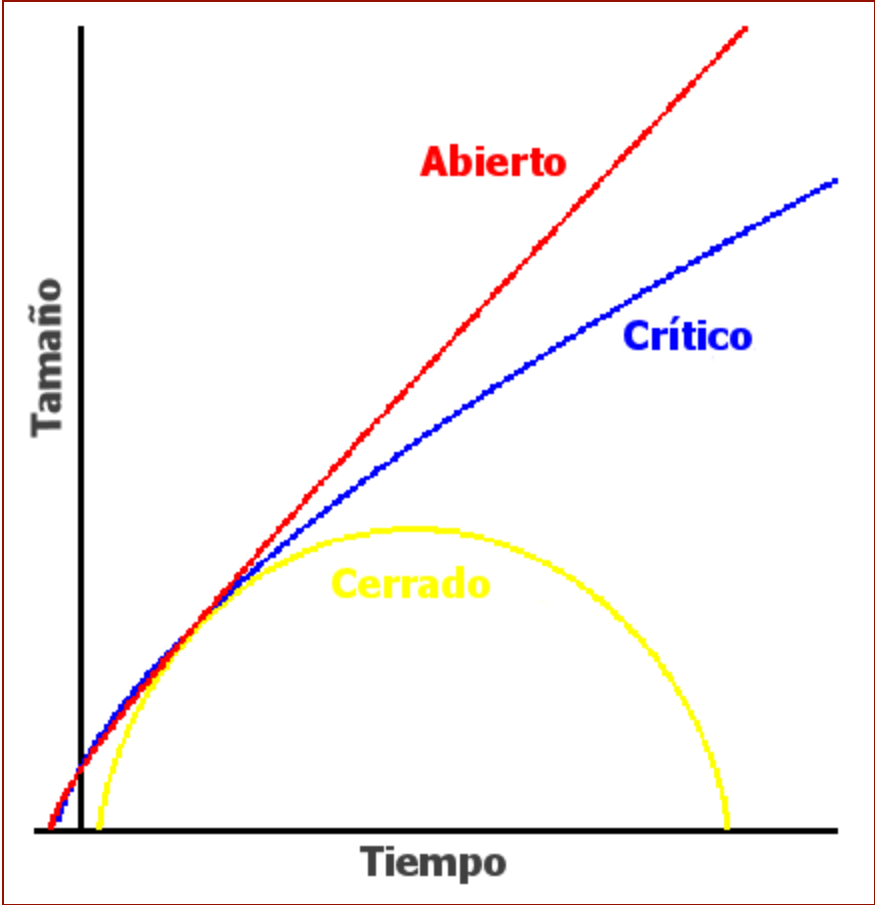


Bernhard Riemann
(1826-1866)



Albert Einstein
(1879-1955)



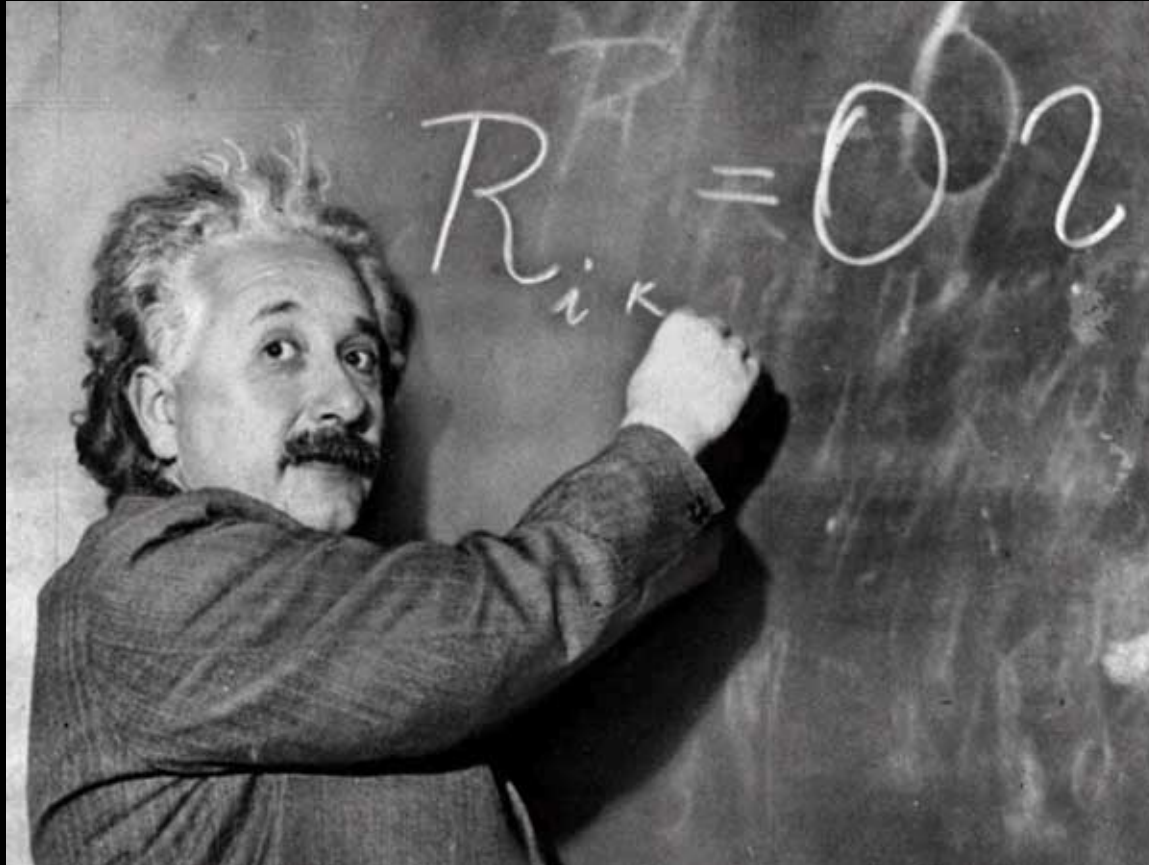


Si el **Universo** es **cerrado**, éste se expandirá hasta llegar a un valor máximo, después de lo cual empezará a contraerse. Para que pueda ocurrir esto se requiere mucha más materia de la que se piensa que existe en el Universo \longrightarrow Geometría positiva (esférica).

Si el **Universo** es **abierto** jamás se detendrá la expansión \longrightarrow Geometría negativa (silla de montar).

En el **Universo crítico** se tiene la materia justa para que se expanda por siempre \longrightarrow Geometría plana (euclidiana).

A gran escala el Universo es homogéneo e isotrópico



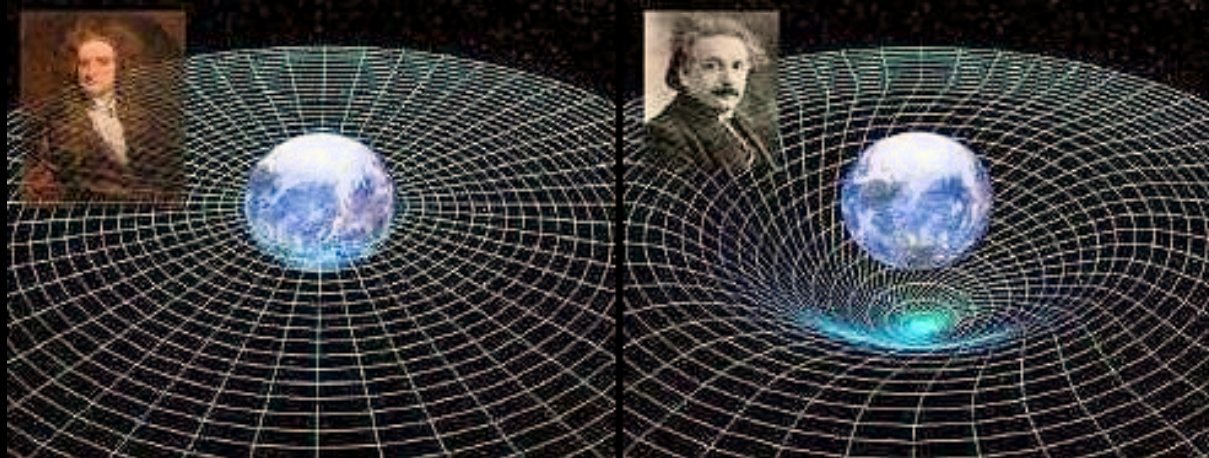
Principio Cosmológico de Einstein:
Hipótesis esencial para la comprensión del Universo

Teoría de la Relatividad General

materia ↔

Curvatura
del espacio-tiempo





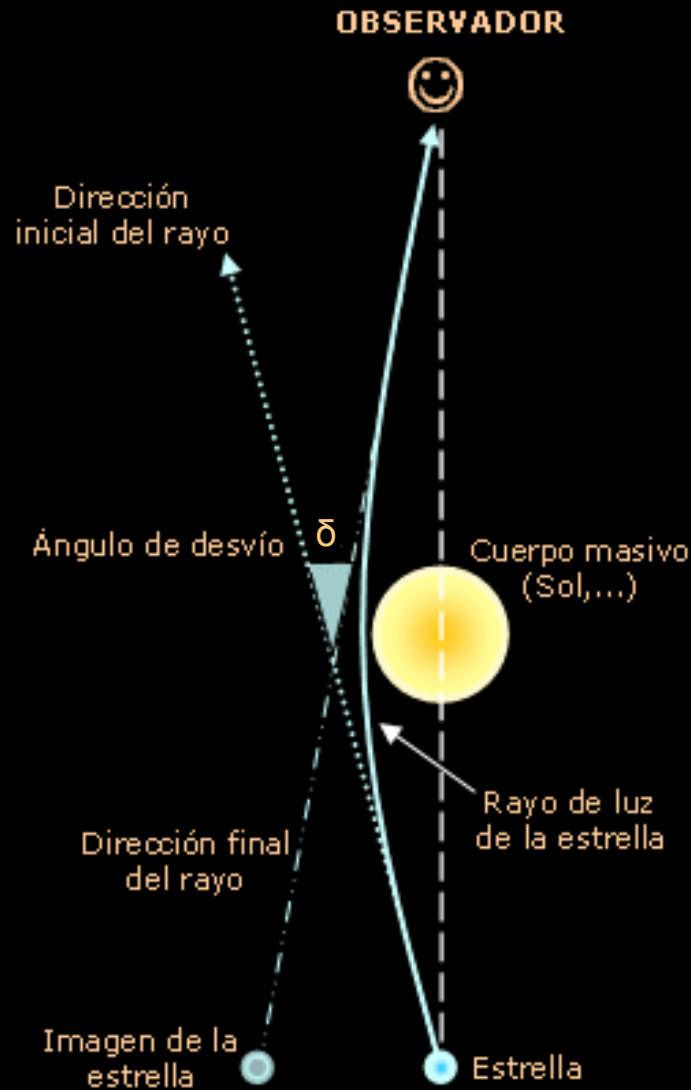
Espacio fijo de Newton

Espacio-tiempo flexible de Einstein

Pruebas de la Teoría de la Relatividad

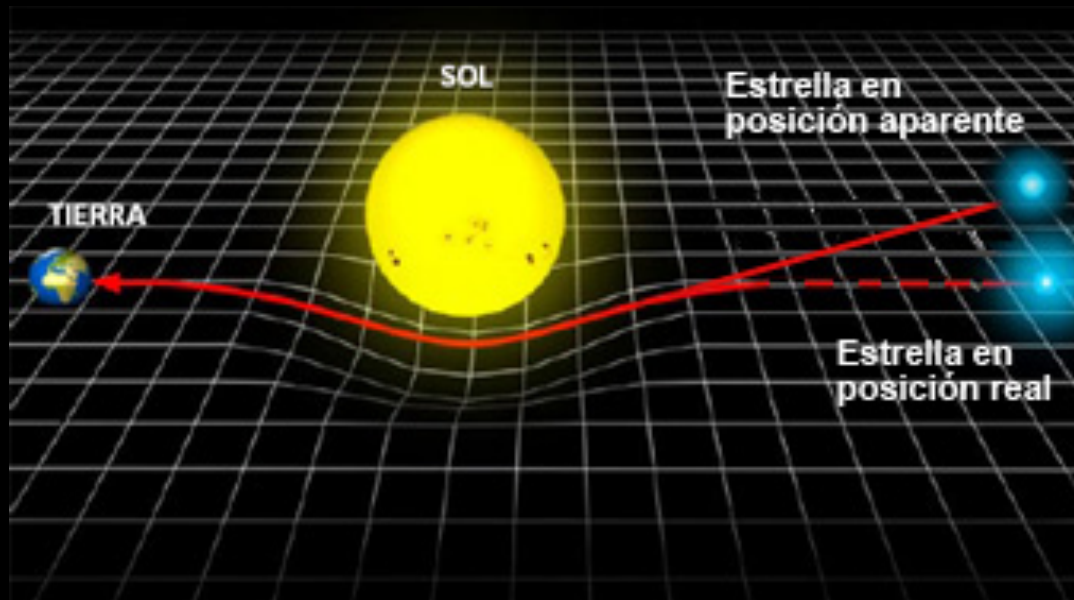
- ❖ Desviación de luz estelar por el Sol
- ❖ Precesión de la órbita de Mercurio
- ❖ Corrimiento al rojo relativista
- ❖ Lentes gravitacionales
- ❖ Ondas gravitacionales

Trayectoria de la luz en un campo gravitacional



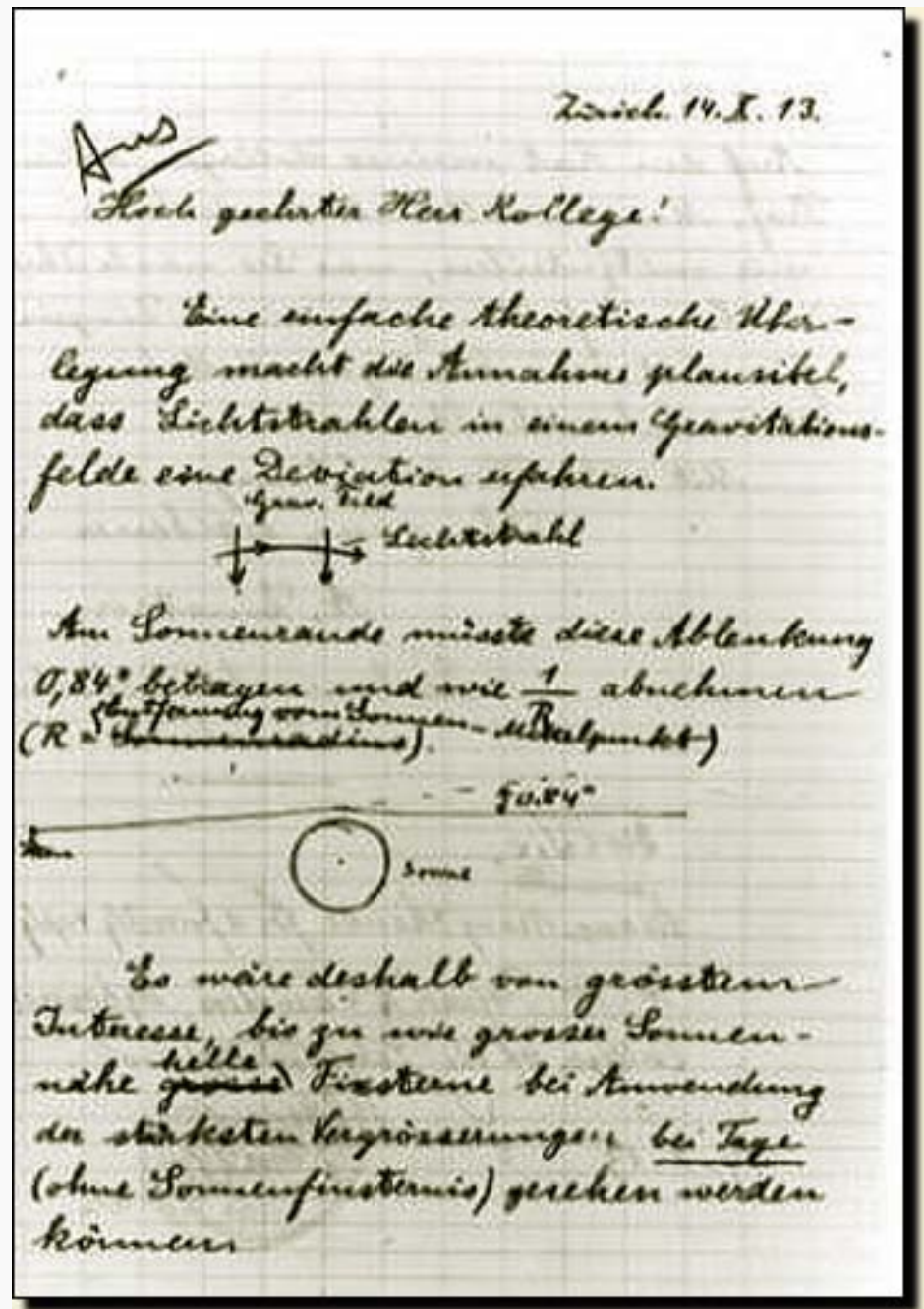
De acuerdo con la mecánica clásica, la luz viaja siempre en línea recta, por carecer de masa. En contraste, en Relatividad General la luz que pasa cerca de un objeto masivo es desviada de acuerdo con la curvatura del espacio-tiempo.

Desviación de la luz de una estrella por el Sol



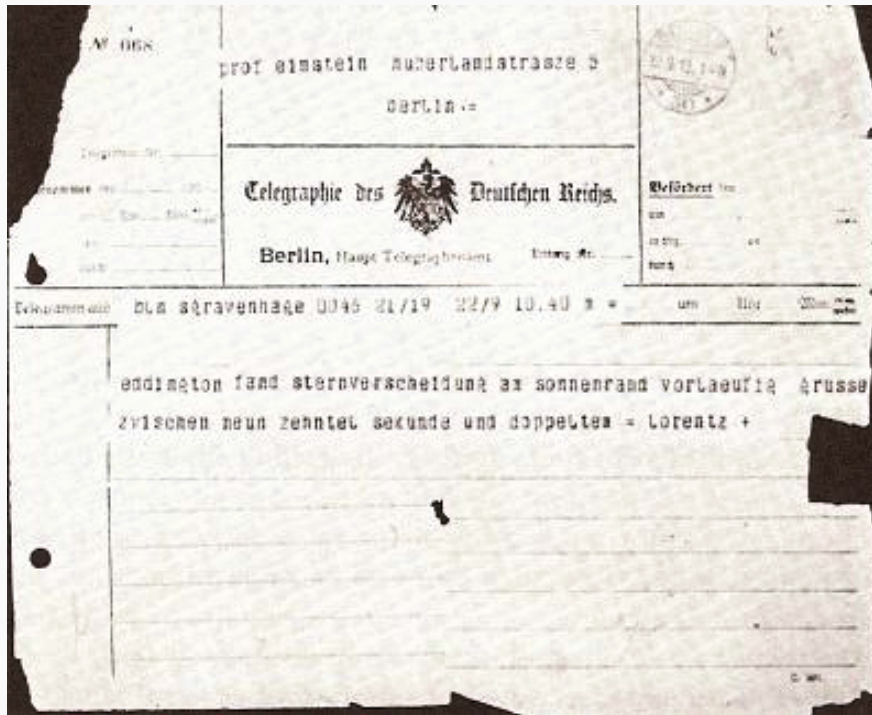
Una de las primeras demostraciones de la Relatividad General fue la predicción del ángulo con que se desvía la luz proveniente de una estrella al pasar muy cerca del Sol (cosa que se comprobó durante el eclipse total de Sol de 1919).

Carta de Einstein al Astrónomo George E. Hale en 1913, en la que le propone medir la desviación de la luz de las estrellas debida al campo gravitacional del Sol.



Revolution in science - New theory of the Universe - Newtonian ideas overthrown.

The London Times



El telegrama original a Einstein confirmándole la exitosa observación de Eddington de la desviación de la luz de estrellas en la trayectoria del Sol durante el eclipse del 29 de mayo de 1919. El telegrama fue enviado por el físico holandés H. A. Lorentz y dice que “Eddington ha encontrado una deflexión estelar en el limbo solar provisionalmente entre 0.9 segundos de arco y el doble de eso”.

Derechos sobre la imagen: Museum Boerhaave, Leiden.

El 29 de mayo de 1919 Arthur Eddington, al analizar fotografías tomadas durante el eclipse, comprobó que el ángulo de desviación de la luz proveniente de una estrella en la dirección del Sol es consistente con la teoría de la Relatividad General.

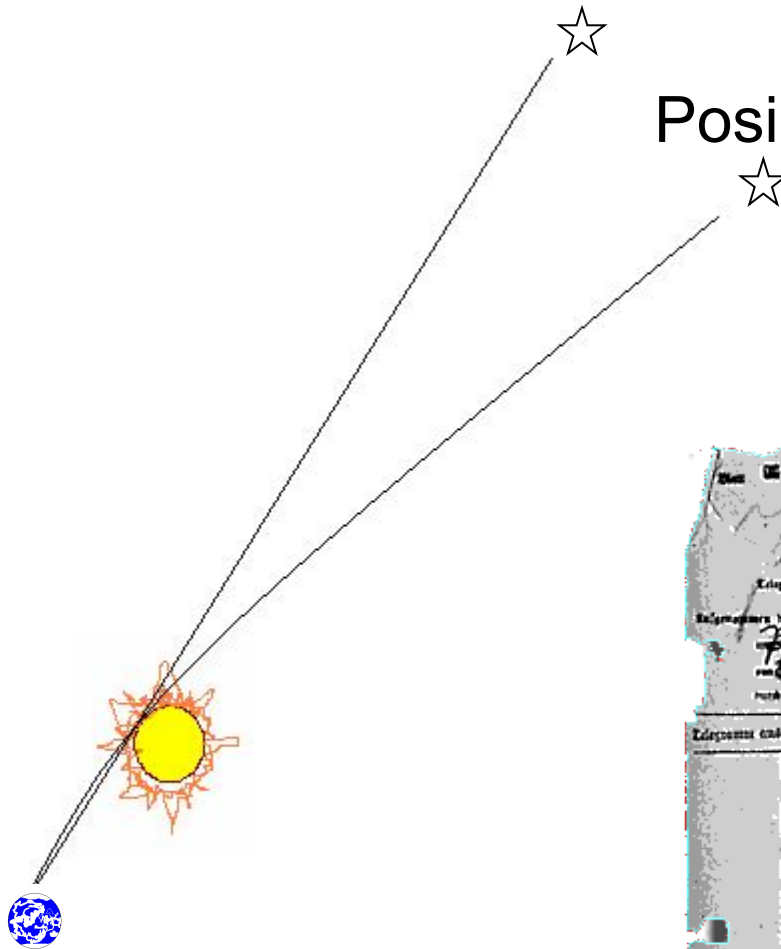
Este experimento se realiza en la actualidad (sin necesidad de esperar a que ocurra un eclipse) con radio-interferómetros.

Observación por Eddington del eclipse total de Sol

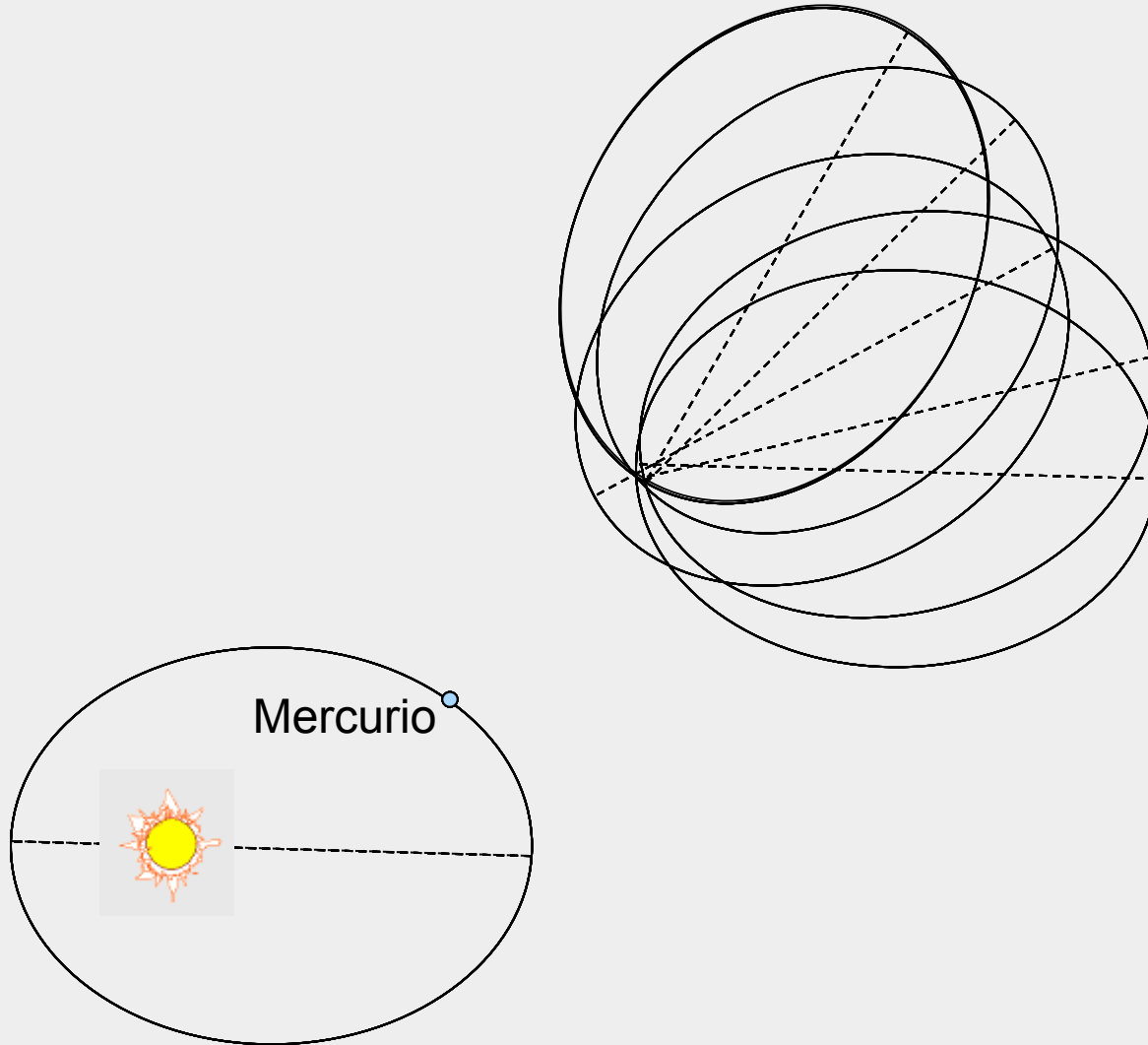


Posición aparente

Posición real



Precesión de la órbita de Mercurio

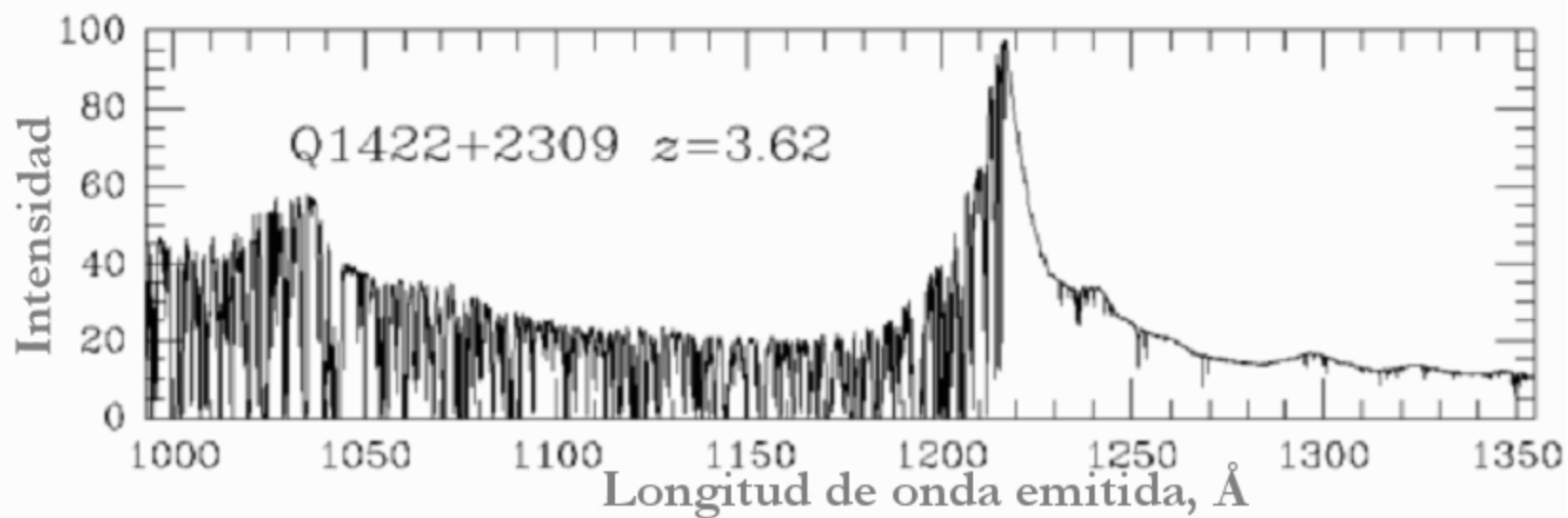
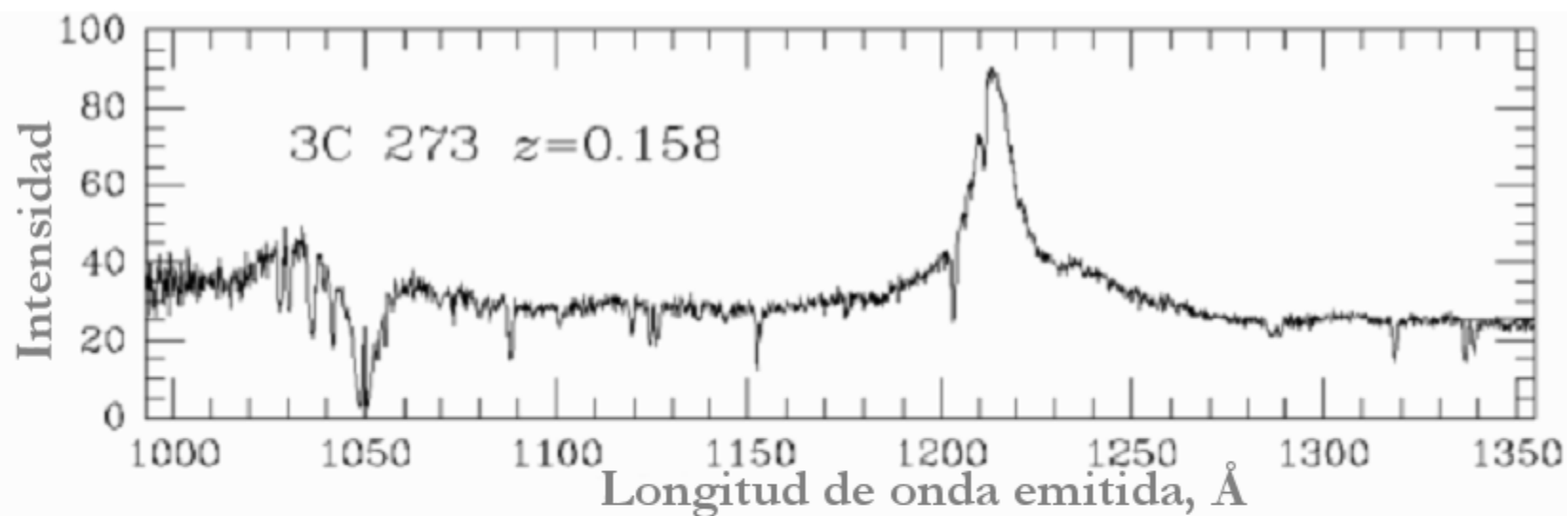


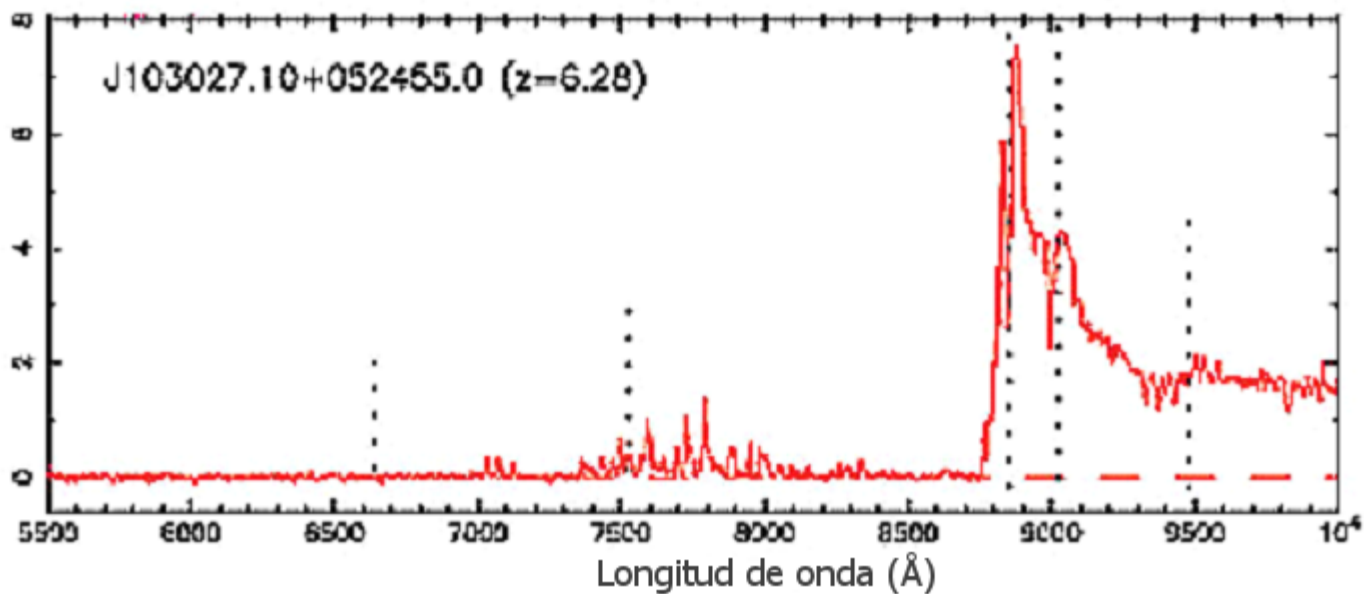
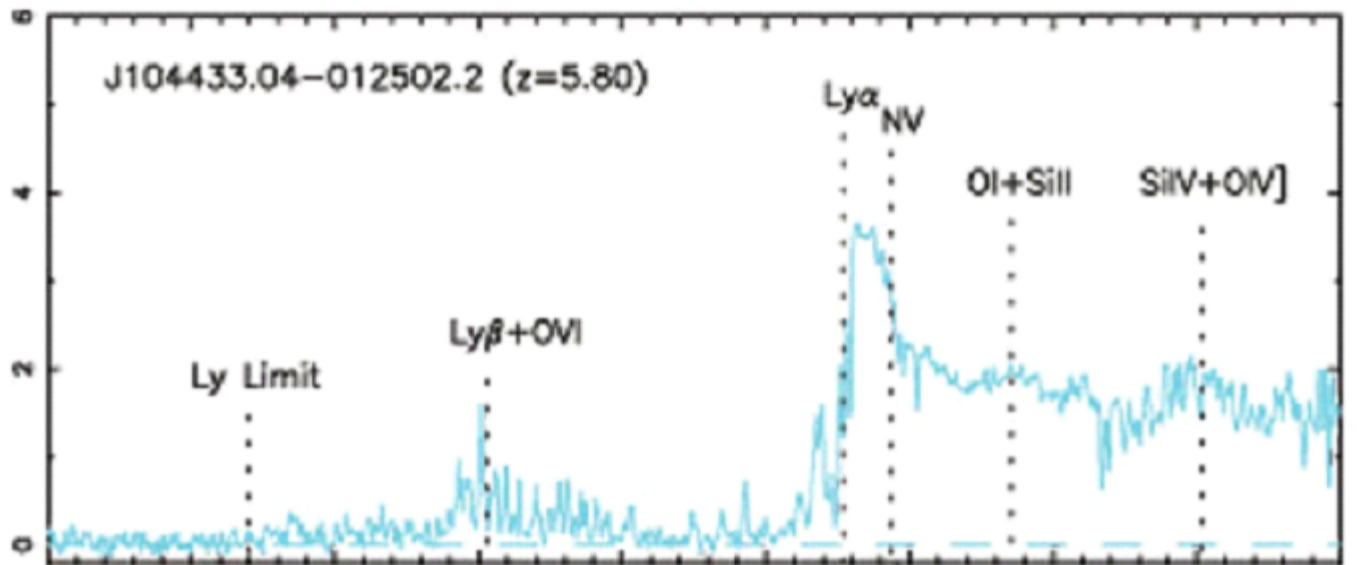
La precesión de la órbita de Mercurio es de 5,600 segundos de arco por siglo. Considerando los efectos gravitacionales debidos a la influencia de los demás planetas, la mecánica newtoniana predice una precesión de sólo 5,557 arcseg/siglo (una diferencia de 43" / siglo).

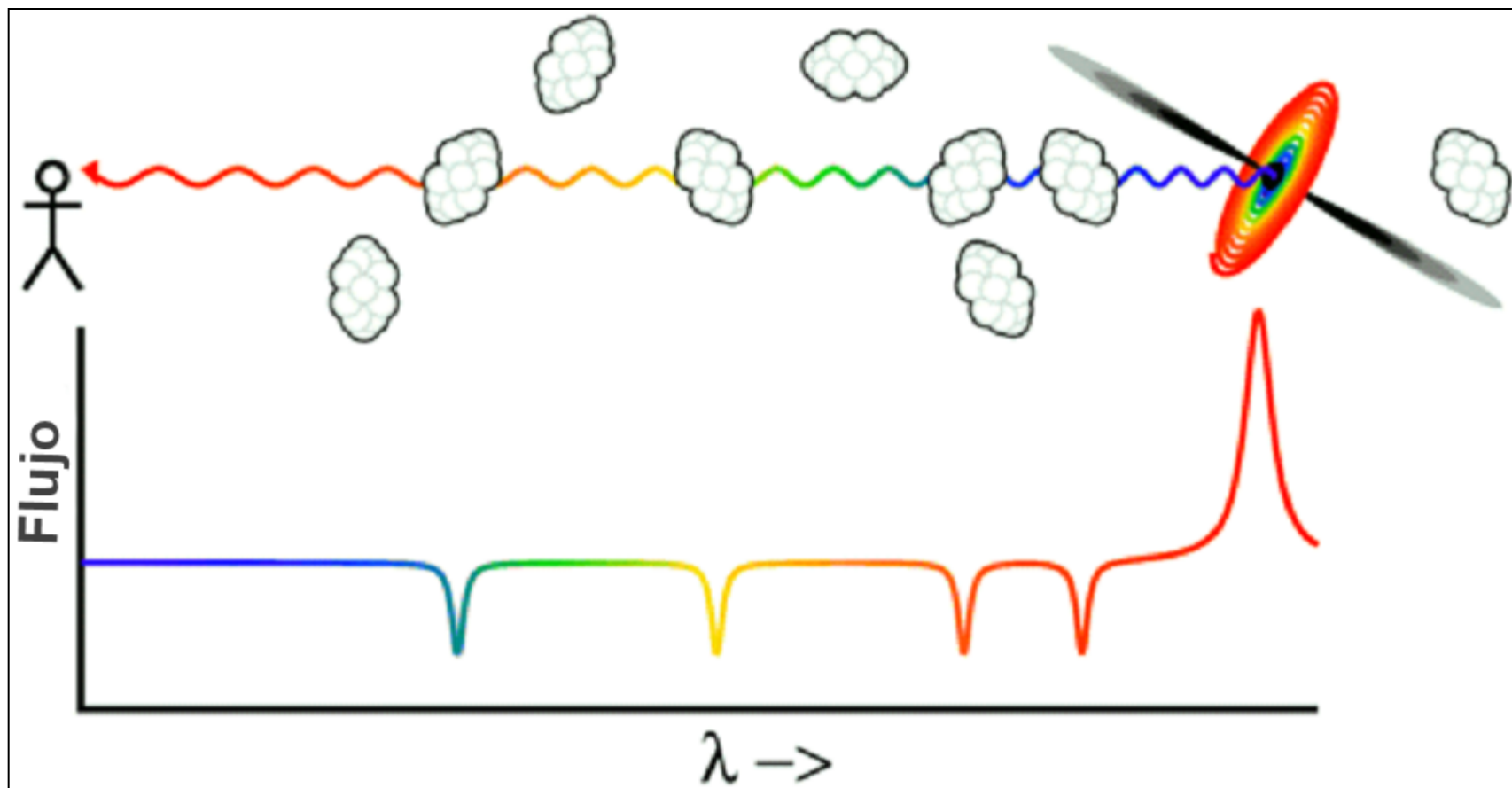
La Relatividad General predice el valor correcto.

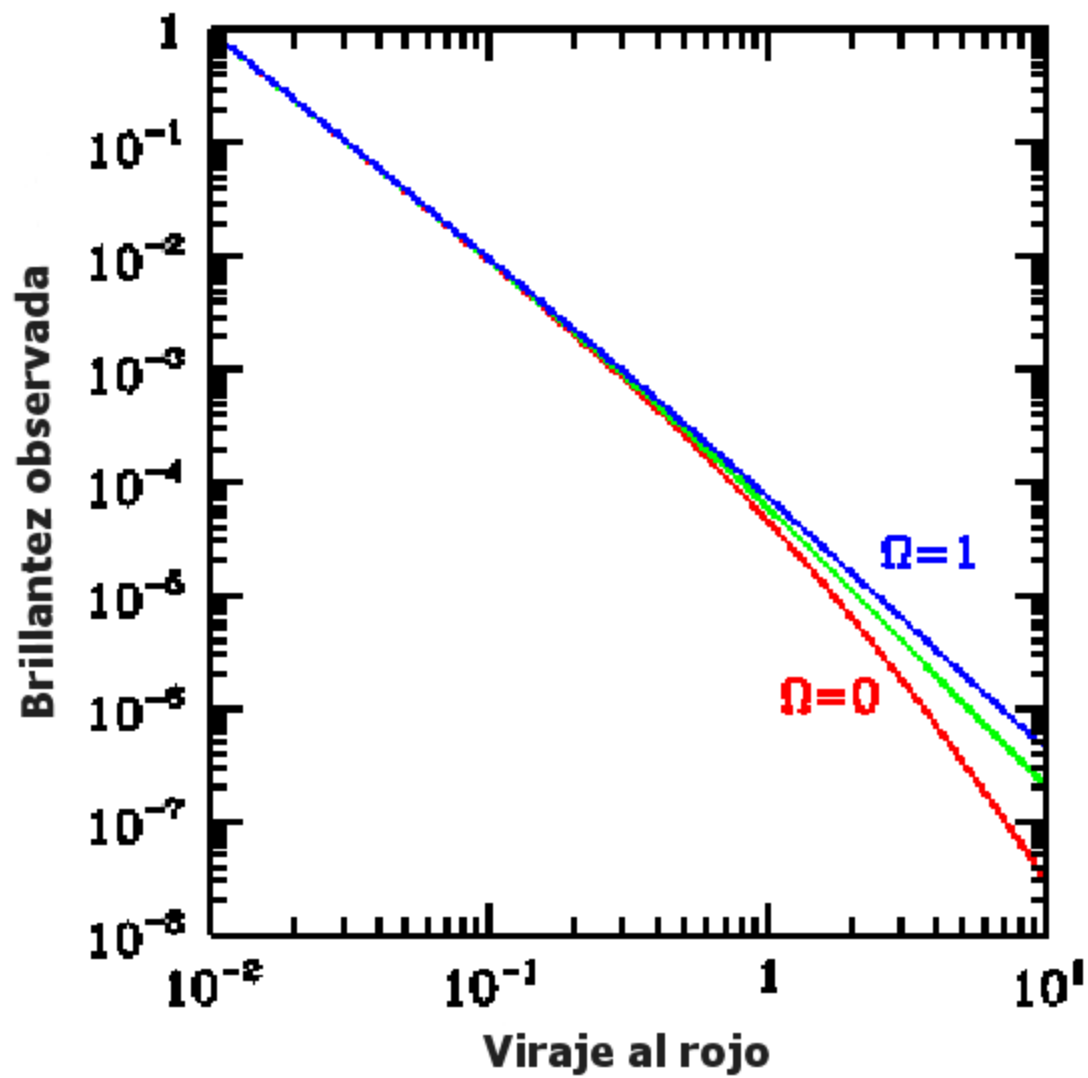
El efecto de la R. G. es mucho menor en los otros planetas. Por este motivo, su precesión es correctamente explicada (dentro de la precisión de las observaciones) por la mecánica clásica.

Se ha intentado explicar la precesión de Mercurio en términos de una distribución uniforme de polvo, pero dicha distribución no se ha observado.









Lentes Gravitacionales

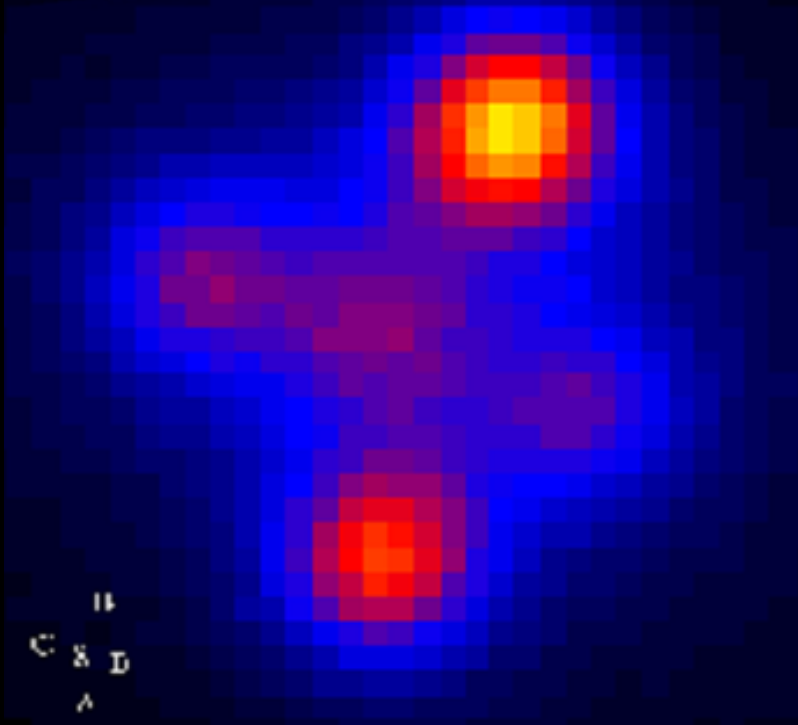


Cúmulo de galaxias Abell 2218

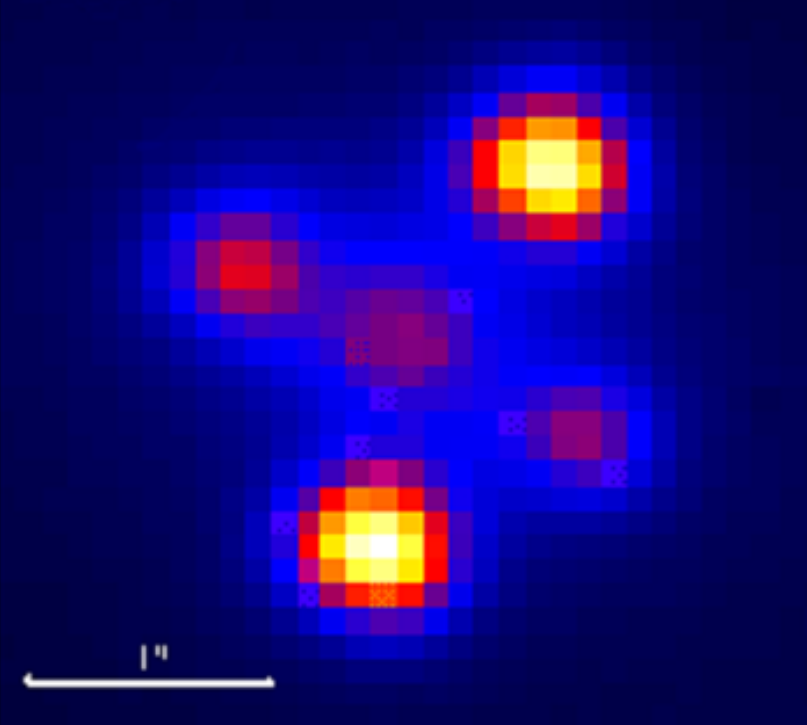
HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08

Ago 1991



Ago 1994



Las estrellas en la galaxia al frente parecen actuar como lentes gravitacionales, haciendo que las imágenes cambien su brillantez relativa en estas dos fotografías tomadas con un intervalo de tres años.

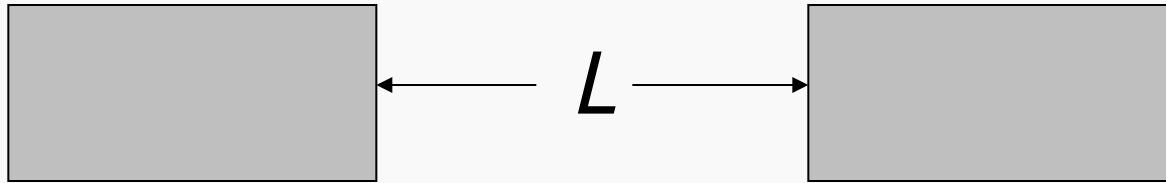
Lensing Galaxy





Detector de Ondas Gravitacionales

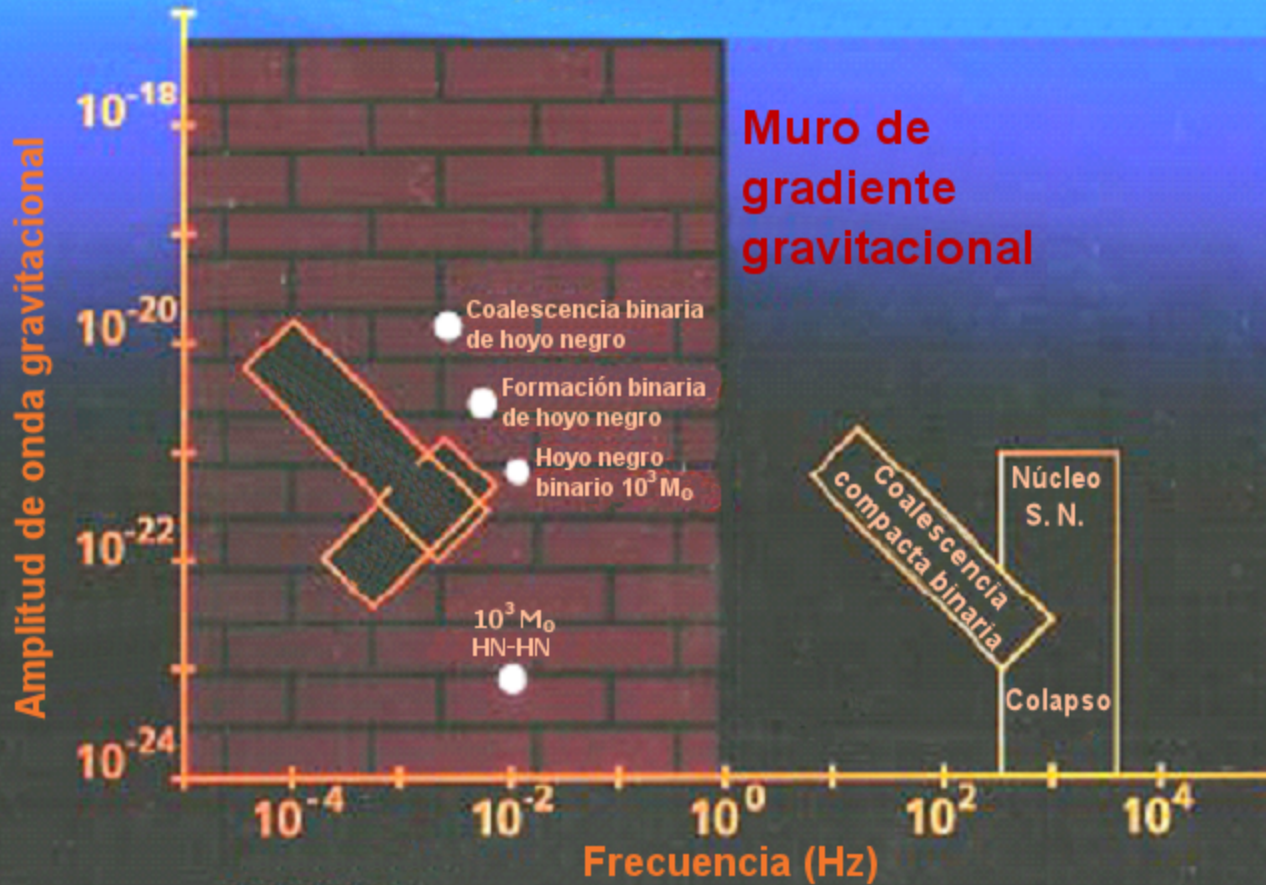
Un detector sencillo podría consistir en dos masas que se mueven libremente. Se tiene que monitorear la distancia de separación L .

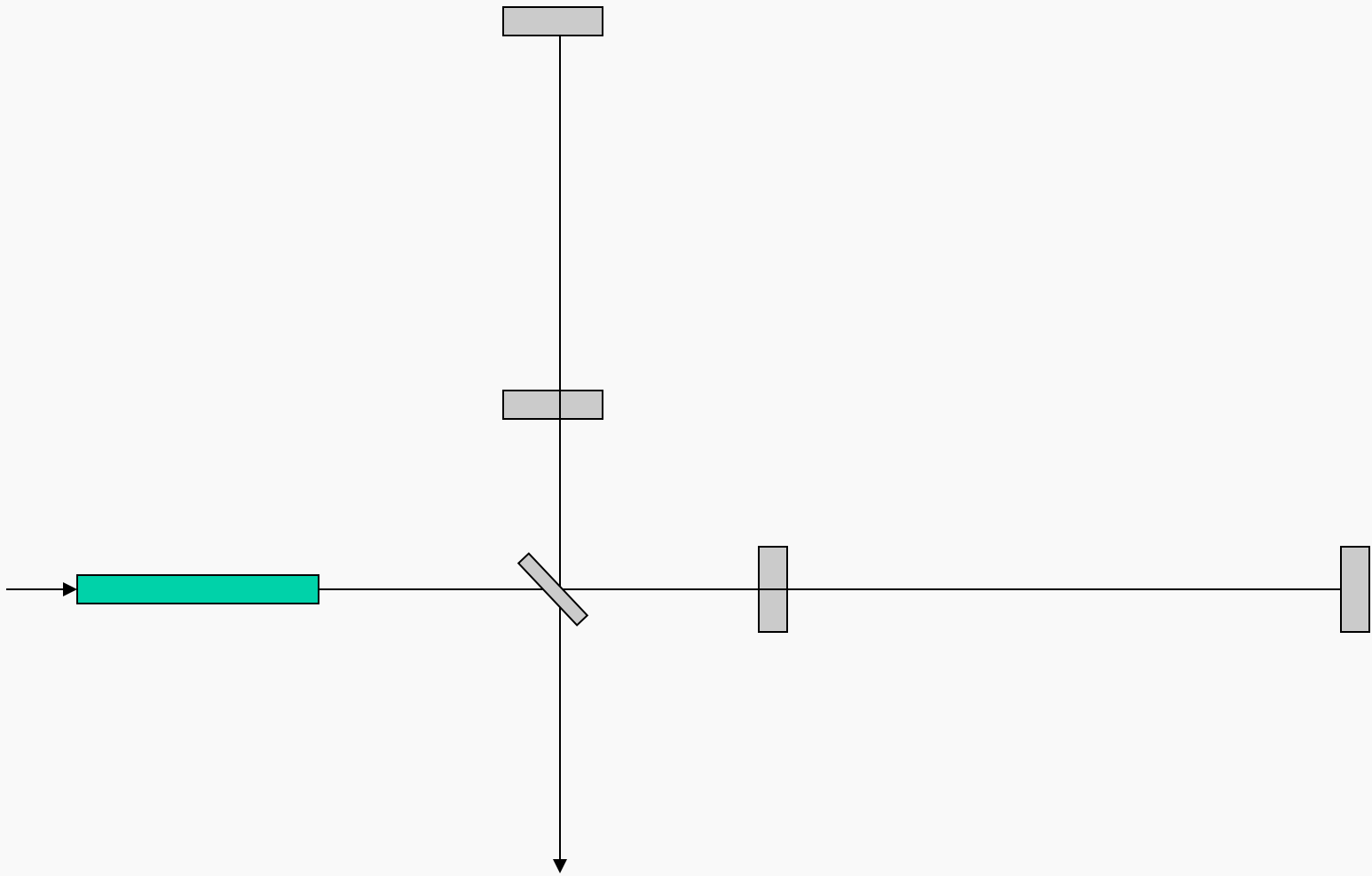


La variación de la longitud L está relacionada con la amplitud h de la onda gravitacional, mediante la siguiente expresión:

$$\Delta L = h/2$$

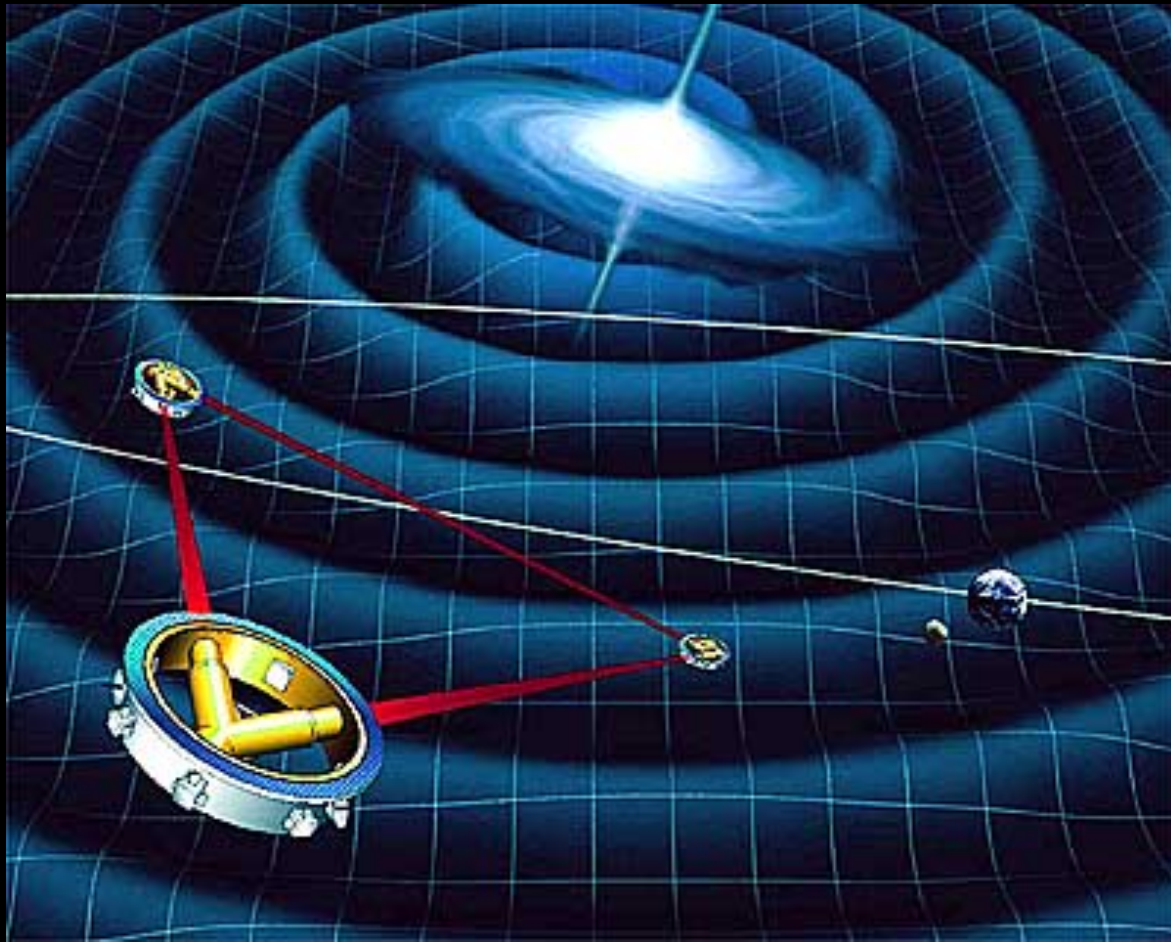
El espectro de ondas gravitacionales



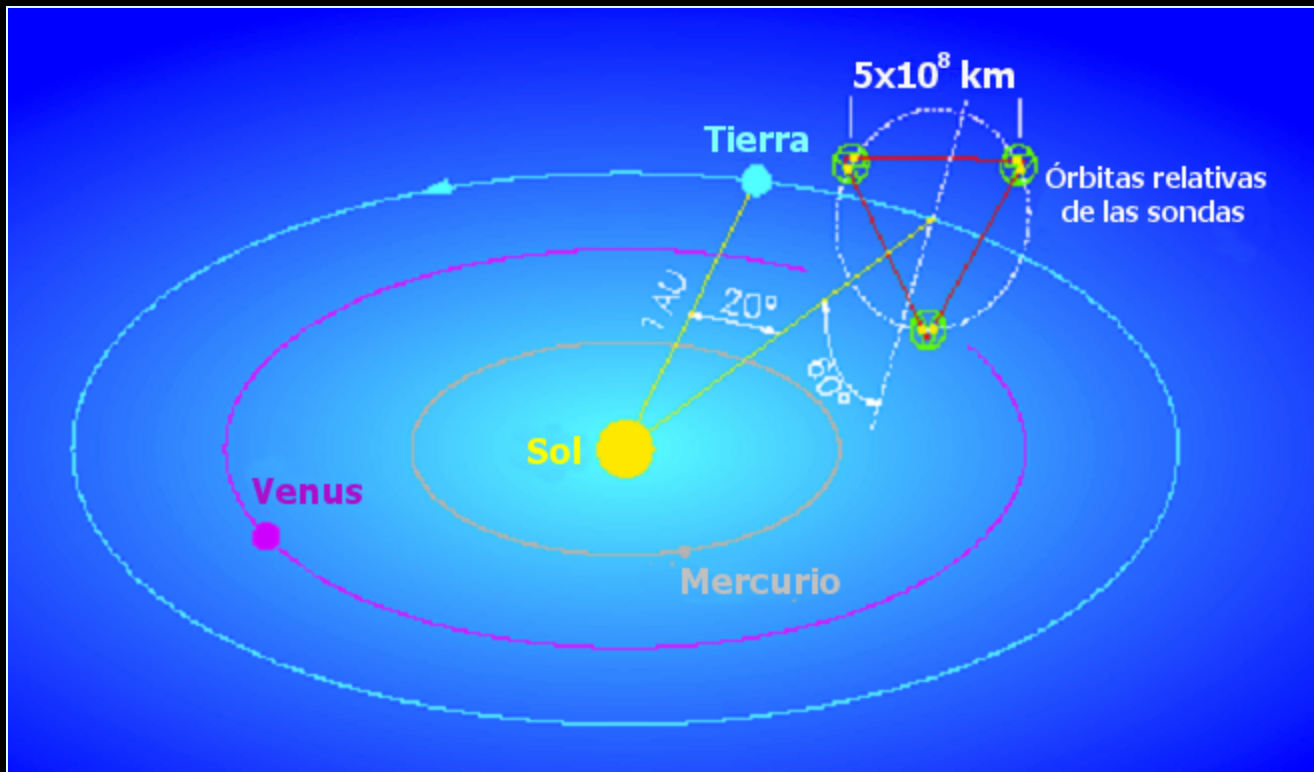


Cinco detectores de O. G.

- ❖ LIGO (USA): Dos detectores de 4km de longitud y uno de 2km en Washington State y Louisiana.
- ❖ VIRGO (Italia/Francia): Un detector de 3km de longitud en Pisa.
- ❖ GEO 600 (Inglaterra/Alemania): Un detector de 600m en Hannover.
- ❖ TAMA 300 (Japón): Un detector de 300m en Tokyo.
- ❖ LISA: Satélite espacial: Un detector de 5 millones de km.



LISA: detector de ondas gravitacionales que será lanzado a fines de esta década.





Hand-held GPS Receiver

Los GPS son un ejemplo de aplicación de la Relatividad. Estos tienen una precisión de unos cuantos metros, debido a que se toman en cuenta las correcciones relativistas.

Una 100 millonésima de un segundo en la medición del tiempo da un error de 30 metros.

Alexander Friedmann

(1888-1925)

Encuentra soluciones exactas a las ecuaciones de Einstein y en ellas percibe que el Universo está en expansión.

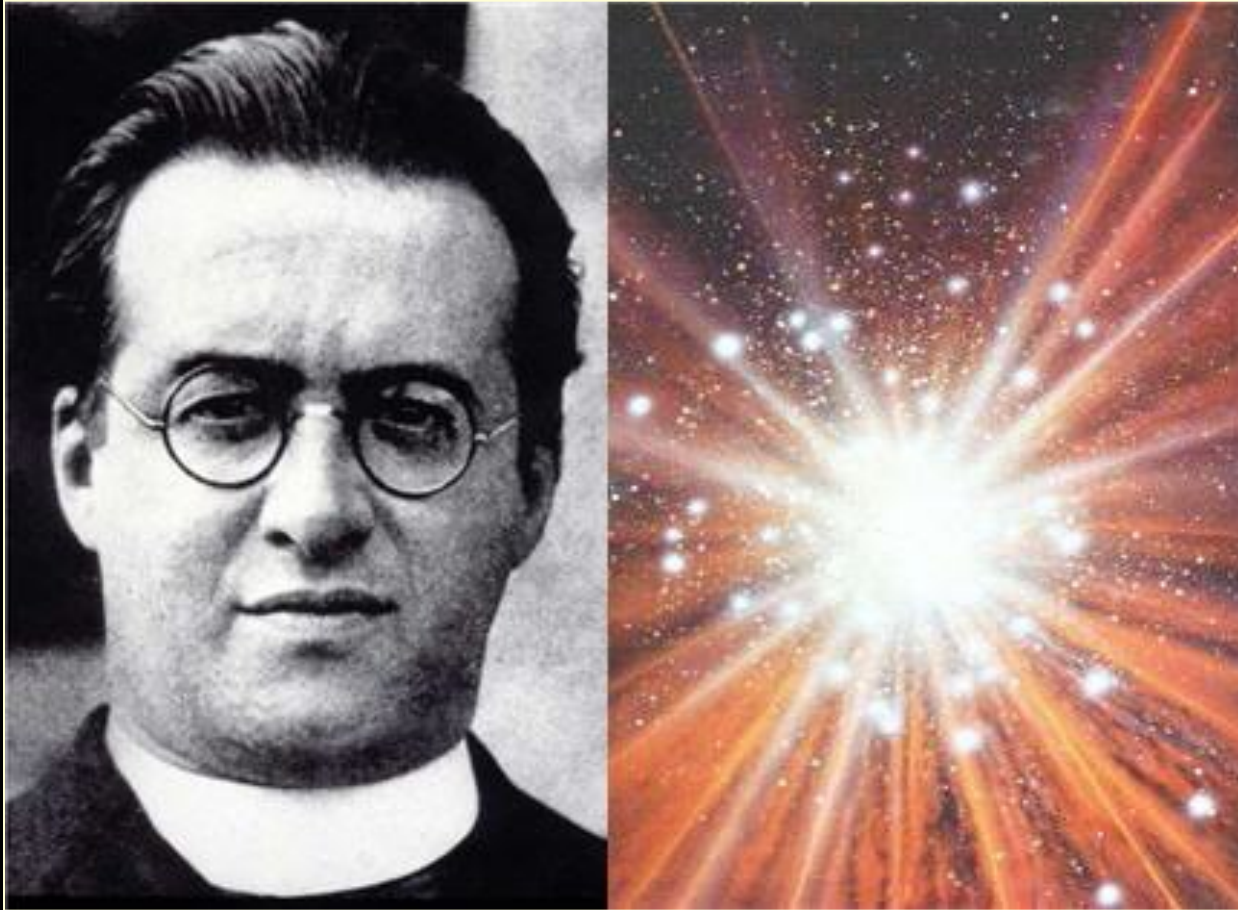
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\varepsilon}{3c^2} - \frac{kc^2}{R_0^2 a(t)^2}$$





Teoría del Big Bang

Georges Lemaître, S. I.
(1894-1966)



Sacerdote católico belga, propuso la idea de que el Universo empezó con la explosión de un “átomo primitivo”.

Georges Lemaître

(1894-1966)

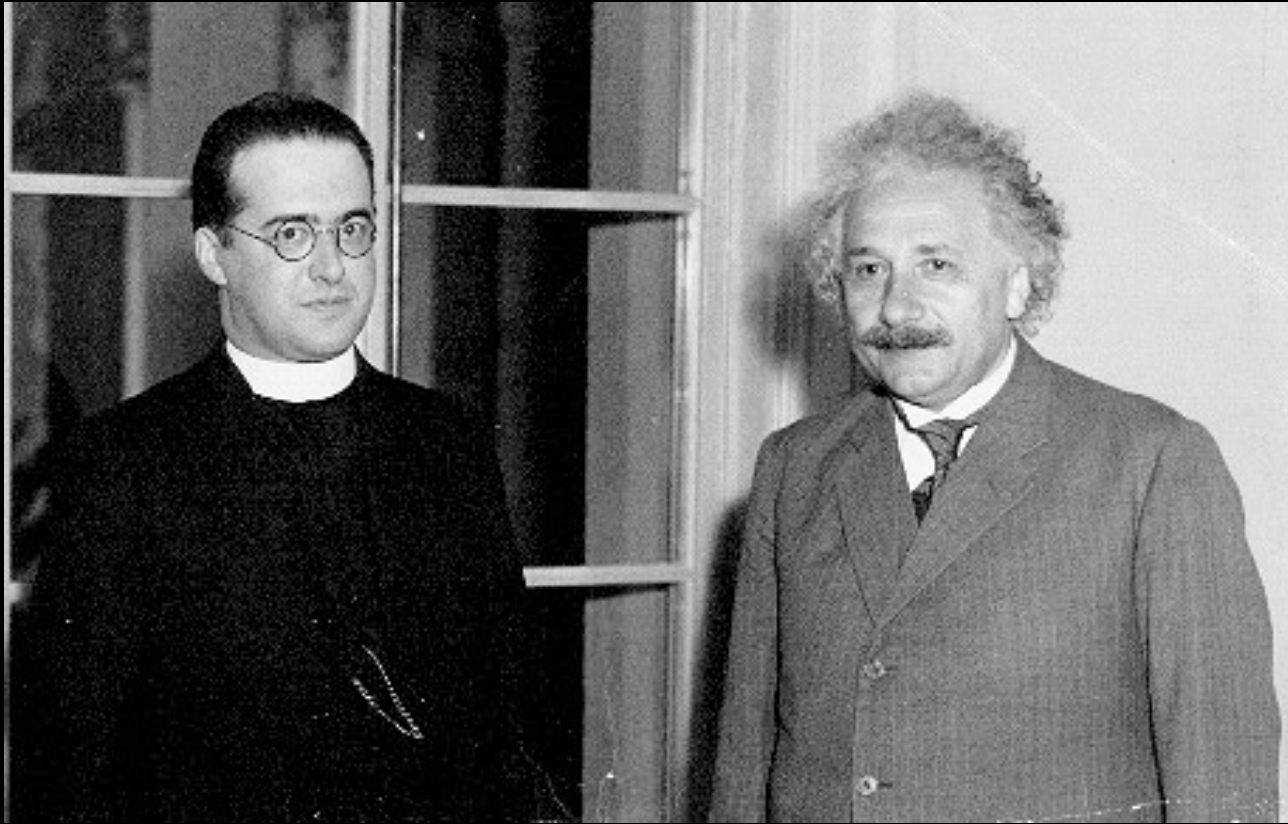
Sacerdote jesuíta, belga

En 1927 encontró que las ecuaciones de Einstein implican que el Universo está en expansión, lo cual fue demostrado de manera observacional por Hubble en 1929. En 1932 presentó una conferencia a la que asistieron Einstein y Hubble. Después de la charla, Einstein comentó:

Es la más bella y satisfactoria explicación de la creación que he escuchado.

Lemaître es el padre de la teoría del **Big Bang**, nombre por cierto acuñado en un programa de radio de la BBC de Londres por su archienemigo científico Fred Hoyle.

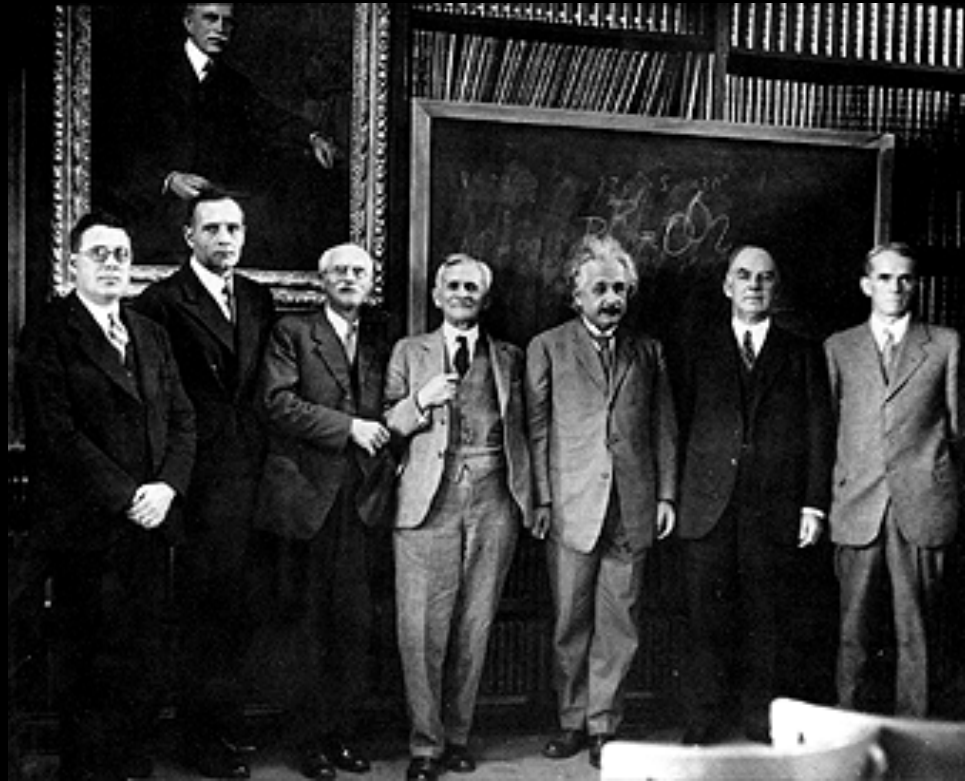
Tuvo la fortuna de enterarse del descubrimiento de la Radiación de Fondo, antes de morir el 20 de junio de 1966.



Pocos se dieron cuenta de las implicaciones que tendría el artículo publicado por Lemaître en 1927 en *Annales de la Societé Scientifique de Bruxelles*. Ese mismo año habló con Einstein en Bruselas. Einstein le dijo: “Sus cálculos son correctos, pero su comprensión de la física es abominable”.

Visita de Einstein a Mt. Wilson en 1931

George E.
Hale



Milton
Humason

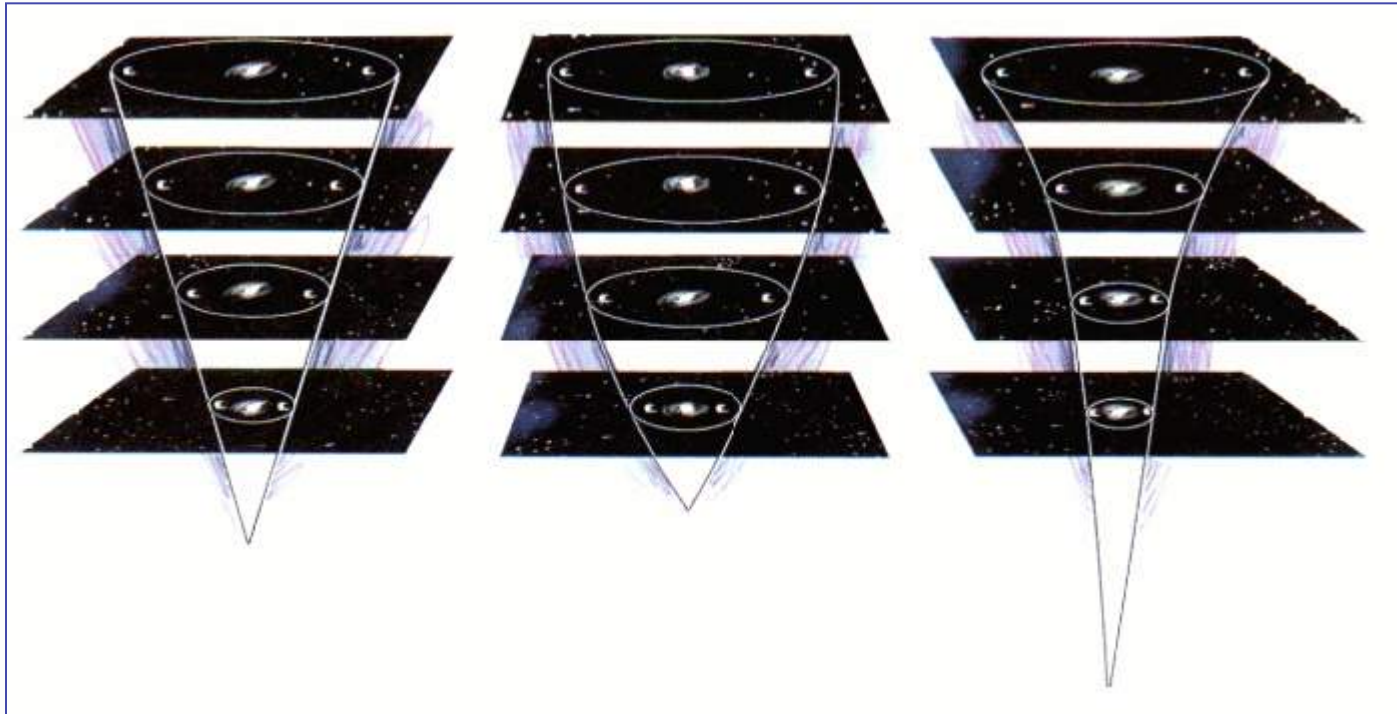
Hubble St. John Michelson Einstein Campbell Adams

**Encuentro histórico entre cosmólogos
teóricos y observacionales**

Los pilares de la teoría del *Big Bang*

- Expansión del Universo.
- Radiación de Fondo en el Universo.
- Nucleosíntesis de elementos.
- Estructura a Gran Escala del Universo.

Expansión del Universo



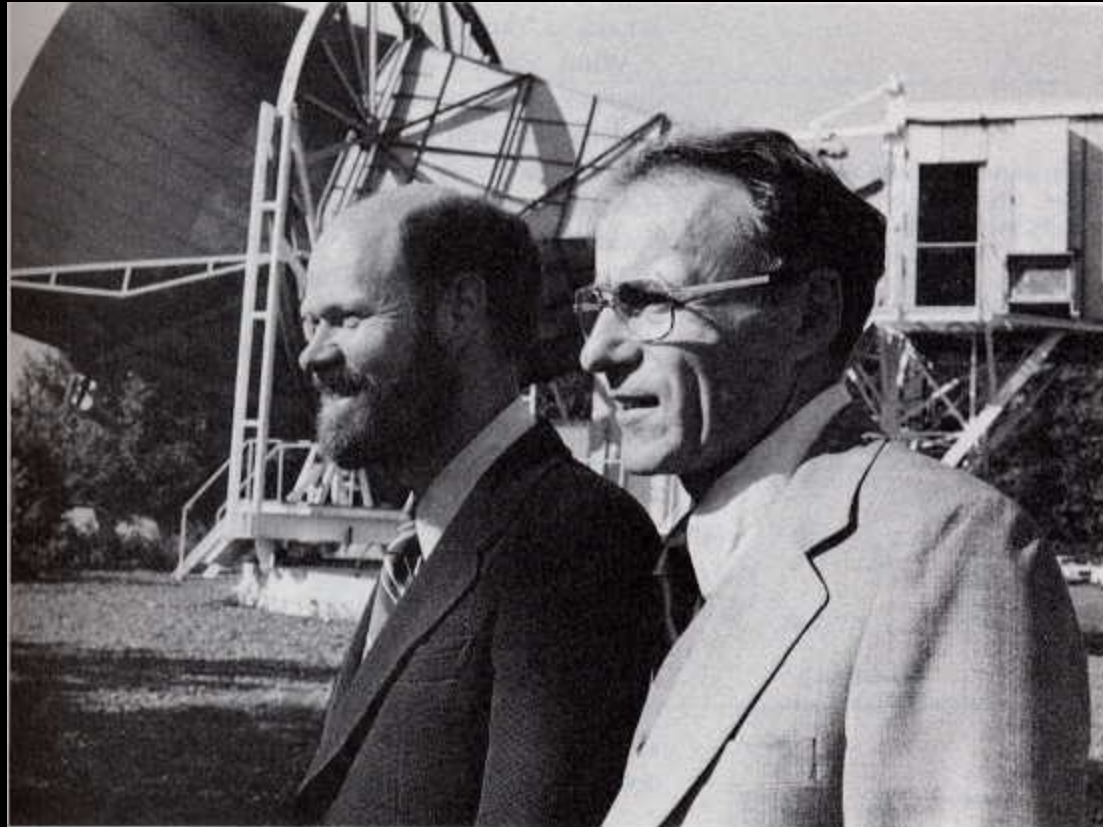
El Universo inicia con la *gran explosión*.

Radiación de Fondo en el Universo

En sus inicios el Universo se encontraba sumamente caliente, lo que impedía que los electrones se unieran a los protones para formar átomos. Después de 380,000 años su temperatura descendió a unos 3,000 °K, pudiéndose entonces enlazar los primeros átomos. Al período en que éstos se forman se le conoce como la *Época de Recombinación*.

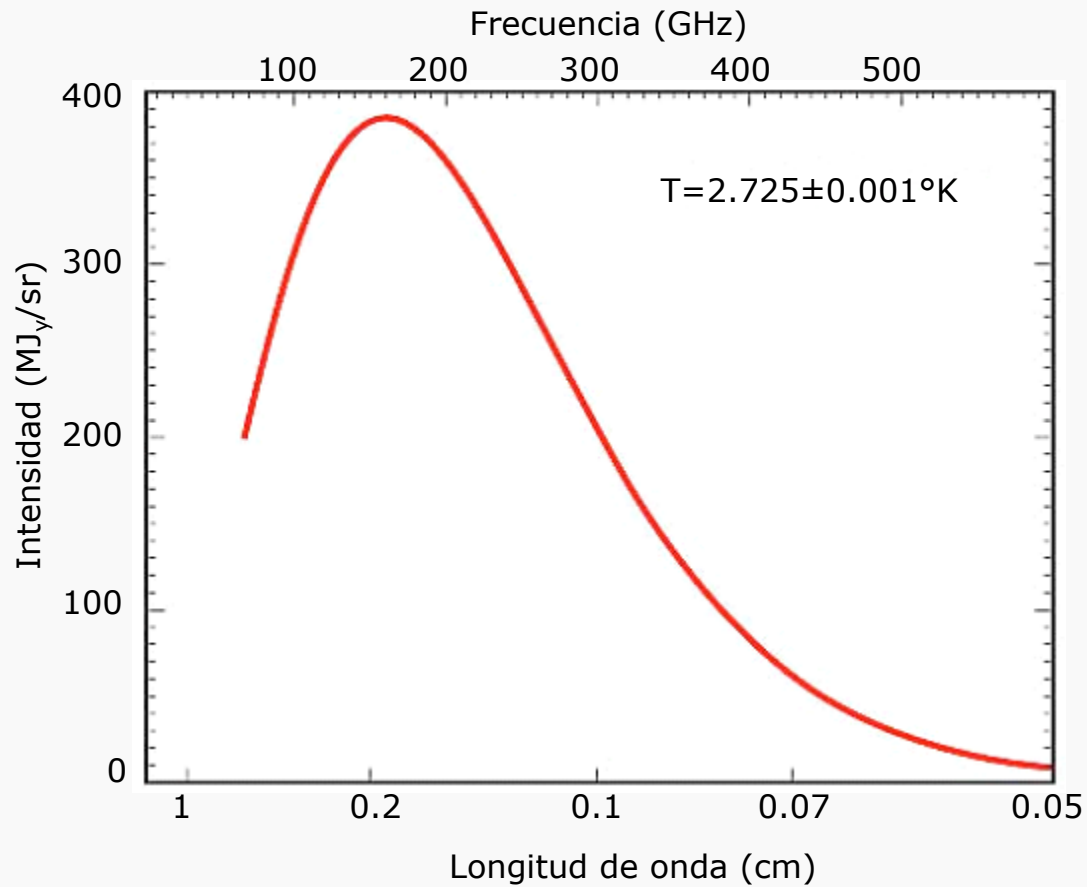
Descubrimiento de la radiación del fondo cósmico

En 1965 Penzias y Wilson, de la compañía Bell, descubrieron la existencia de una fuente de radiación *isotrópica* (observaban la misma señal en cualquier dirección que apuntaban su antena), que correspondía al espectro de un *cuerpo negro* de 2.73 °K. Gracias a la explicación teórica de Dicke y Peebles supieron que habían detectado los ecos del *Big Bang*.

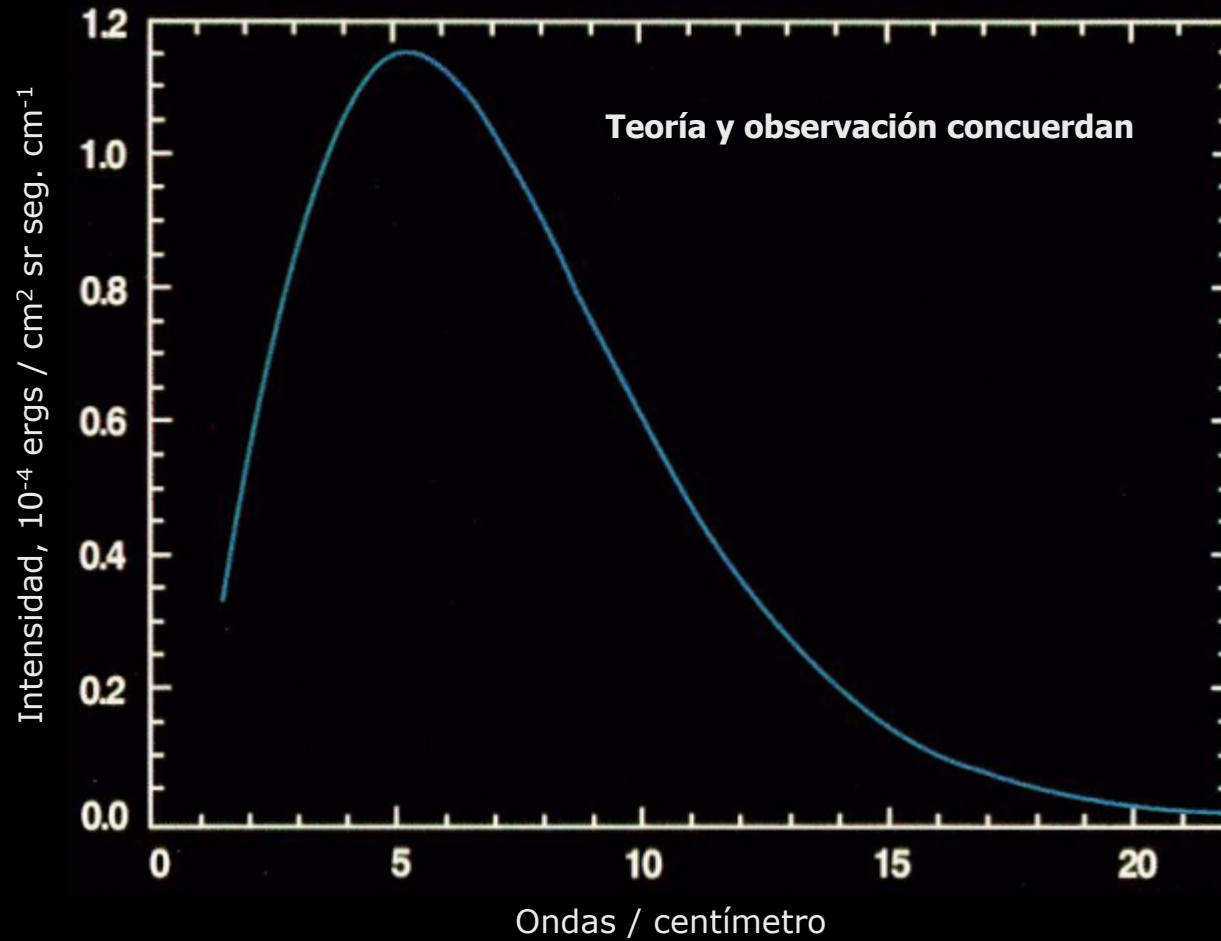


**Robert W. Wilson y Arno Allan Penzias
Premio Nobel de Física en 1978**

Espectro del fondo cósmico de microondas



Espectro del fondo cósmico de microondas, COBE

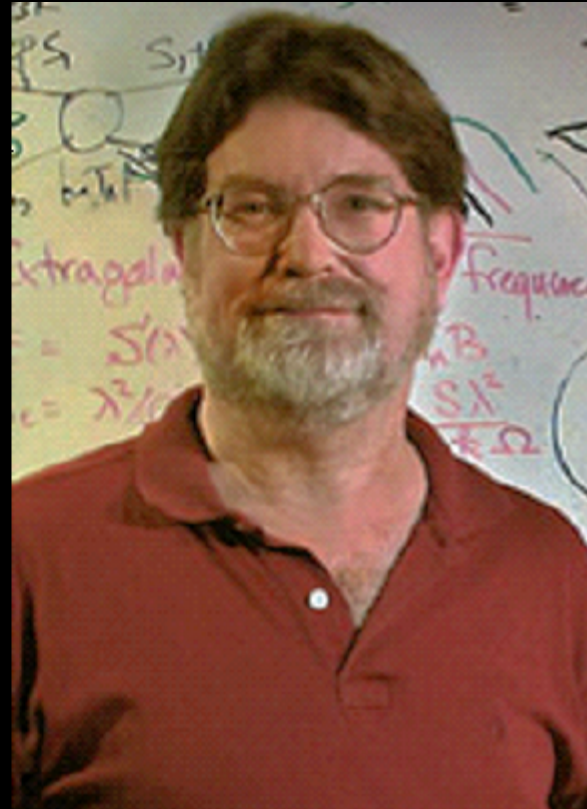


Premio Nobel de Física 2006

Por descubrir la forma del cuerpo negro y la anisotropía de la radiación de fondo del Universo

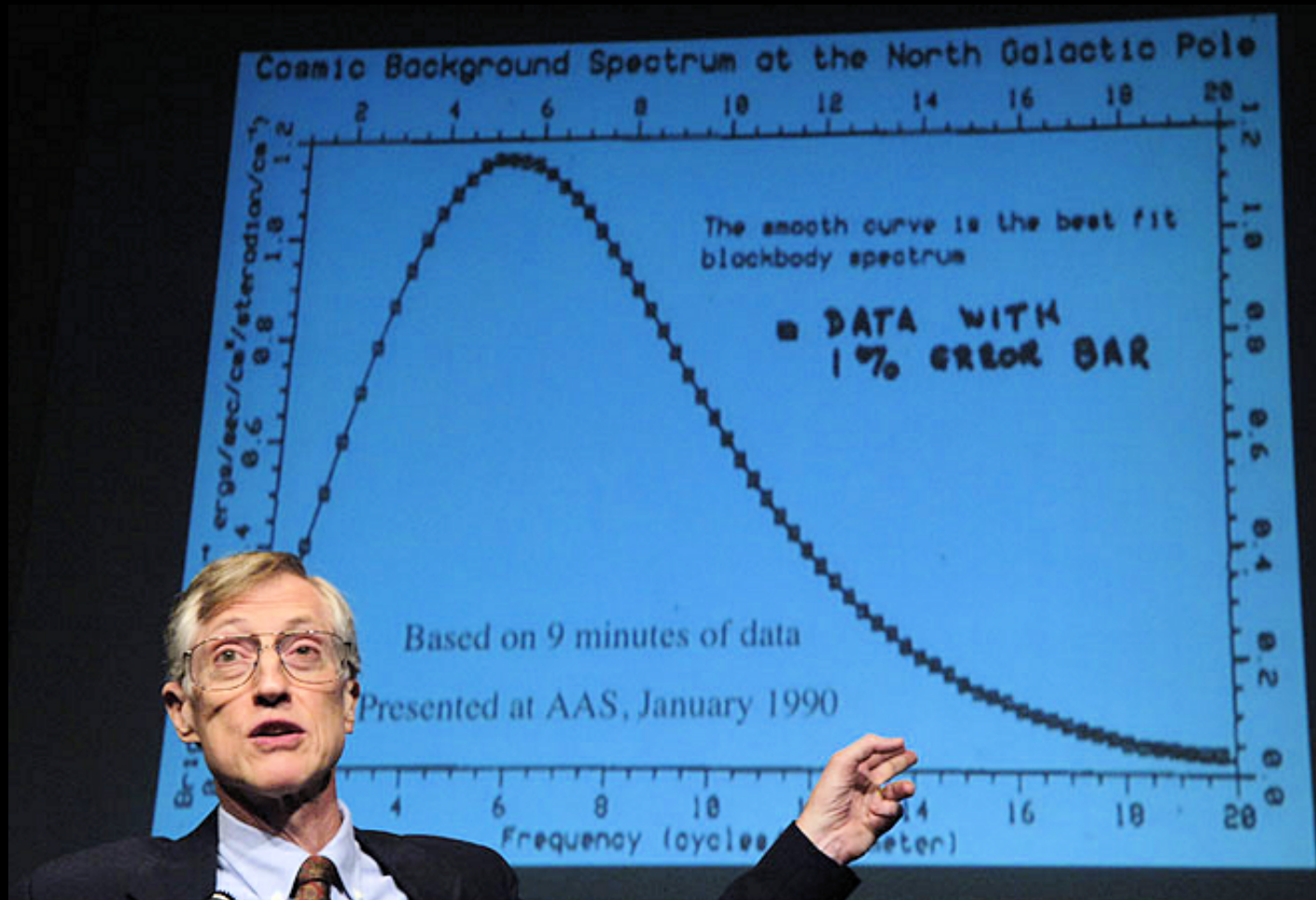


John C. Mather



George F. Smoot

Dr. John C. Mather, Goddard Space Flight Center, NASA



Ganador del Premio Nobel de Física, 2006

Nucleosíntesis de los Elementos

En los primeros minutos de la vida del Universo solo pudieron formarse los siguientes elementos e isótopos: **H, D, ³He, ⁴He y ⁷Li.**

Parte del litio y la mayor parte de los elementos ligeros que le siguen, berilio y boro, se formaron por la destrucción de los elementos CNO.

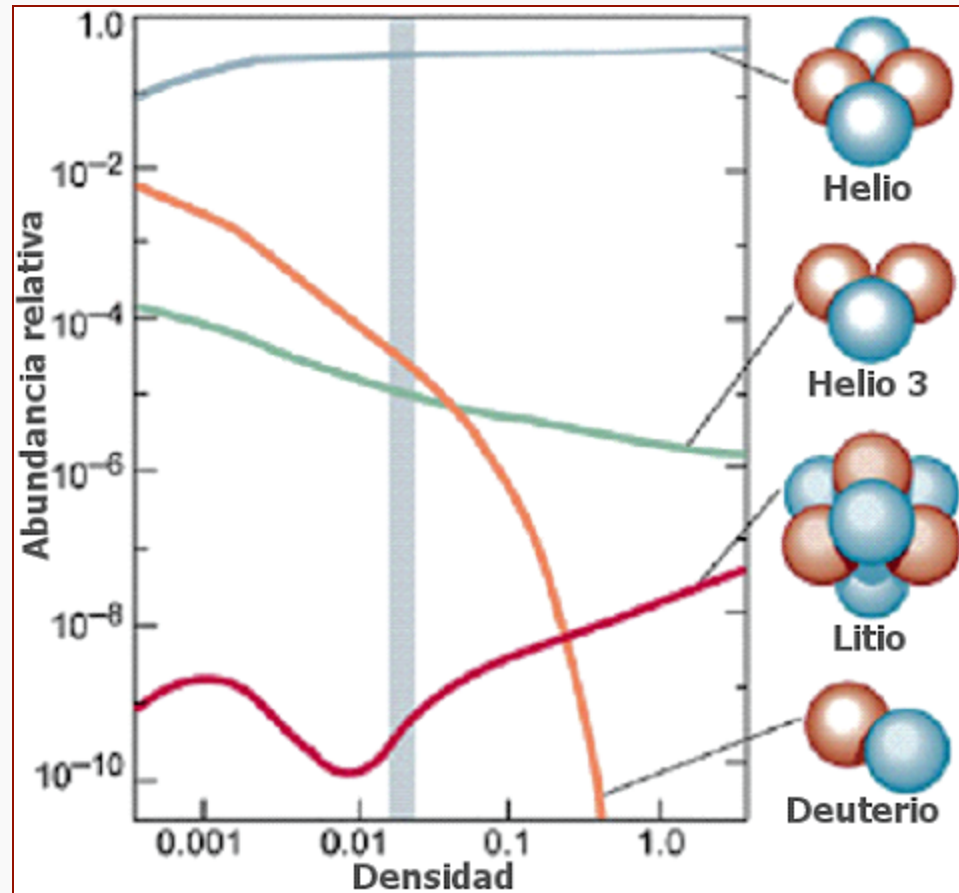
Los elementos C, N, O y hasta el Fe se formaron en el interior de las estrellas. Los elementos más pesados se formaron en explosiones de supernovas.

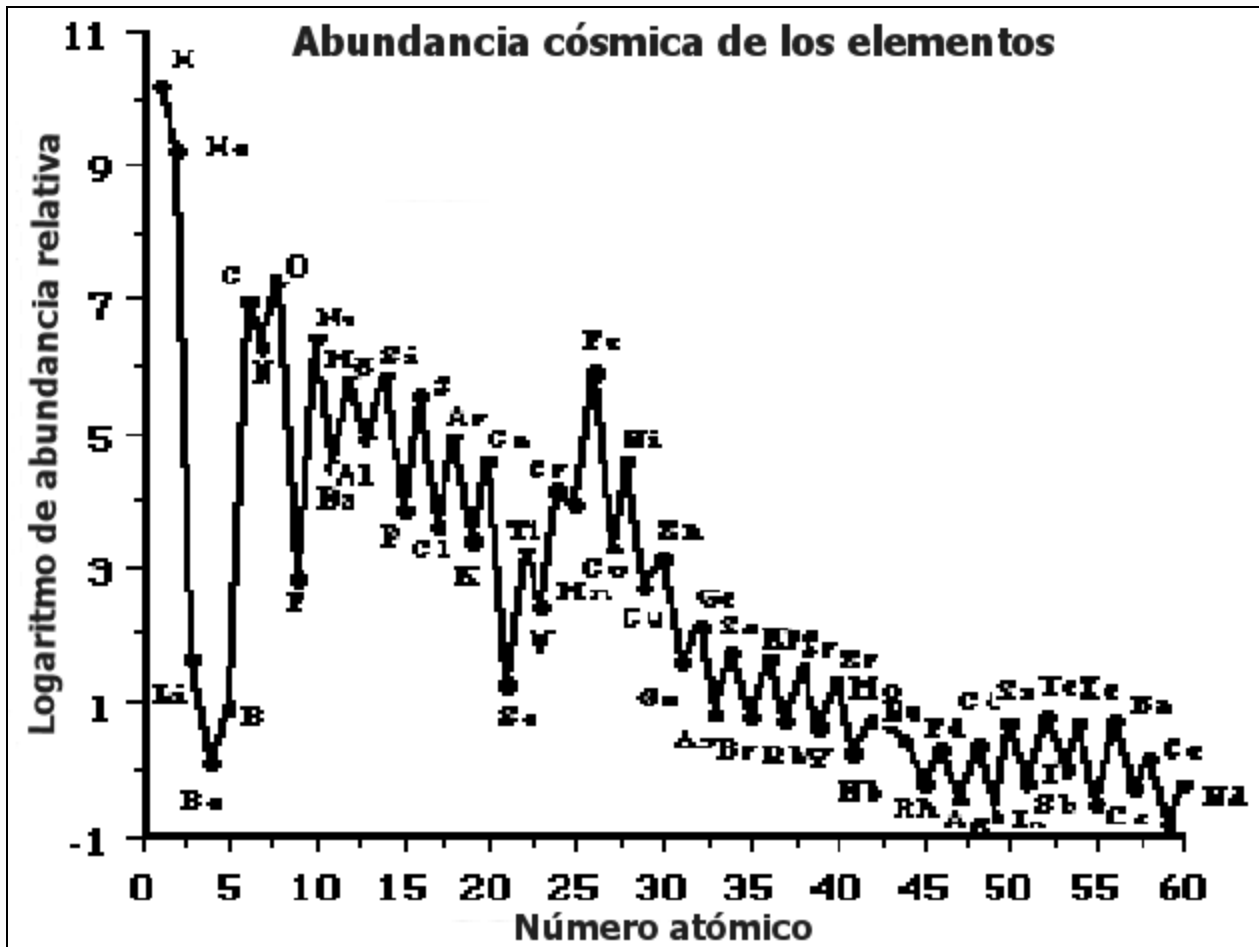
Nucleosíntesis de los elementos

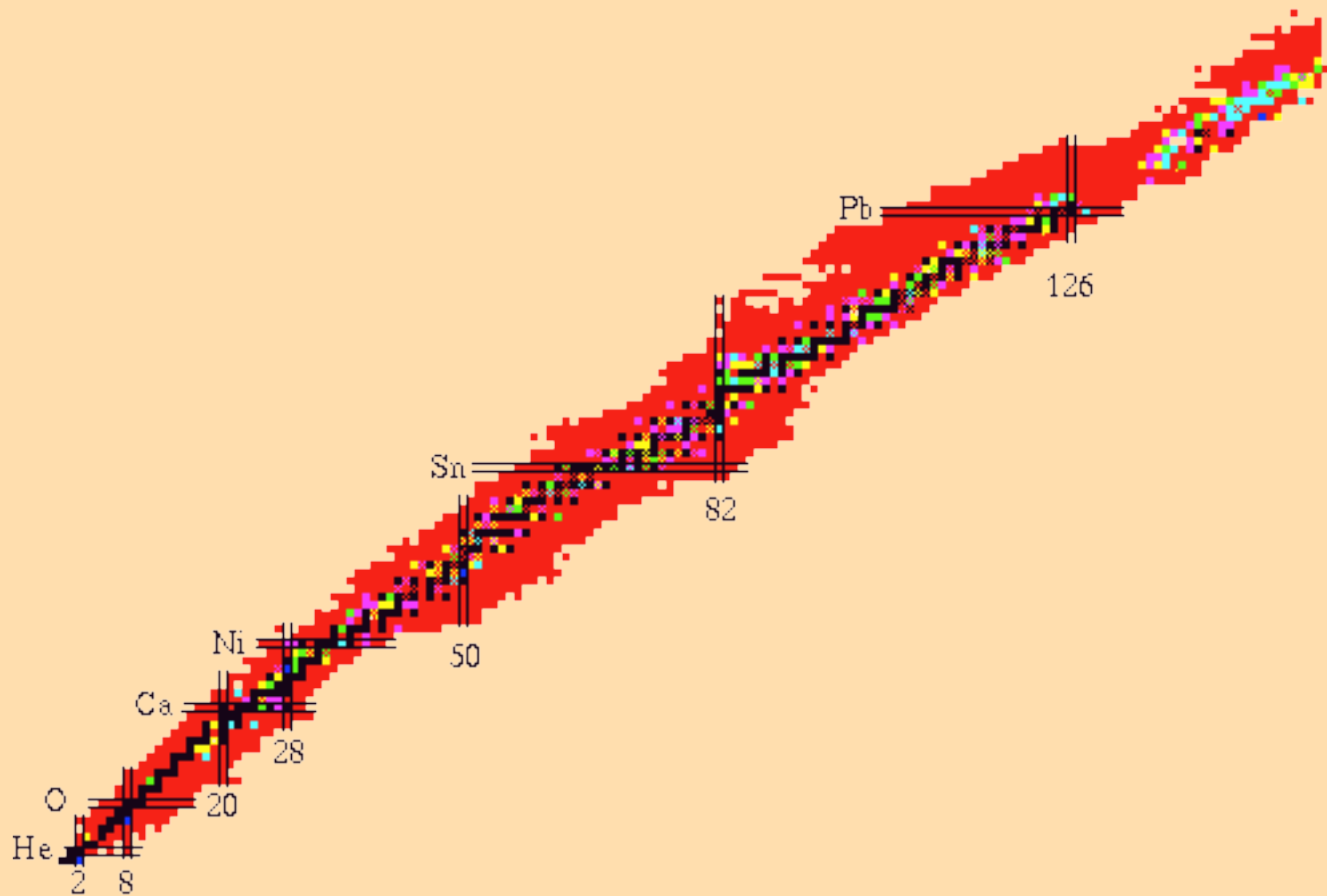
La teoría del *Big Bang* afirma que en los primeros minutos de la vida del Universo sólo lograron formarse los siguientes elementos e isótopos: **H**, **D**, **³He**, **⁴He** y **⁷Li**. Además nos dice cuánto se formó de cada uno de éstos.

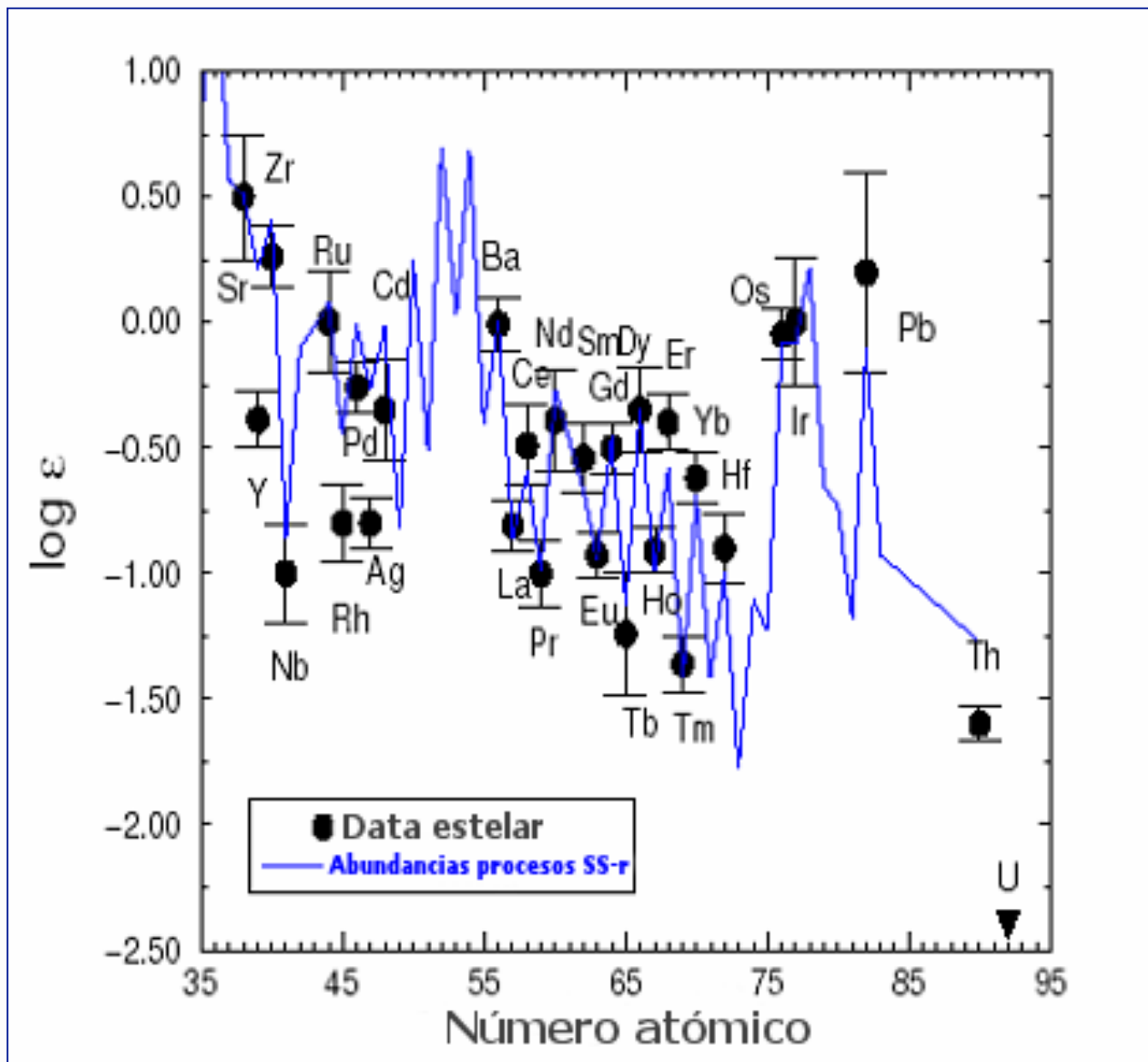
Una de las pruebas más contundentes de la teoría del *Big Bang* es que las observaciones de abundancias cósmicas de dichas sustancias concuerdan con las predicciones de la teoría.

Abundancia de elementos más pesados que el H (con respecto a la abundancia del Hidrógeno, en función de la densidad bariónica; expresado en términos de la densidad crítica)



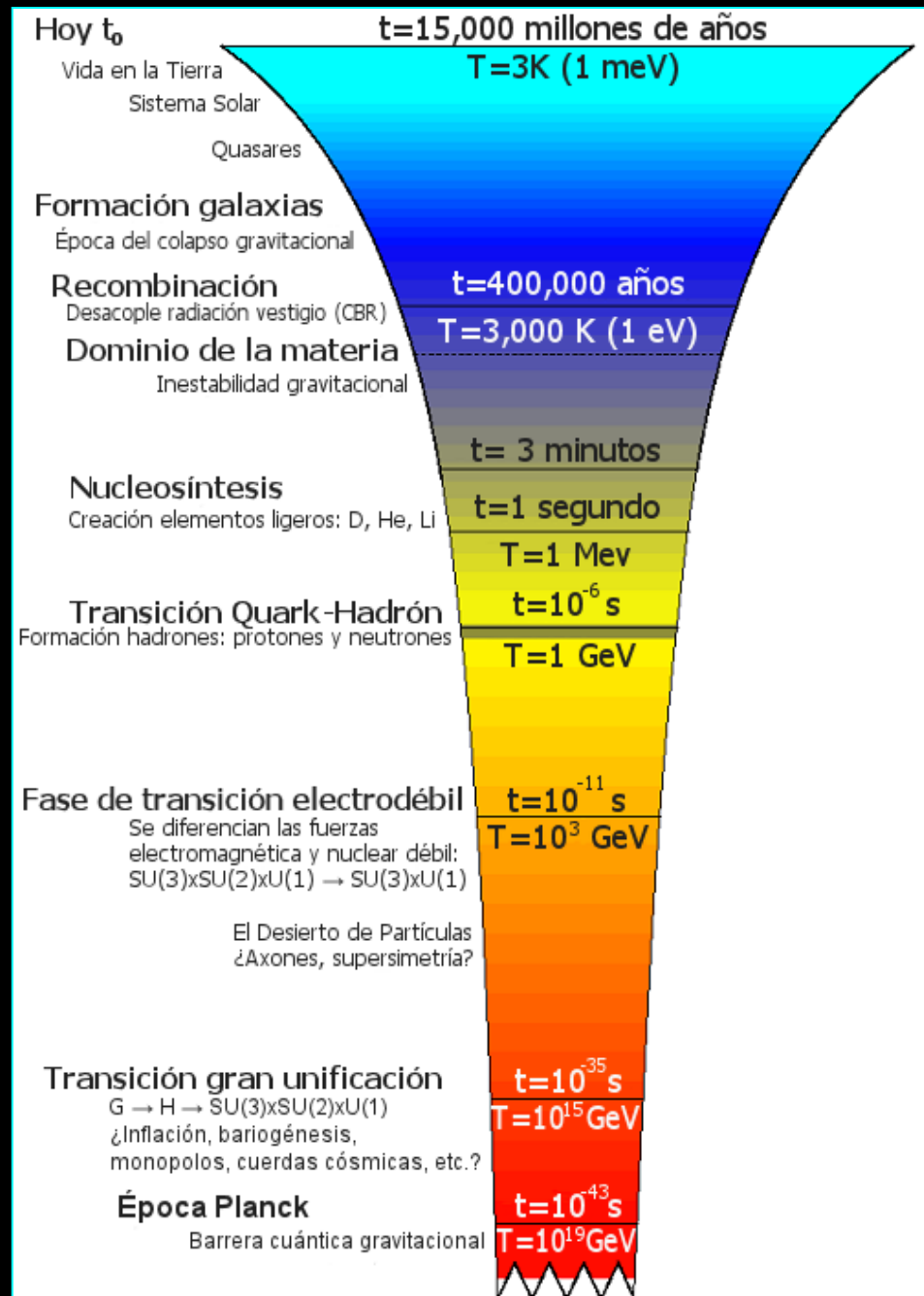






Abundancias de captura de neutrones en CS-22892-052 comparadas con una distribución de procesos-*r* a escala en el Sistema Solar (línea sólida)

10⁴³ años



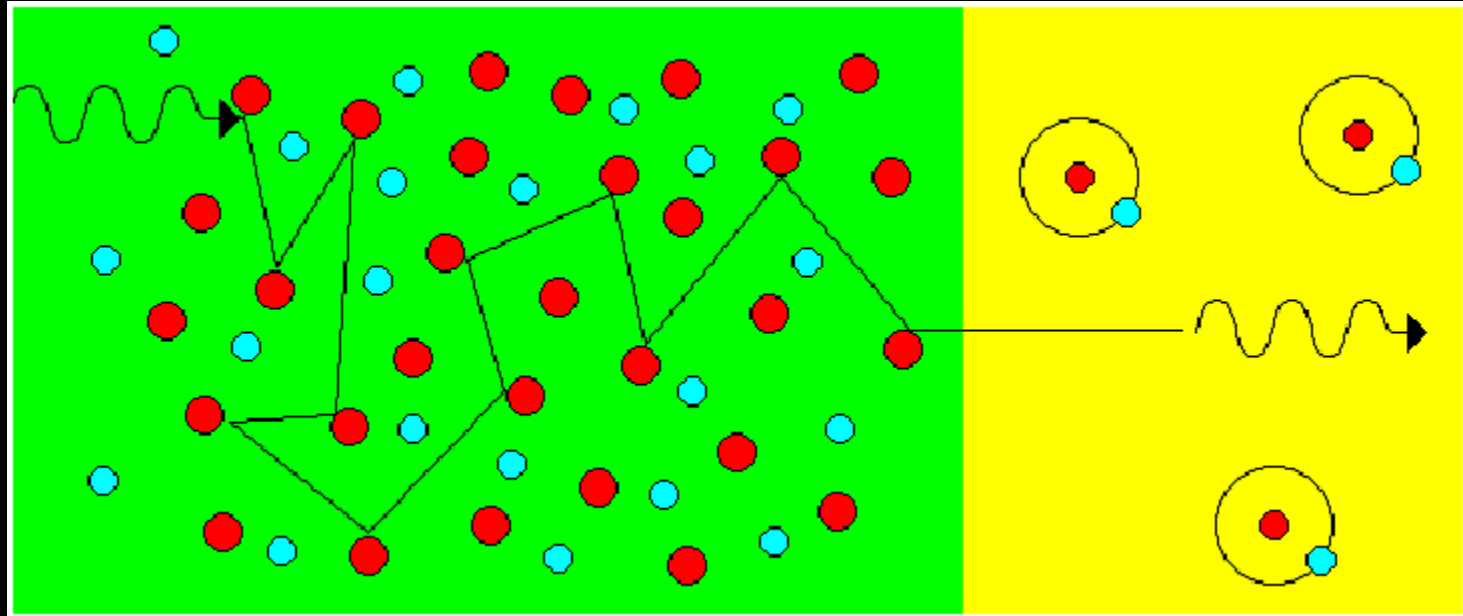
Universo transparente

Con la combinación de protones y electrones el Universo queda compuesto primordialmente por partículas neutras (átomos), lo que lo vuelve transparente.

Anteriormente no lo había sido, por el constante choque entre la luz (fotones) y partículas cargadas.

Última época de dispersión

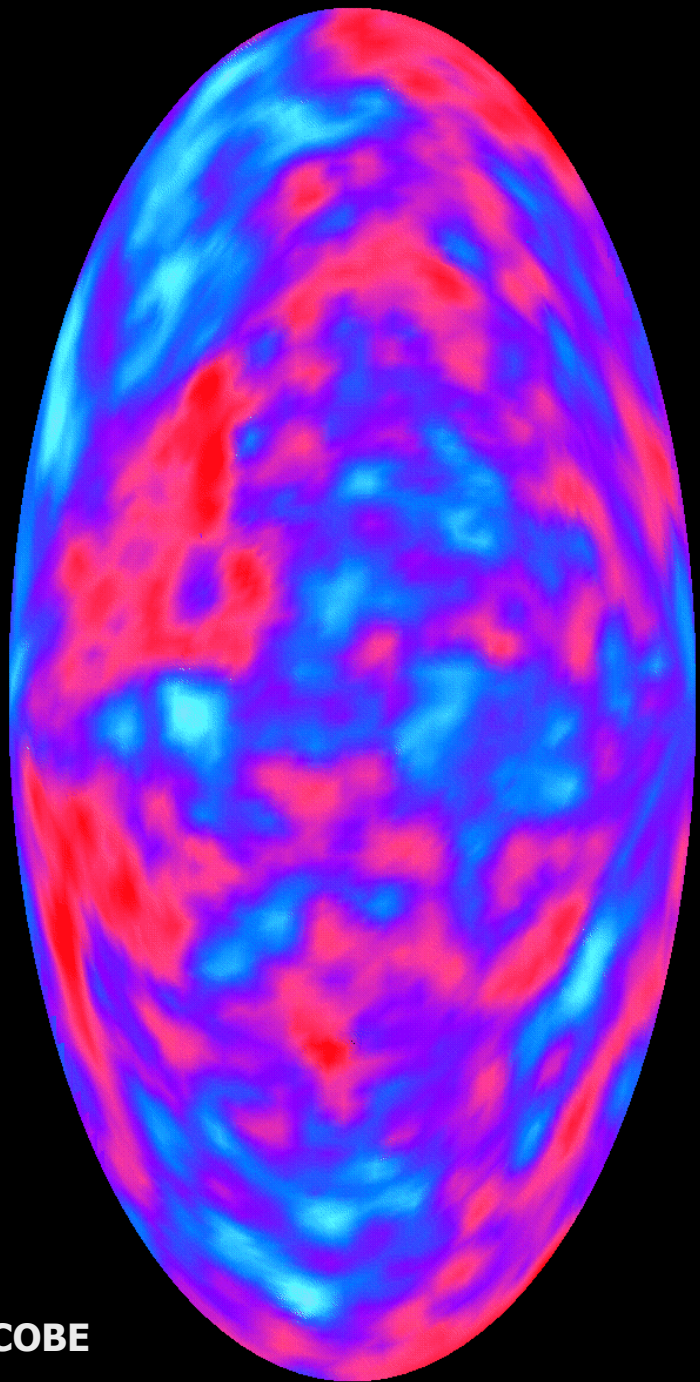
Al enfriarse el Universo, los electrones y protones libres pudieron finalmente enlazarse para formar átomos de Hidrógeno. Al mismo tiempo el Universo pasó de un plasma rico a un gas de Hidrógeno neutro.



Plasma de Hidrógeno

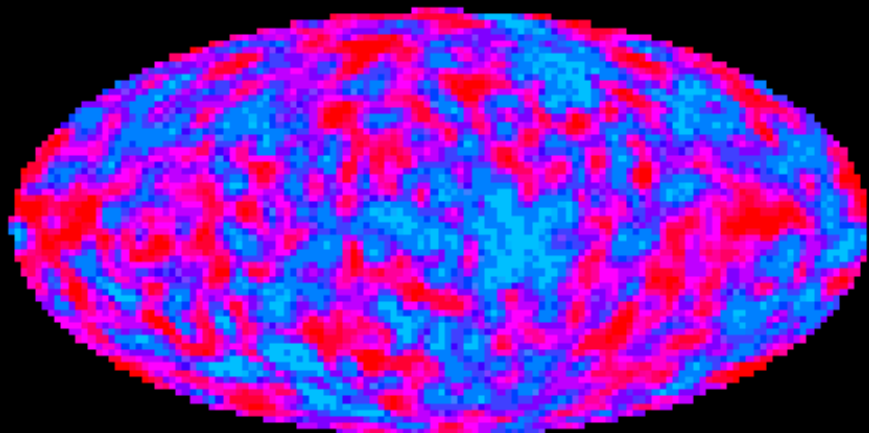
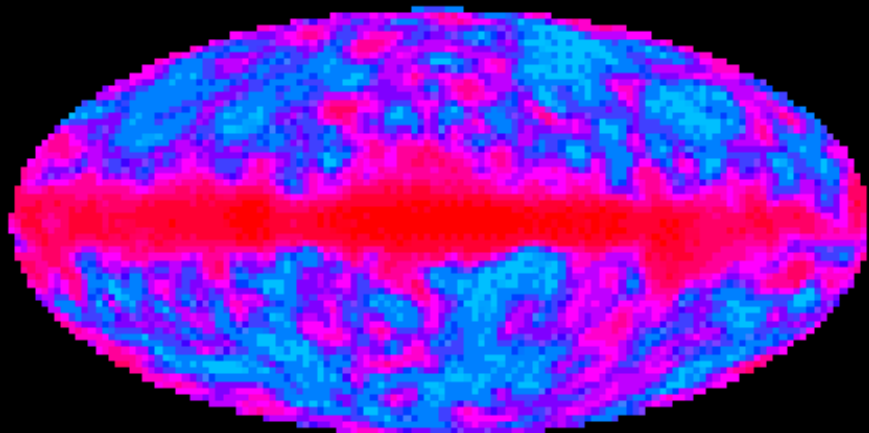
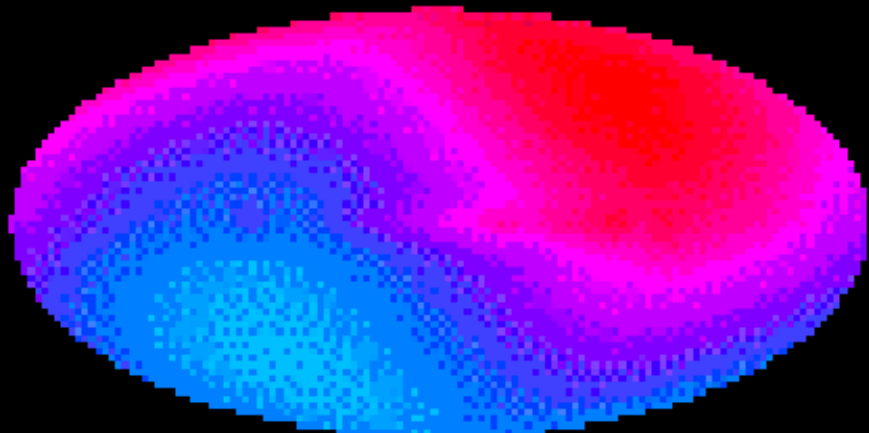
Hidrógeno atómico

En un plasma, el camino libre medio de un fotón es muy corto. En un gas de Hidrógeno atómico, el camino libre medio de un fotón es muy largo, tan largo como el tamaño del Universo. Entonces, la transición del plasma primigenio al Hidrógeno atómico es la **época final de dispersión**, el momento en que los fotones se encontraron libres para viajar sin impedimentos.



COBE

COBE-DMR



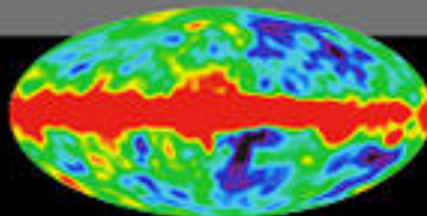
1965

Penzias y Wilson



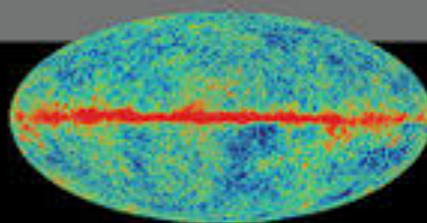
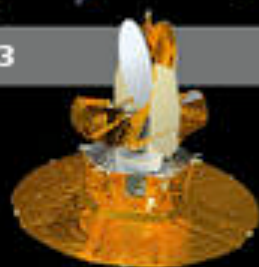
1992

COBE

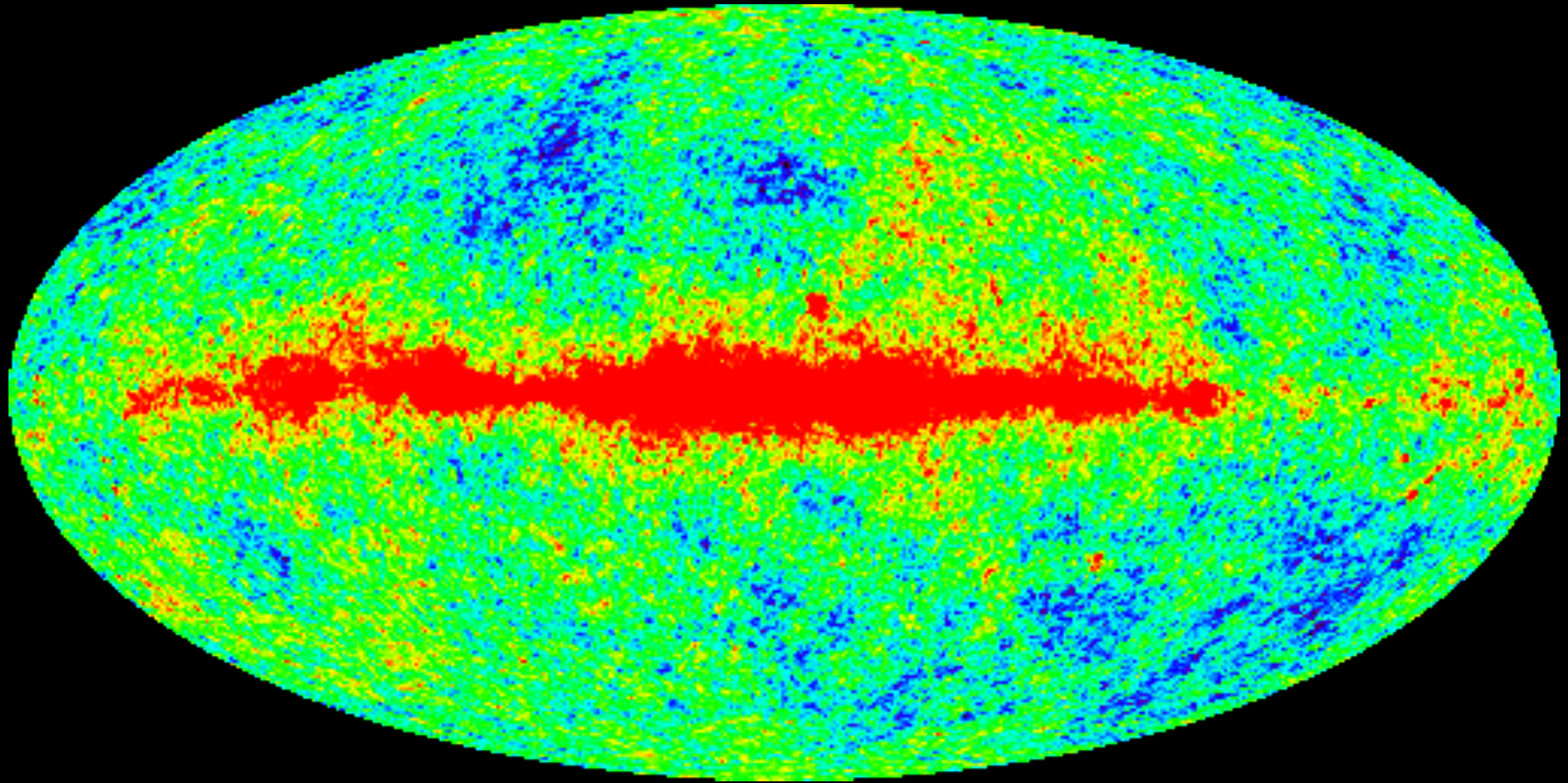


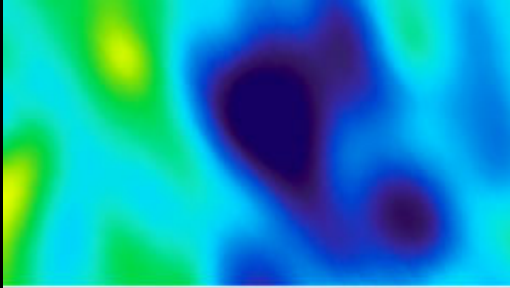
2003

WMAP



Fluctuaciones en la temperatura: WMAP

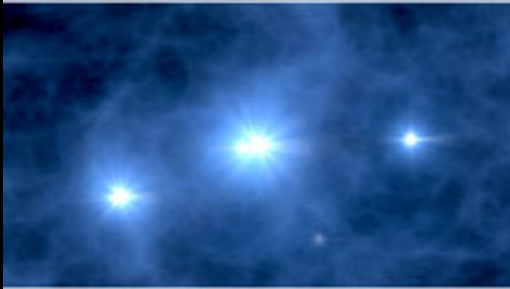




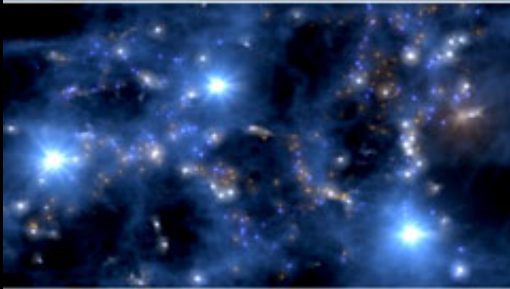
Fluctuaciones de temperatura.



La materia empieza a condensarse por la acción de la gravedad.



200 millones de años después del *Big Bang* se forman las primeras estrellas.



Multitud de nuevas estrellas.
Estructura a gran escala de las galaxias.



Universo actual.

Conclusiones de WMAP (I)

- El Universo tiene 13.7 mil millones de años con un margen de error de aproximadamente 1%.
- Las primeras estrellas se formaron 200 millones después del *Big Bang*.
- La Radiación de Fondo Cósmico inició su viaje 379,000 años después del *Big Bang*.

Contenido del Universo:

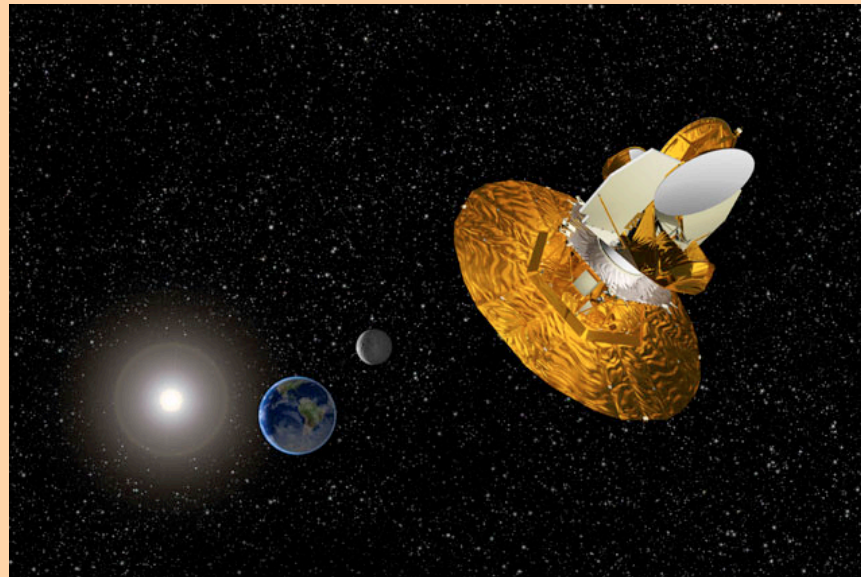
- 4% átomos, 23% materia oscura fría, 73% energía oscura.
- Los datos imponen restricciones sobre la energía oscura. Parece ser más una *constante cosmológica* que un campo de energía con presión negativa, denominada *quintaesencia*. Pero aún no se descarta esta última.
- Los neutrinos no juegan un papel relevante en la evolución de estructura en el Universo. Éstos habrían prevenido el colapso temprano del gas en el Universo, retrasando la aparición de las primeras estrellas, lo que estaría en conflicto con los datos de WMAP.

Conclusiones de WMAP (II)

- Razón de Expansión (Constante de Hubble):

$$H_0 = 71 \text{ km/sec/Mpc} \quad (\text{con un margen de error de } 5\%)$$

- Nueva evidencia para Inflación (en la señal polarizada de la Radiación de Fondo).
- Según la teoría que explica mejor los datos, el Universo se va a expandir por siempre. (La naturaleza de la energía oscura es todavía un misterio. Si ésta cambia con el tiempo, o si ocurren otras cosas desconocidas e inesperadas en el Universo, esta última conclusión podría cambiar.)



Modelo del Estado Estacionario

Teoría que sostiene que el Universo ha sido y siempre será como es hoy. Supone que el Universo es uniforme, infinito y que no está en expansión.

Requiere de creación continua de materia.

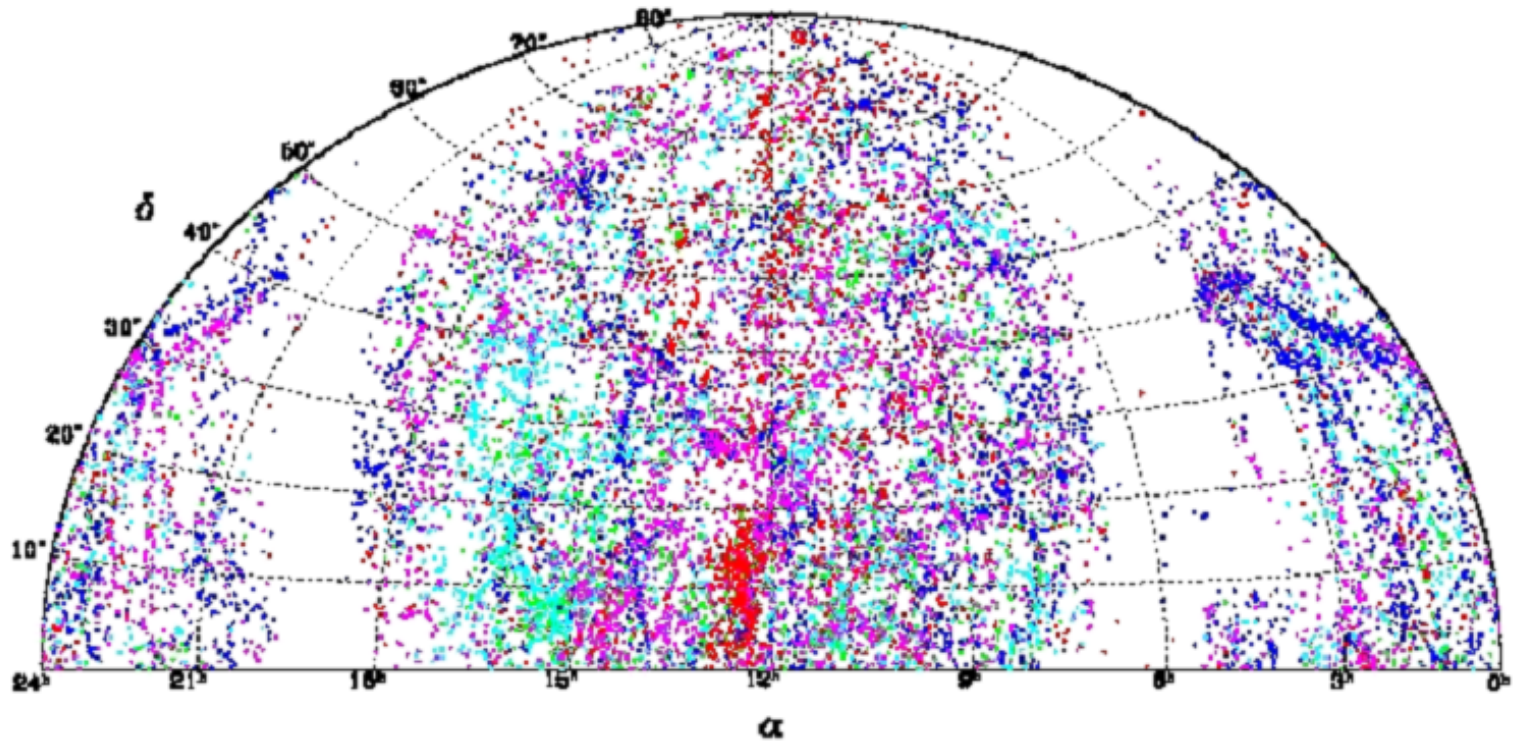
El descubrimiento de la Radiación de Fondo en el Universo fue el tiro de gracia para el Modelo del Estado Estacionario.

Descubrimiento de la Estructura a Gran Escala del Universo

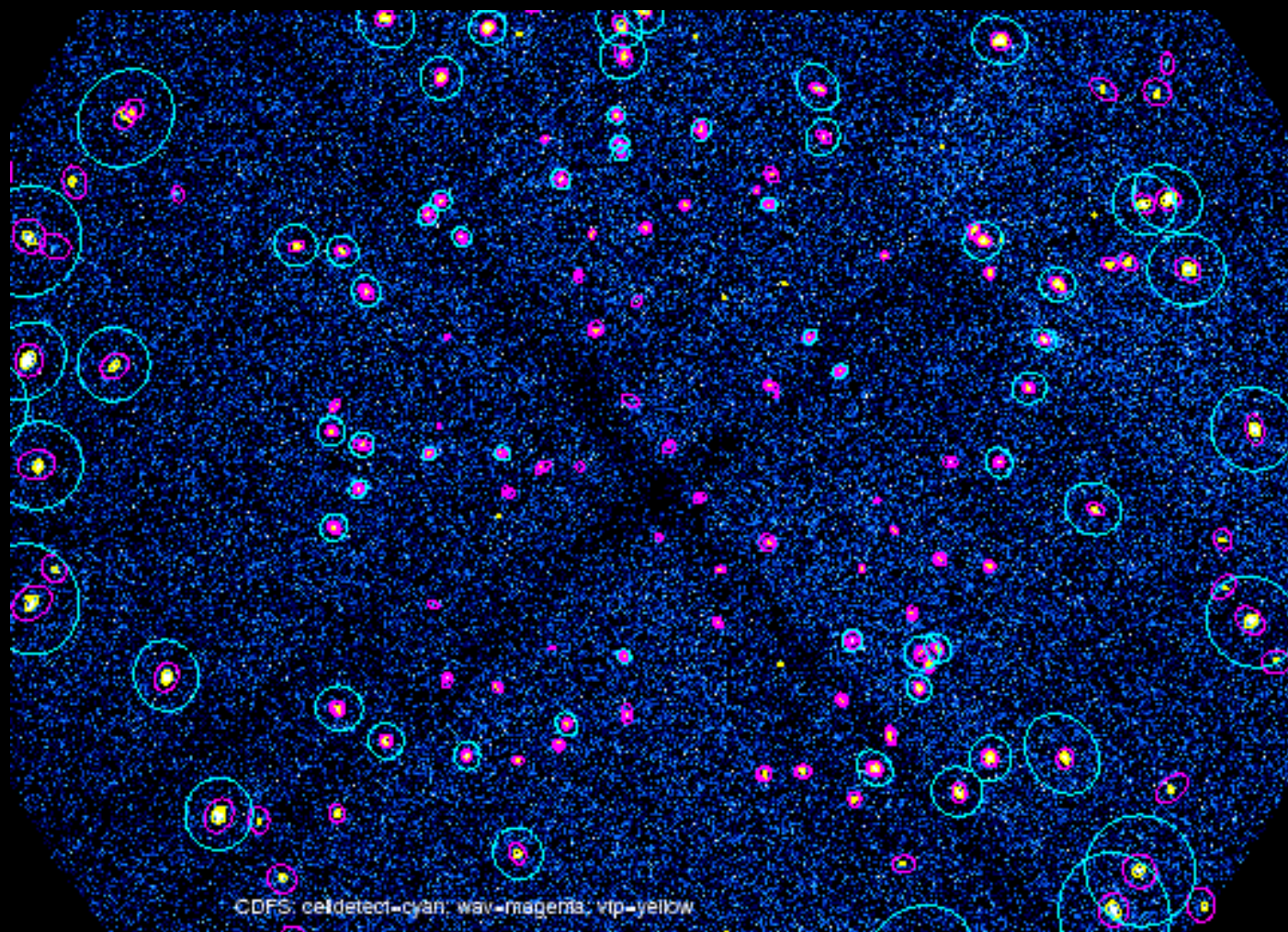
Gracias al estudio que hicieron en 1986 los astrónomos Valerie de Lapparent, Margaret Geller y John Huchra del Centro para Astrofísica de Harvard sobre los corrimientos al rojo de un gran número de galaxias, se descubrió que hay una estructura a gran escala, que contiene tanto supercúmulos de galaxias como regiones *vacías* del espacio. Actualmente existen modelos (casi todos consideran que la componente principal es la materia oscura) que tratan de explicar esta estructura (HDM, CDM, etcétera.)

Observaciones sobre la Estructura a Gran Escala del Universo

Sondeo de Viraje al Rojo CfA2

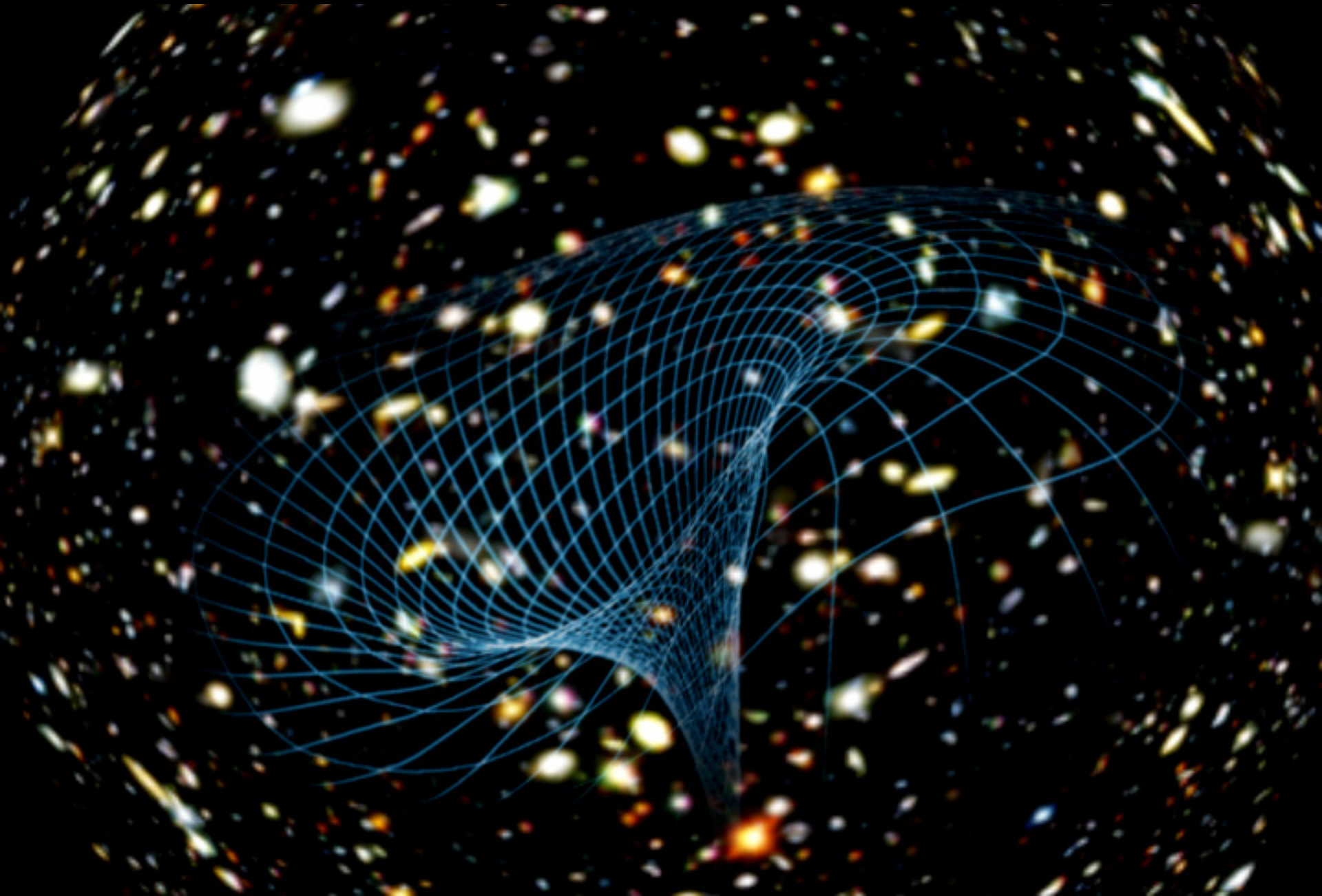


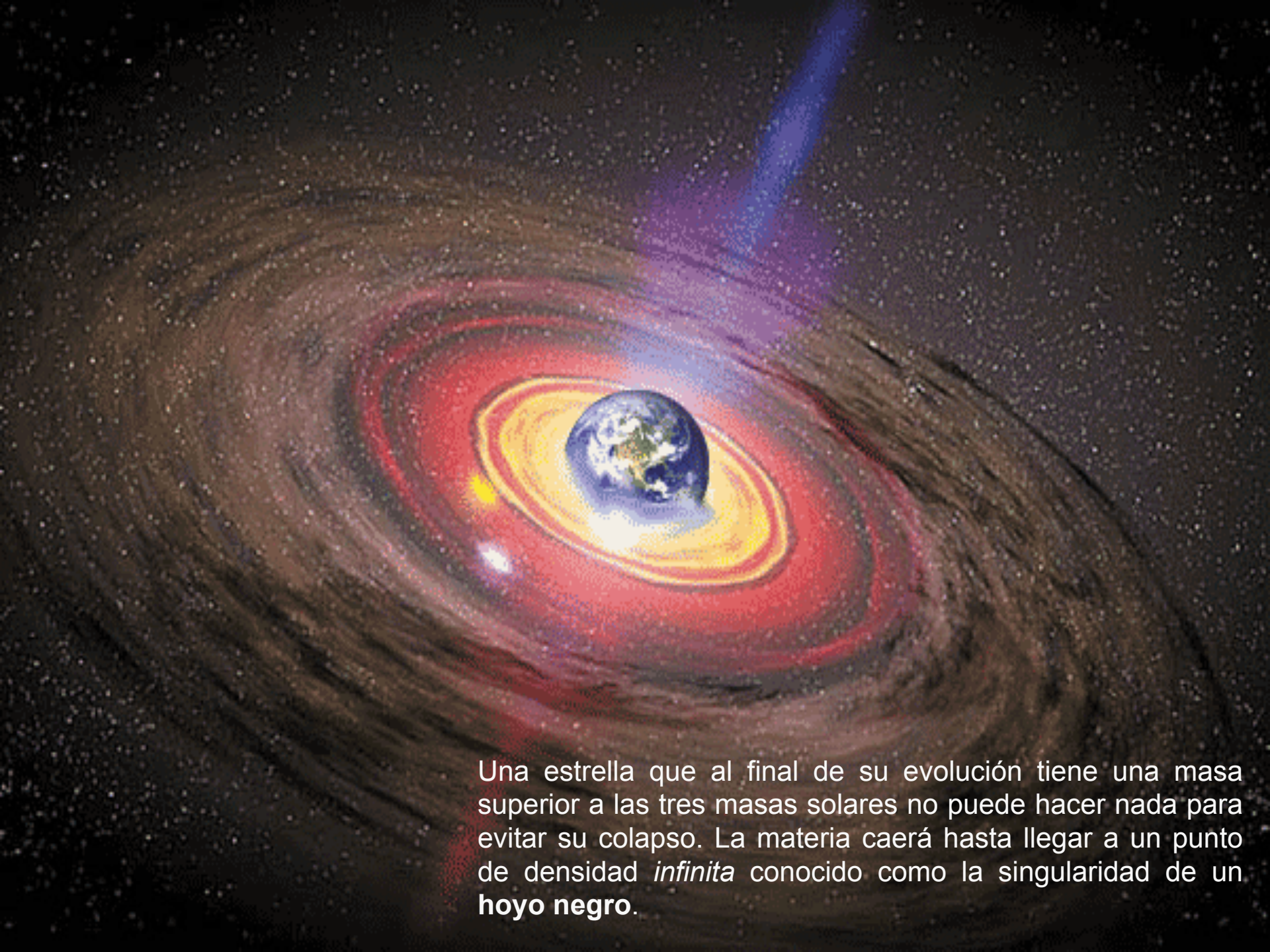
Copyright SAO 2001



Campo profundo de Chandra

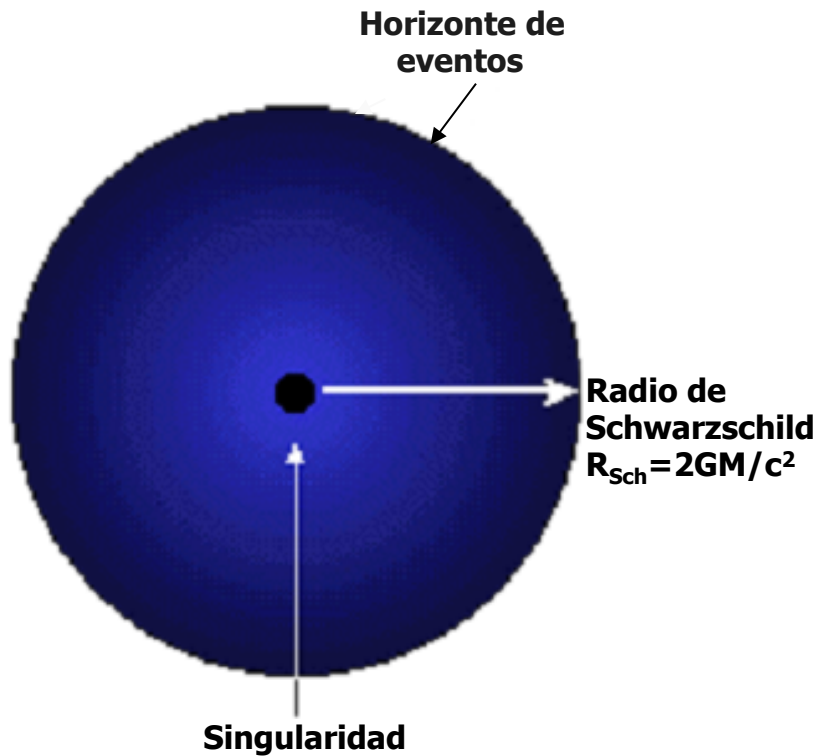
Hoyos negros





Una estrella que al final de su evolución tiene una masa superior a las tres masas solares no puede hacer nada para evitar su colapso. La materia caerá hasta llegar a un punto de densidad *infinita* conocido como la singularidad de un **hoyo negro**.

Estructura de un hoyo negro



Las dos regiones del H. N.:

Singularidad: Punto central en que se encuentra concentrada toda la masa.

Horizonte de eventos: Punto de no retorno. Todo objeto que llega aquí cae al hoyo negro. La luz tampoco puede escapar.

$$R_{Sch} = 3 \text{ km para el Sol}$$

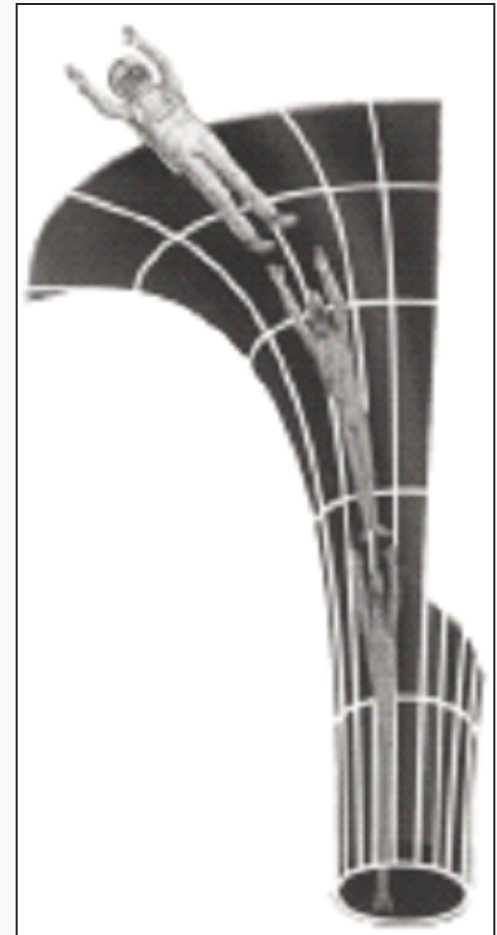
Algunas consecuencias de la Relatividad General en la vecindad de un hoyo negro

- Dilatación del tiempo
- Corrimiento al rojo gravitacional
- Horizonte de eventos
- Efecto de marea

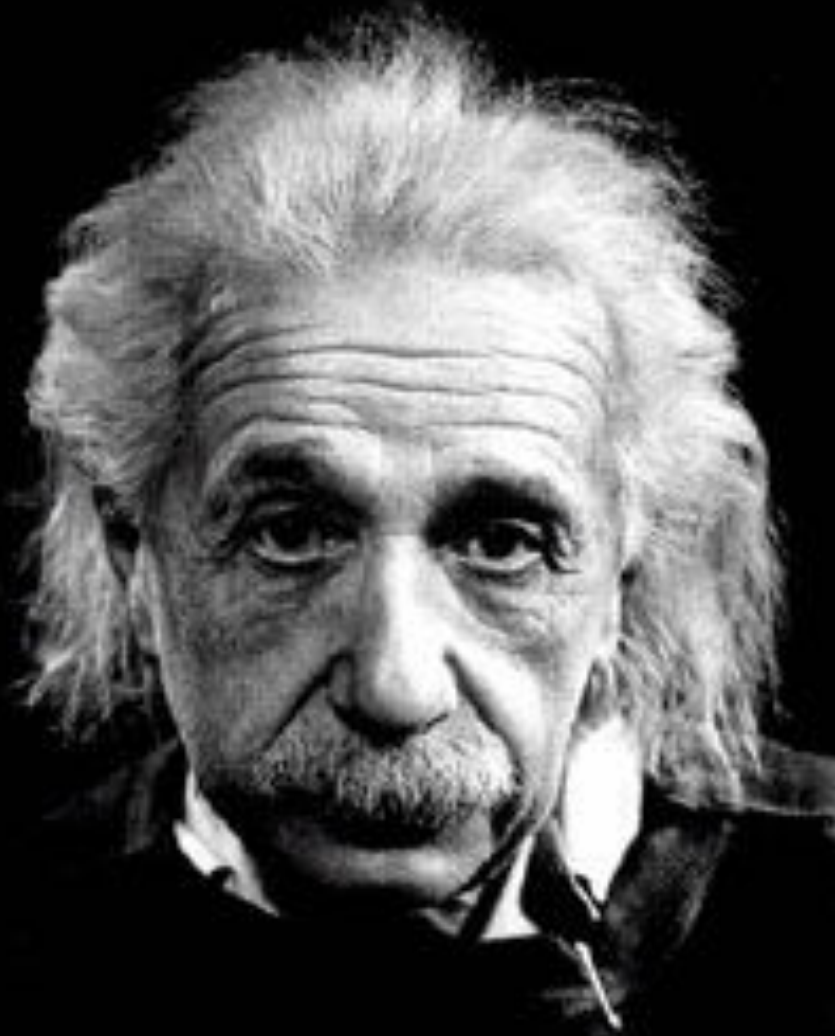
Fuerzas de marea del hoyo negro



A medida que un cuerpo se acerca al horizonte de eventos del H. N. las fuerzas de marea se vuelven cada vez más grandes, dando lugar al efecto espagueti.



Lo más incomprensible del universo



es que es comprensible.