

# El Universo observable

*Sao Carlos, 20/05/2013*

Héctor Vucetich

Observatorio Astronómico

Universidad Nacional de La Plata



# Introducción

Desde tiempos muy antiguos, el **hombre** ha deseado **comprender el Universo que nos rodea**. **Muchos modelos de Universo** fueron propuestos basándose sobre **Hipótesis de Simetría** aunque con **poco respaldo observacional**.

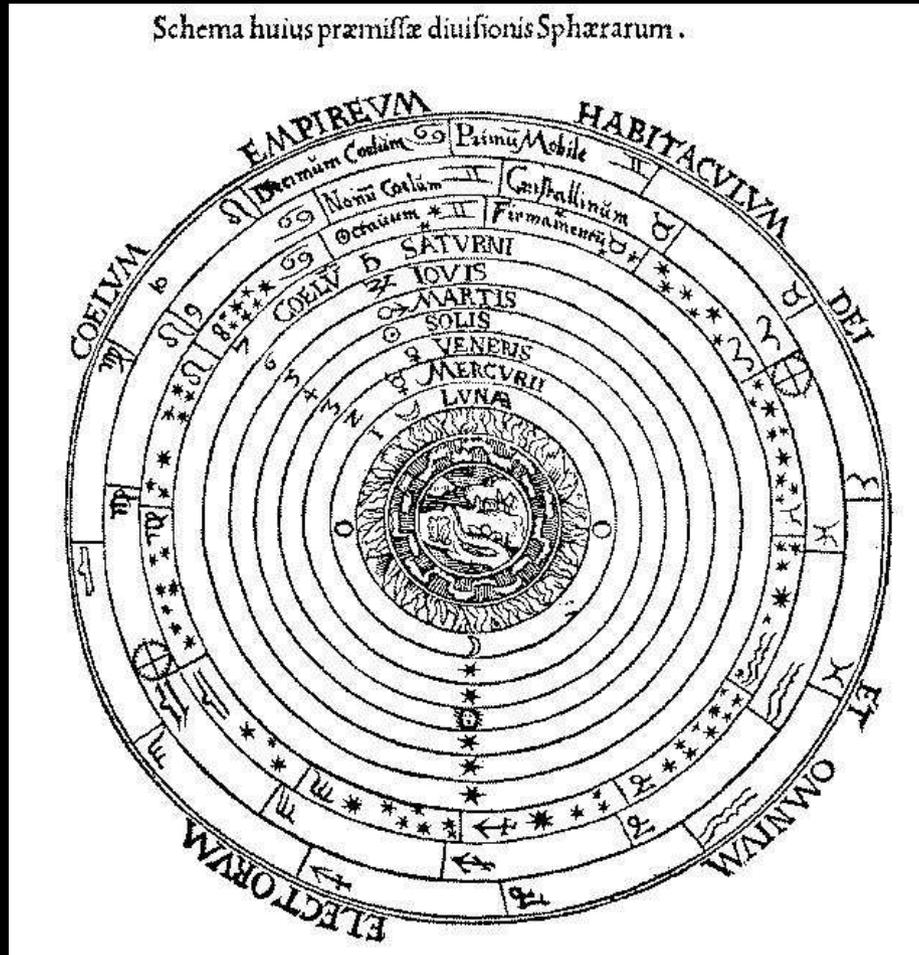


# Una Tierra Plana

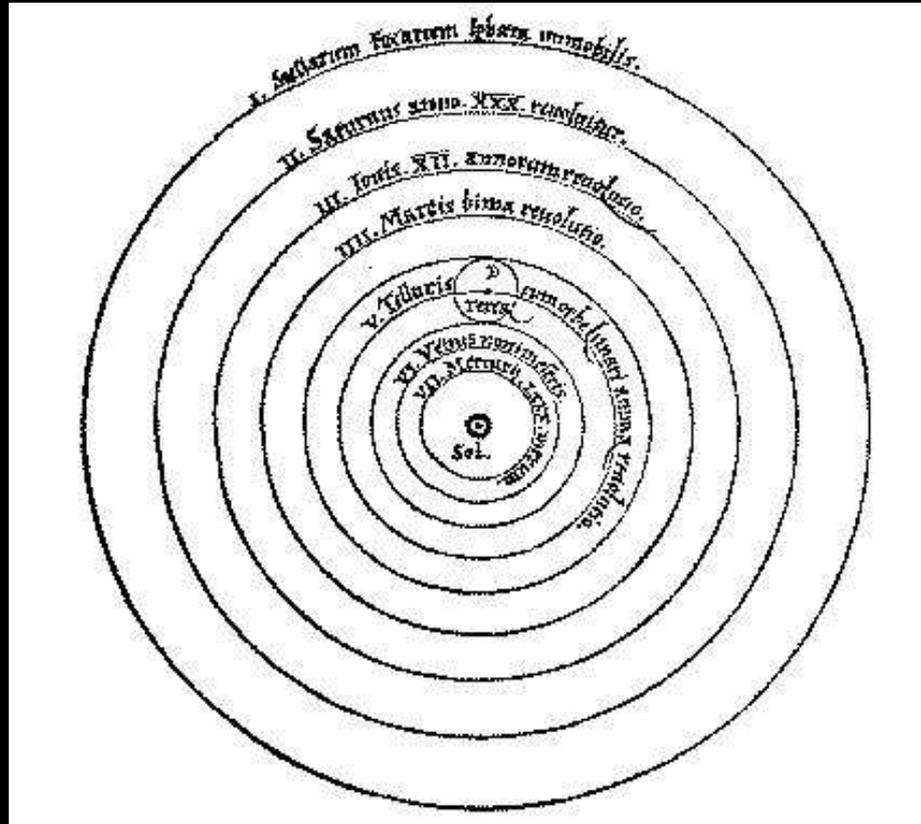


# Universo Geocéntrico

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



# Universo Heliocéntrico



# Nuestro modelo de Universo

- Nuestra **civilización científica** ha desarrollado su **propio modelo de Universo**.



# Nuestro modelo de Universo

- Nuestra **civilización científica** ha desarrollado su **propio modelo de Universo**.
- Está basado también sobre **hipótesis de simetría**



# Nuestro modelo de Universo

- Nuestra **civilización científica** ha desarrollado su **propio modelo de Universo**.
- Está basado también sobre **hipótesis de simetría**
- pero también **sobre una rica base observacional**



# Nuestro modelo de Universo

- Nuestra **civilización científica** ha desarrollado su **propio modelo de Universo**.
- Está basado también sobre **hipótesis de simetría**
- pero también **sobre una rica base observacional**
- **y se llama...**



# El Big Bang



# Los Principios

- **El principio galileano:** Las leyes de la física son las mismas en todo el Universo.



# Los Principios

- **El principio galileano:** Las leyes de la física son las mismas en todo el Universo.
- **El principio cosmológico:** El Universo es homogéneo e isotrópico.



# Los Principios

- **El principio galileano:** Las leyes de la física son las mismas en todo el Universo.
- **El principio cosmológico:** El Universo es homogéneo e isotrópico.
- **La expansión de Hubble:** El Universo se expande como un todo.



# Los Principios

- **El principio galileano:** Las leyes de la física son las mismas en todo el Universo.
- **El principio cosmológico:** El Universo es homogéneo e isotrópico.
- **La expansión de Hubble:** El Universo se expande como un todo.
- **El fondo de radiación:** El Universo está bañado por una radiación de fondo de 3 K.



# Los Principios

- **El principio galileano:** Las leyes de la física son las mismas en todo el Universo.
- **El principio cosmológico:** El Universo es homogéneo e isotrópico.
- **La expansión de Hubble:** El Universo se expande como un todo.
- **El fondo de radiación:** El Universo está bañado por una radiación de fondo de 3 K.
- **Inflación:** El Universo pasó por un periodo muy breve de expansión exponencial.



# Las leyes

- I: La geometría  
(Principios Galileano, Cosmológico y  
Expansión de Hubble)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) ds_E^2$$



# Las leyes

- I: La geometría  
(Principios Galileano, Cosmológico y Expansión de Hubble)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) ds_E^2$$

- II: La evolución  
(Principio Galileano y Relatividad General)

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{2c^2} \epsilon(p, T)$$



# Las leyes

- III: La ecuación de estado  
(Principio Galileano, Fondo Cósmico de Radiación y Modelo Estándar)



# Las leyes

- III: La ecuación de estado  
(Principio Galileano, Fondo Cósmico de Radiación y Modelo Estándar)
- Existe equilibrio termodinámico *p.c.t. t*



# Las leyes

- III: La ecuación de estado  
(Principio Galileano, Fondo Cósmico de Radiación y Modelo Estándar)
- Existe equilibrio termodinámico *p.c.t. t*
- El contenido del Universo está formado por la materia estándar, más la materia oscura, más la energía oscura



# Ecuación de estado

- **Materia hadrónica:** Formada por las partículas del **Modelo Estándar de las Interacciones Fundamentales**.



# Ecuación de estado

- **Materia hadrónica:** Formada por las partículas del **Modelo Estándar de las Interacciones Fundamentales**.
- **Materia oscura:** Interactúa **sólo (?) con la gravitación**. Constitución desconocida.



# Ecuación de estado

- **Materia hadrónica:** Formada por las partículas del **Modelo Estándar de las Interacciones Fundamentales**.
- **Materia oscura:** Interactúa **sólo (?) con la gravitación**. Constitución desconocida.
- **Materia demoníaca:** (Energía oscura) Produce antigraavedad (?); viola el **2º principio de la termodinámica**.



# Distancias



# Escala de distancias

- La **medición de distancias** es uno de los procesos más complejos en cosmología.



# Escala de distancias

- La **medición de distancias** es uno de los procesos más complejos en cosmología.
- Tradicionalmente, está afectado por **enormes errores sistemáticos**.



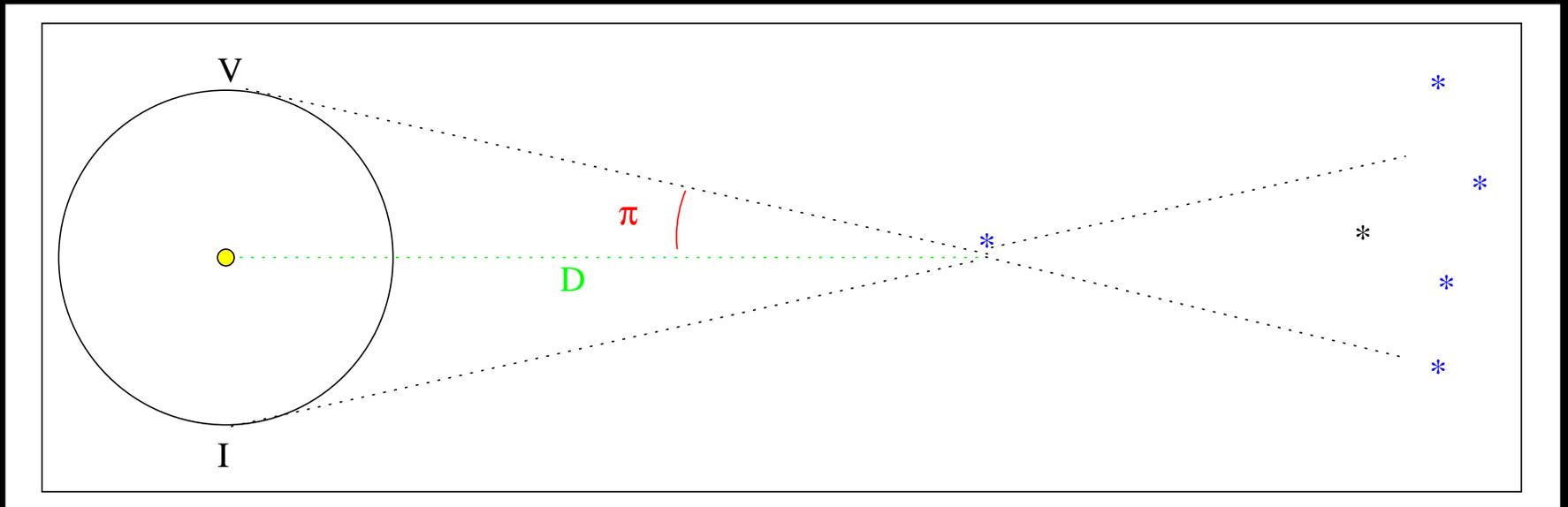
# Escala de distancias

- La **medición de distancias** es uno de los procesos más complejos en cosmología.
- Tradicionalmente, está afectado por **enormes errores sistemáticos**.
- Actualmente, se hace en tres etapas: **paralajes**, **estrellas variables** y **supernovas**.



# Paralaje

Las distancias a las estrellas cercanas se miden con la **paralaje**  $\pi$ .



La **unidad de distancia** es el **parsec** = (paralaje de  $1''$ ).



# Medición de paralajes

- La medición de una paralaje estelar se hace midiendo la **variación angular** de la imagen de una estrella durante **un año**.



# Medición de paralajes

- La medición de una paralaje estelar se hace midiendo la **variación angular** de la imagen de una estrella durante **un año**.
- Con **telescopios en tierra** puede lograrse un error de **0,1''**.



# Medición de paralajes

- La medición de una paralaje estelar se hace midiendo la **variación angular** de la imagen de una estrella durante **un año**.
- Con **telescopios en tierra** puede lograrse un error de  **$0,1''$** .
- El **satélite Hipparcos** logró medidas con error  **$\sim 0,001''$**



# Medición de paralajes

- La medición de una paralaje estelar se hace midiendo la **variación angular** de la imagen de una estrella durante **un año**.
- Con **telescopios en tierra** puede lograrse un error de **0,1''**.
- El **satélite Hipparcos** logró medidas con error  **$\sim 0,001''$**
- El **satélite Gaia** podrá medir (en principio) paralajes del orden de  **$\pi \sim 10^{-5}$** .



# Estrellas variables

- Estrellas muy luminosas, cuyo brillo **varía** periódicamente.



# Estrellas variables

- Estrellas muy luminosas, cuyo brillo **varía** periódicamente.
- Pueden **detectarse a gran distancia** por la forma de su curva de luz.



# Estrellas variables

- Estrellas muy luminosas, cuyo brillo **varía** periódicamente.
- Pueden **detectarse a gran distancia** por la forma de su curva de luz.
- Su **calibración** se hace con **estrellas de la misma clase en la Galaxia**.



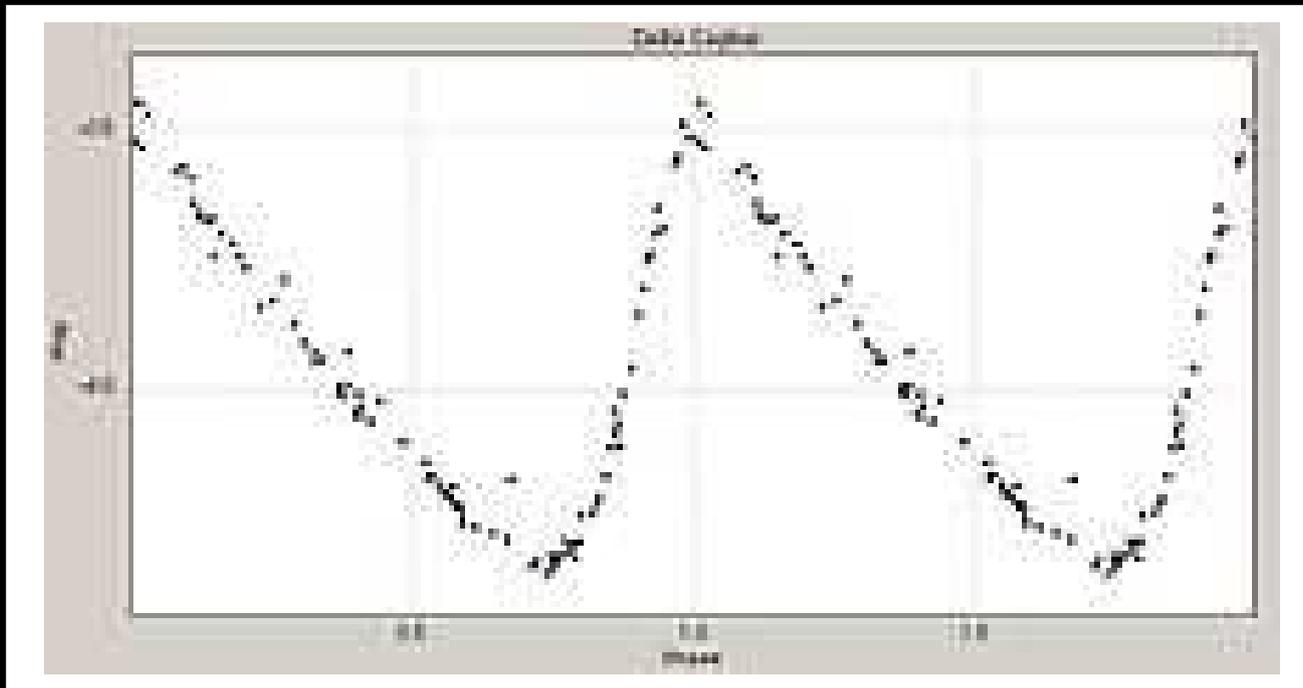
# Estrellas variables

- Estrellas muy luminosas, cuyo brillo **varía** periódicamente.
- Pueden **detectarse a gran distancia** por la forma de su curva de luz.
- Su **calibración** se hace con **estrellas de la misma clase en la Galaxia**.
- **La calibración es aun muy difícil.**



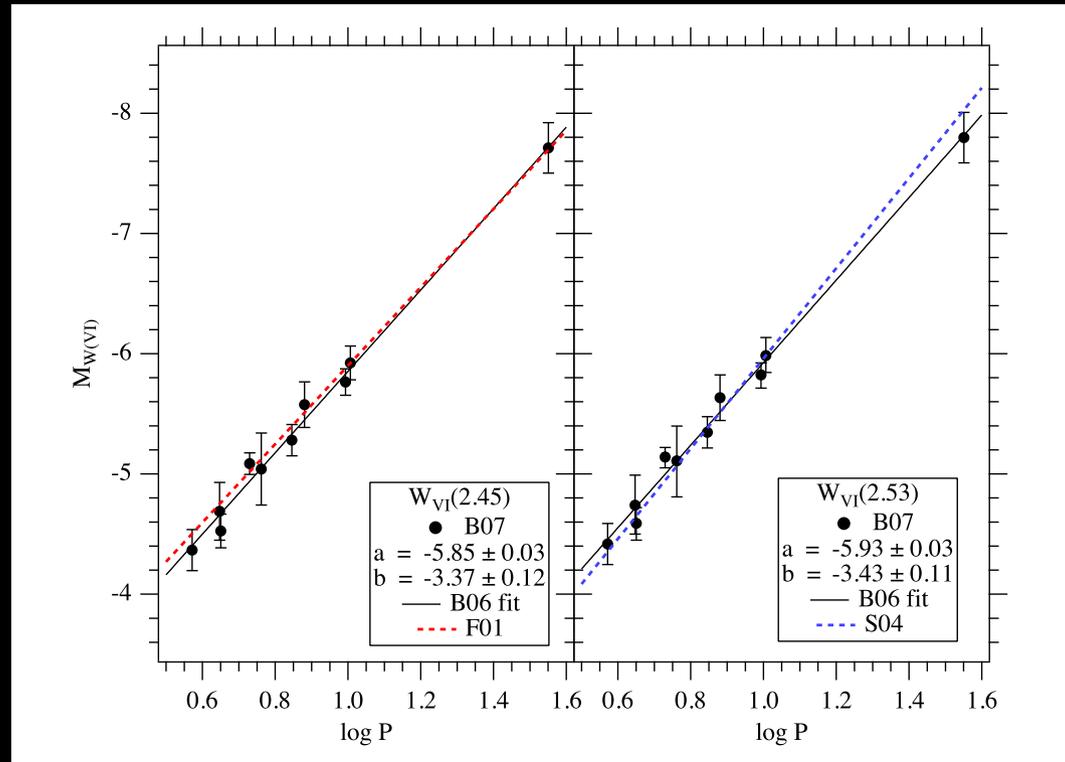
# Cefeidas

## Curva de luz de Delta de Cefeo



# Relación $P - L$

El brillo de las cefeidas depende de su periodo.



# Supernovas Ia

- Son **gigantescas explosiones estelares**, cuyo brillo puede ser **mayor que el de toda una Galaxia**.



# Supernovas Ia

- Son **gigantescas explosiones estelares**, cuyo brillo puede ser **mayor que el de toda una Galaxia**.
- **Visible desde distancias cosmológicas**.



# Supernovas Ia

- Son **gigantescas explosiones estelares**, cuyo brillo puede ser **mayor que el de toda una Galaxia**.
- **Visible desde distancias cosmológicas**.
- Su brillo, casi constante, **puede corregirse a un *brillo patrón***.



# Supernovas Ia

- Son **gigantescas explosiones estelares**, cuyo brillo puede ser **mayor que el de toda una Galaxia**.
- **Visible desde distancias cosmológicas**.
- Su brillo, casi constante, **puede corregirse a un *brillo patrón***.
- **Pueden calibrarse con supernovas en galaxias cercanas**.



# Escala de distancias



# Dos pasos

- La **escala de distancias** se establece en **dos pasos**.



# Dos pasos

- La **escala de distancias** se establece en **dos pasos**.
- Medición de la **constante de Hubble** (Galaxias cercanas).

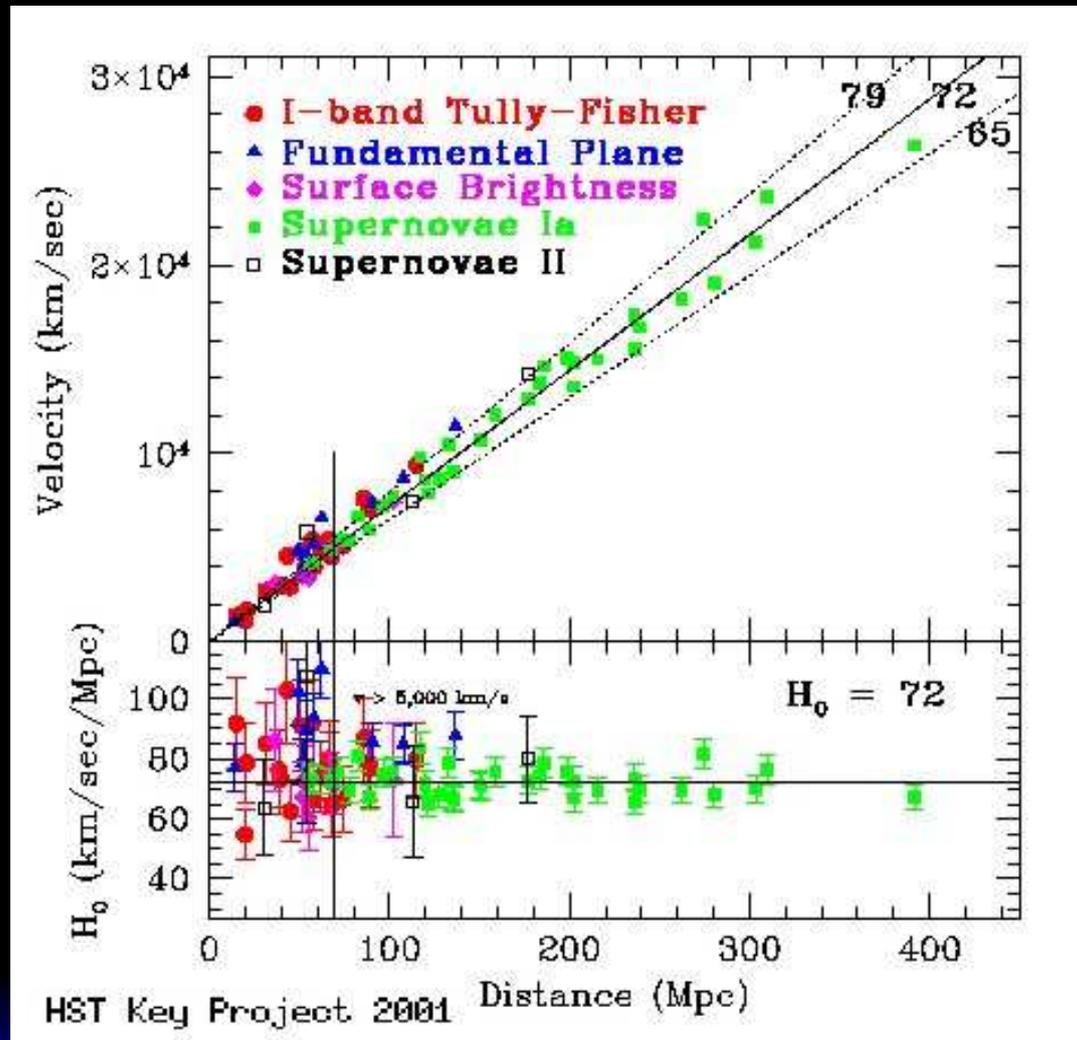


# Dos pasos

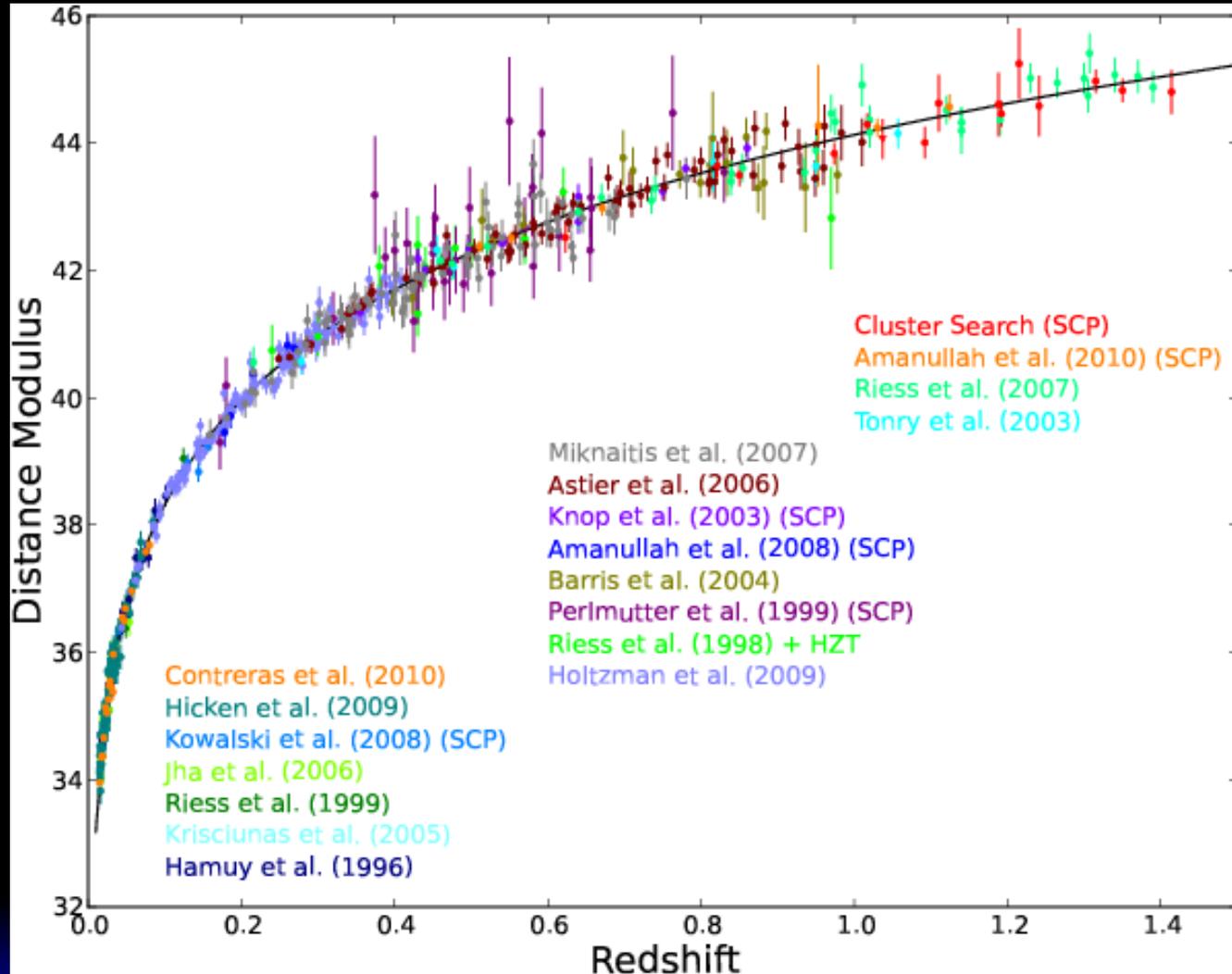
- La **escala de distancias** se establece en **dos pasos**.
- Medición de la **constante de Hubble** (Galaxias cercanas).
- Medición de la **aceleración del Universo** (Galaxias lejanas).



# Medición de $H_0$



# Medición de la aceleración



# El Fondo Cósmico de Radiación



# Propiedades

- El **fondo cósmico de radiación** tiene el espectro de un cuerpo negro con una temperatura de  $T_0 = (2,72548 \pm 0,00057) \text{ K}$ .



# Propiedades

- El **fondo cósmico de radiación** tiene el espectro de un cuerpo negro con una temperatura de  $T_0 = (2,72548 \pm 0,00057) \text{ K}$ .
- Hay una **fluctuación dipolar**, que corresponde al **movimiento del Sistema Solar a través del FRC** con una amplitud de  $\sim 10^{-3}T_0$ .

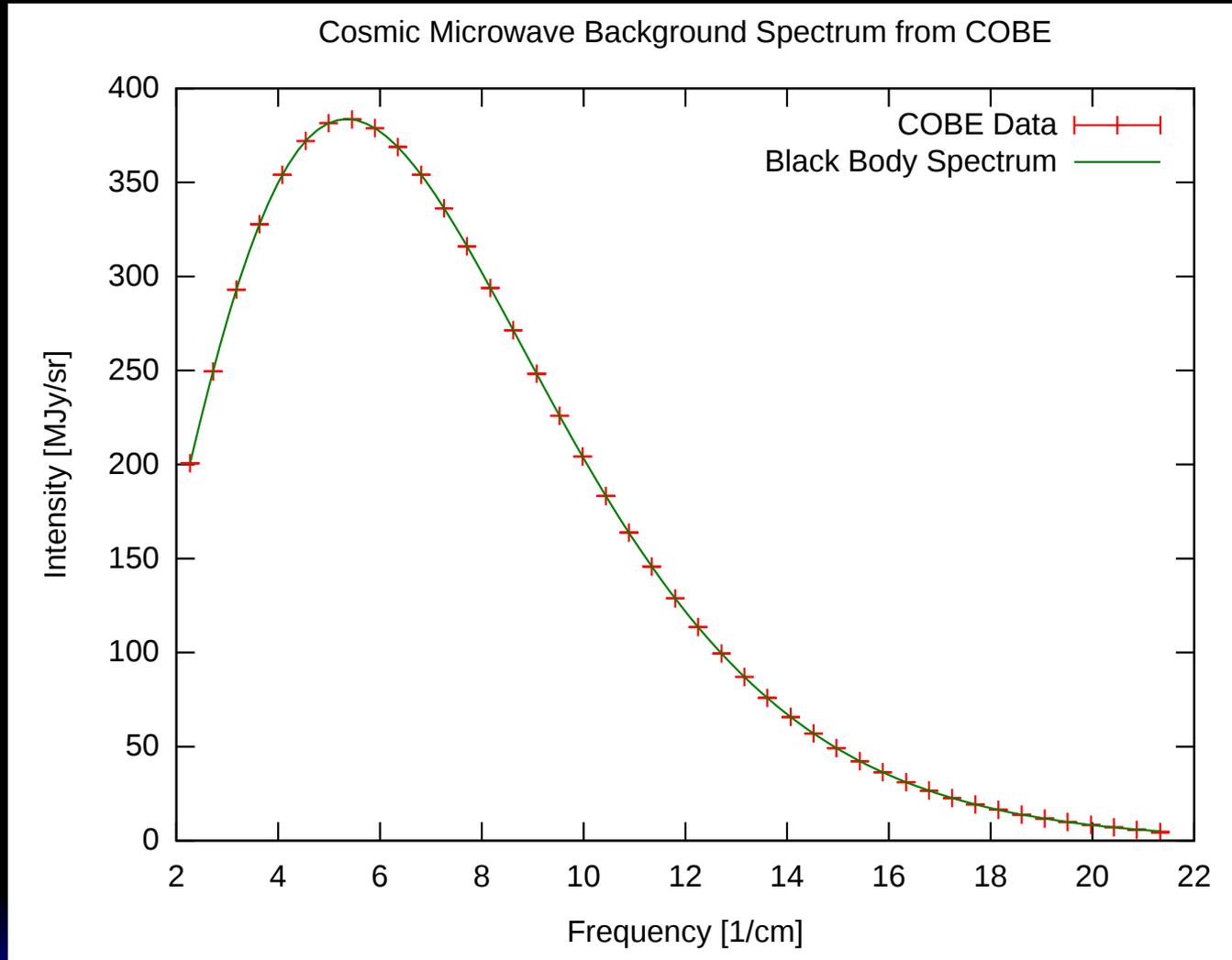


# Propiedades

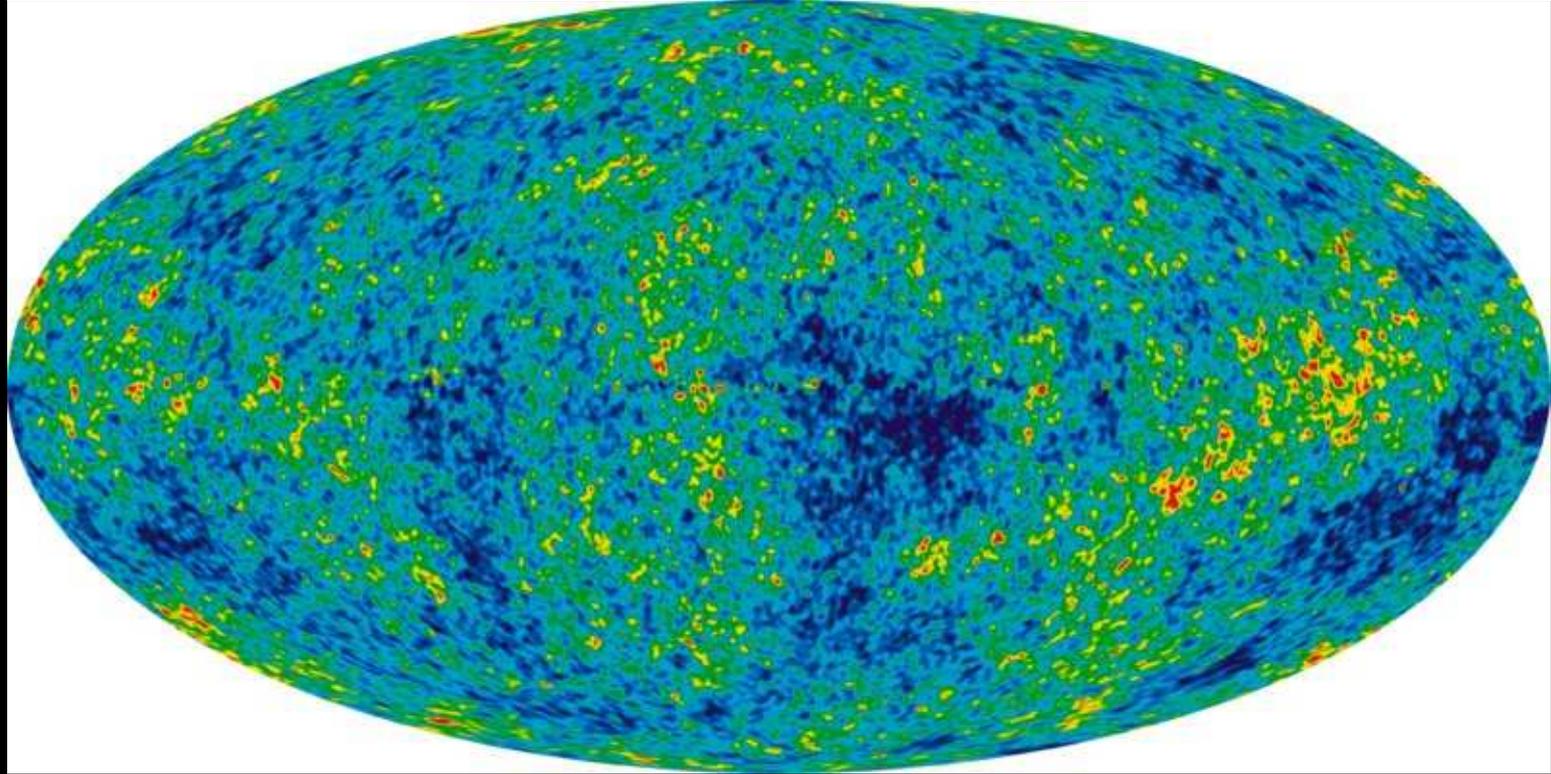
- El **fondo cósmico de radiación** tiene el espectro de un cuerpo negro con una temperatura de  $T_0 = (2,72548 \pm 0,00057) \text{ K}$ .
- Hay una **fluctuación dipolar**, que corresponde al **movimiento del Sistema Solar a través del FRC** con una amplitud de  $\sim 10^{-3}T_0$ .
- Hay **fluctuaciones menores**, con una amplitud de  $\sim 10^{-5}T_0$ .



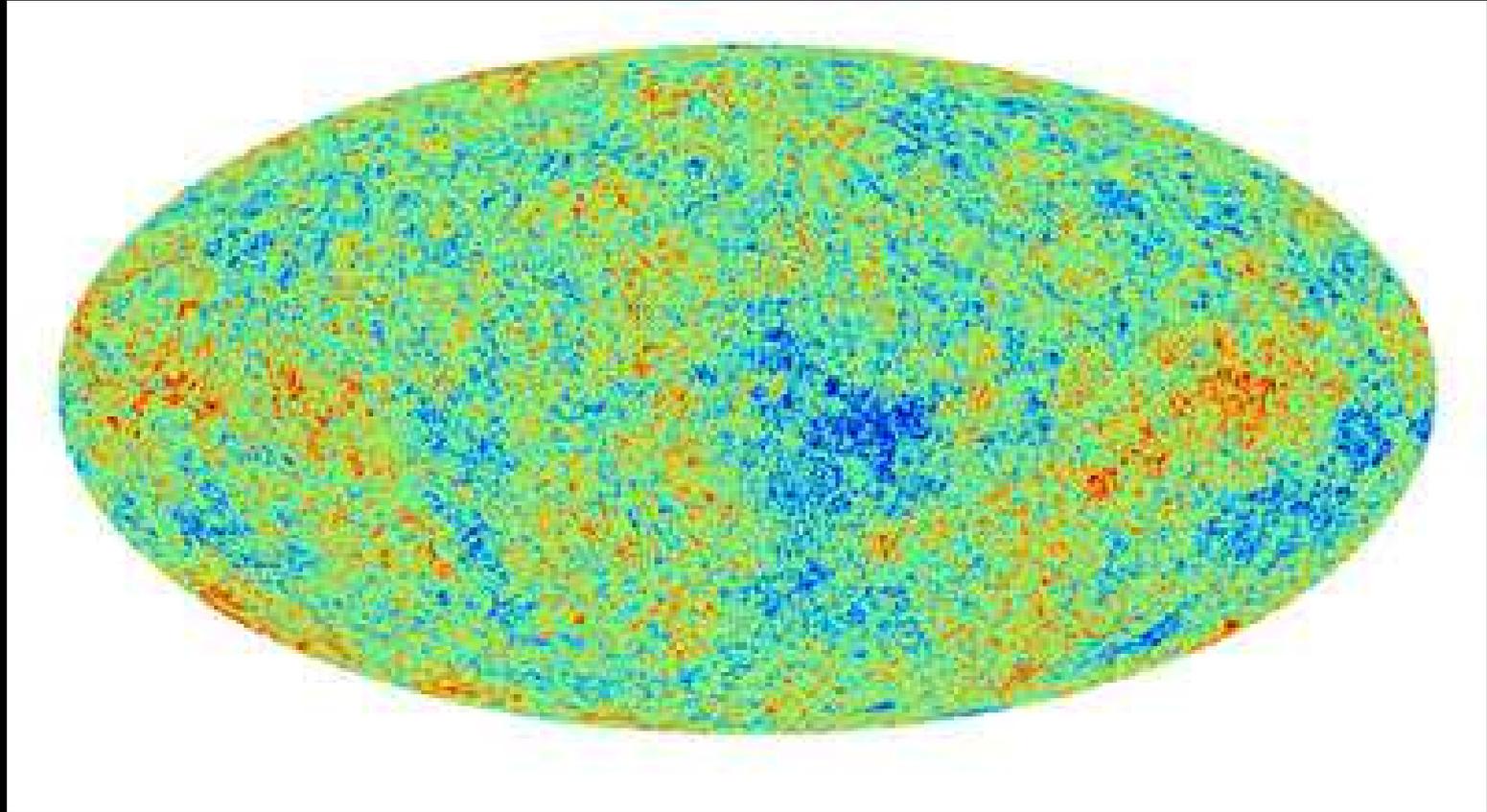
# Un cuerpo negro perfecto



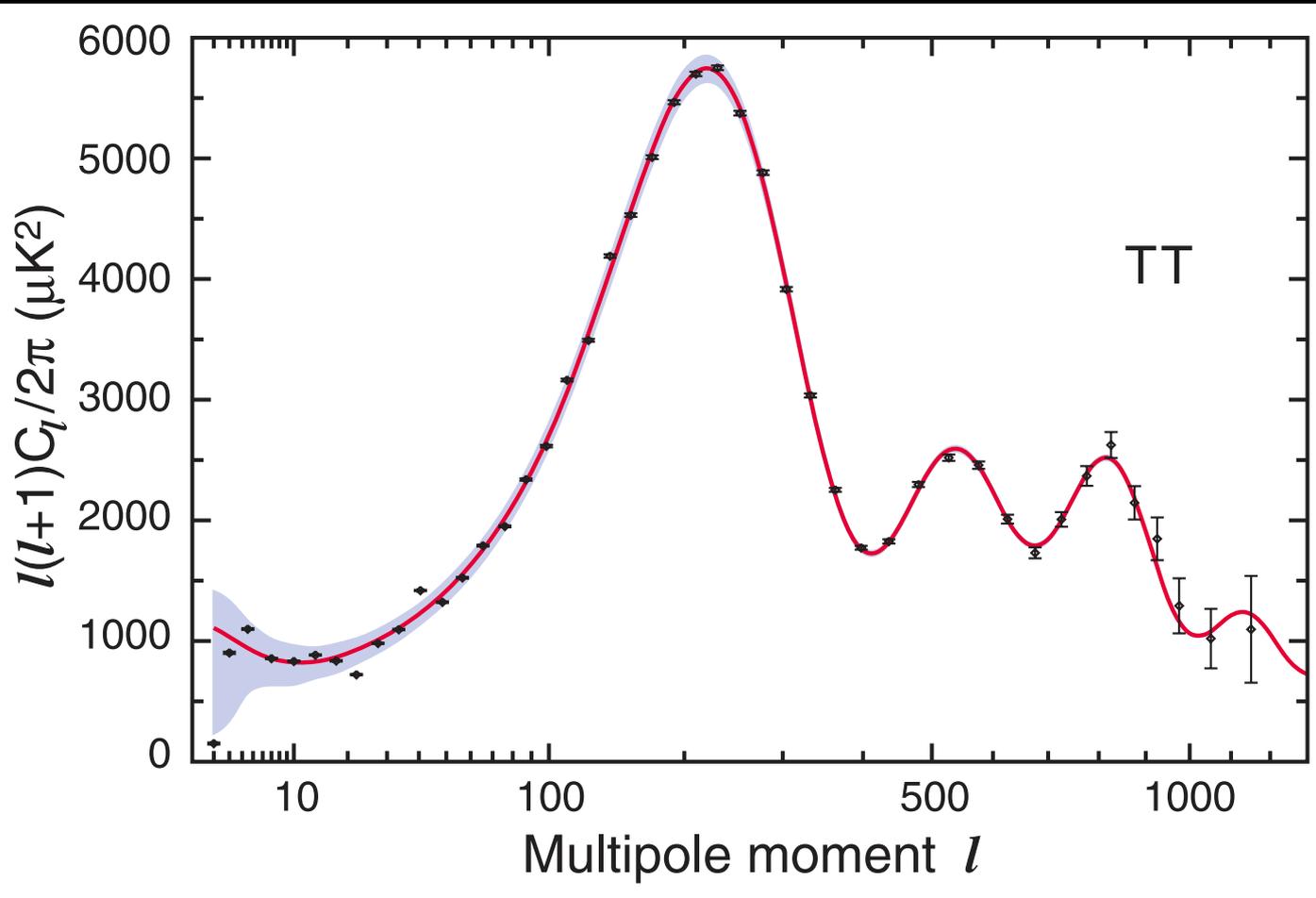
# El cielo en microondas



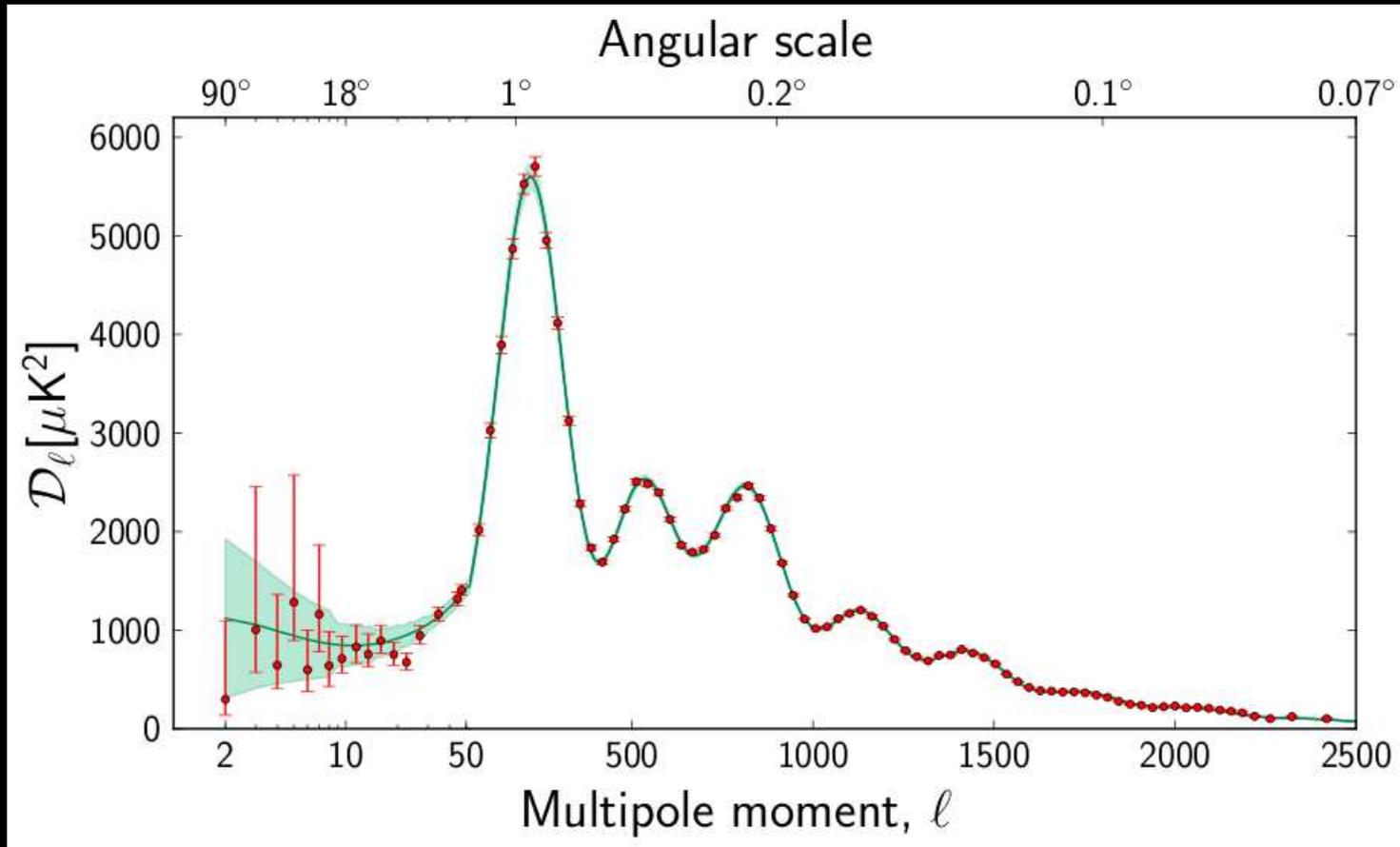
# El cielo en alta resolución



# Un espectro limitado



# Un espectro más moderno



# Interpretación



# Origen

- Las **fluctuaciones iniciales** en el plasma originaron **ondas sonoras** en el fluido formado por materia bariónica y radiación.



# Origen

- Las **fluctuaciones iniciales** en el plasma originaron **ondas sonoras** en el fluido formado por materia bariónica y radiación.
- La **materia oscura**, atraída por la gravedad, **se comprimió** y **ayudó a generar oscilaciones**.

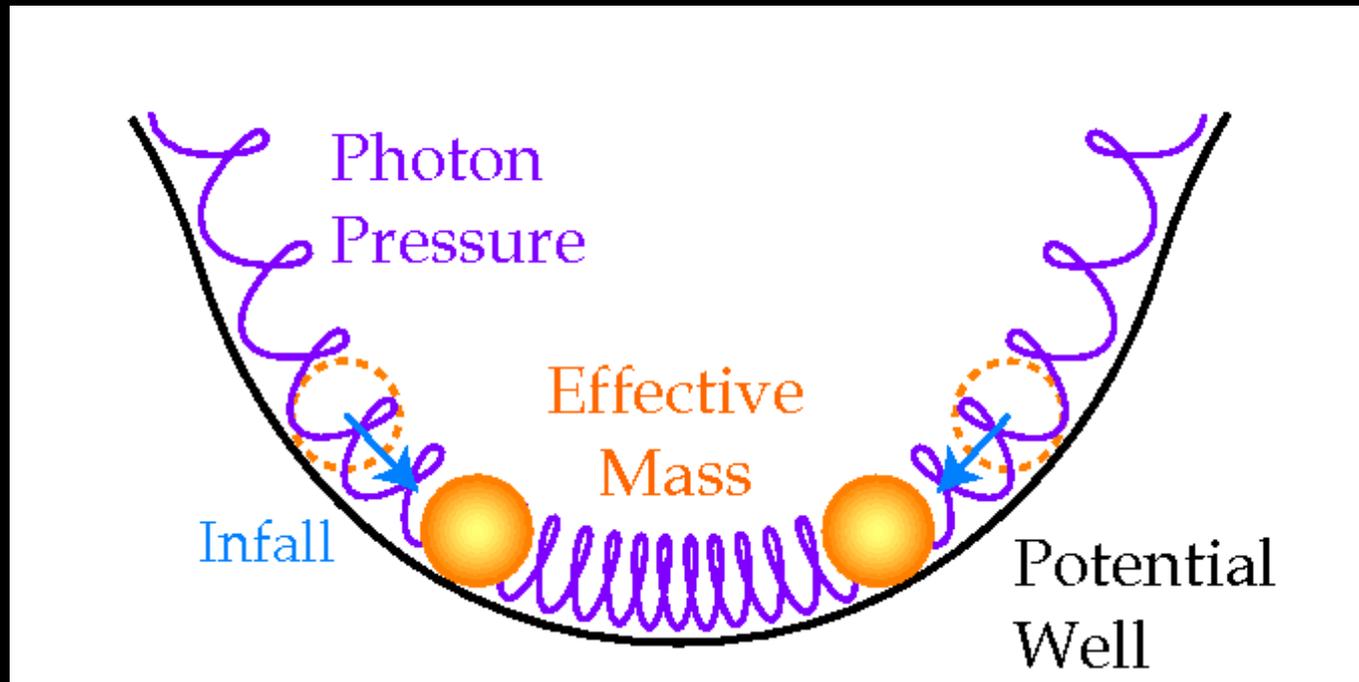


# Origen

- Las **fluctuaciones iniciales** en el plasma originaron **ondas sonoras** en el fluido formado por materia bariónica y radiación.
- La **materia oscura**, atraída por la gravedad, **se comprimió** y **ayudó a generar oscilaciones**.
- Las **ondas se propagaron** con **velocidad variable** y **frecuencia variables**.



# Ondas en el plasma original



# Origen (2)

- Cuando la **temperatura del Universo disminuyó**, los **electrones se combinaron con los protones** y **el Universo se hizo transparente**.



# Origen (2)

- Cuando la **temperatura del Universo disminuyó**, los **electrones se combinaron con los protones** y **el Universo se hizo transparente**.
- **La radiación escapó** y **dejó de hacer presión sobre la materia bariónica**.



# Origen (2)

- Cuando la **temperatura del Universo disminuyó**, los **electrones se combinaron con los protones** y **el Universo se hizo transparente**.
- **La radiación escapó** y **dejó de hacer presión sobre la materia bariónica**.
- **La radiación se propagó libremente** hasta llegar a los satélites que la detectaron.



# Origen (3)

- Las ondas de materia bariónica se detuvieron cuando la presión de radiación desapareció.



# Origen (3)

- Las ondas de materia bariónica se detuvieron cuando la presión de radiación desapareció.
- La materia formó superficies esféricas y fue arrastrada por la expansión del Universo.



# Origen (3)

- Las ondas de materia bariónica se detuvieron cuando la presión de radiación desapareció.
- La materia formó superficies esféricas y fue arrastrada por la expansión del Universo.
- El radio de esas esferas se llama el horizonte sónico.

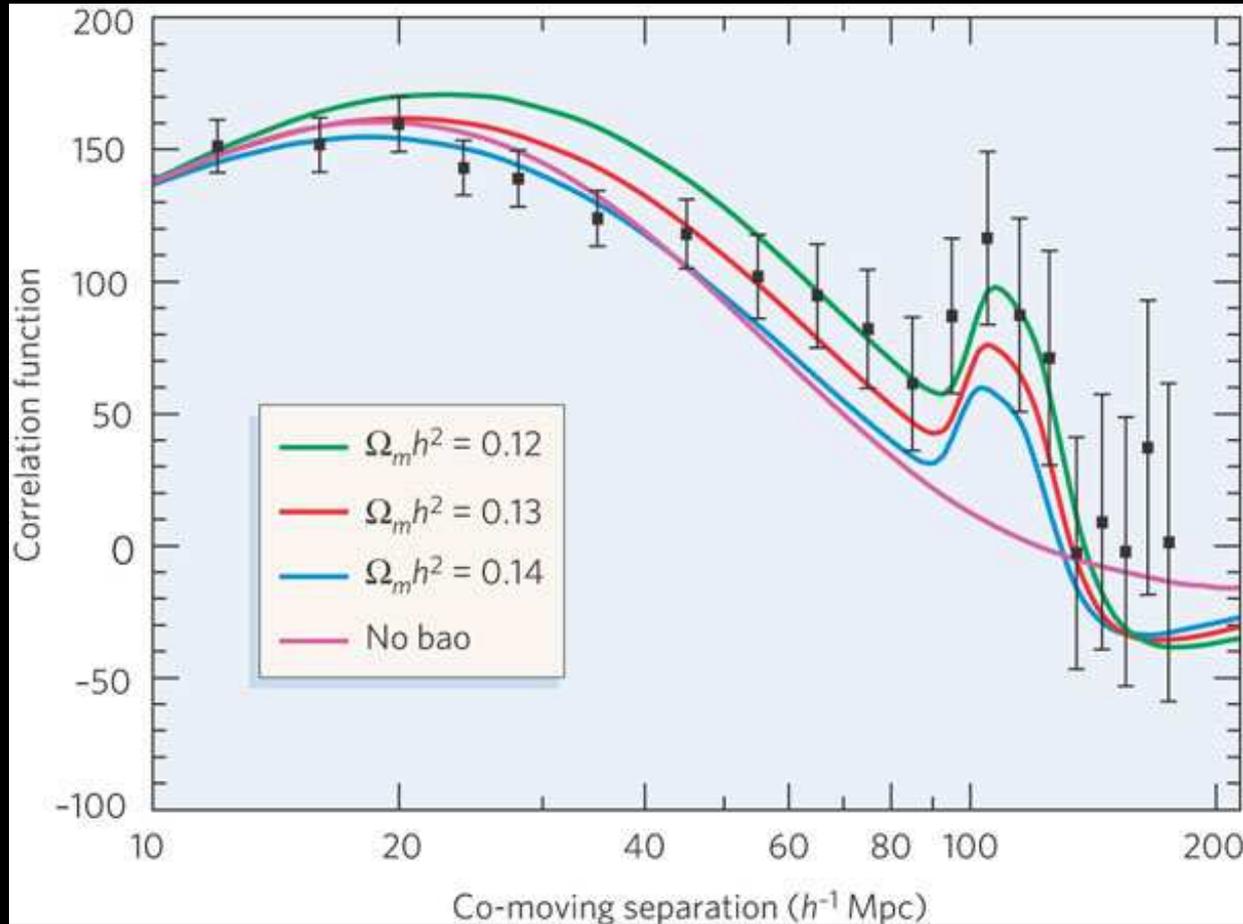


# Origen (3)

- Las ondas de materia bariónica se detuvieron cuando la presión de radiación desapareció.
- La materia formó superficies esféricas y fue arrastrada por la expansión del Universo.
- El radio de esas esferas se llama el horizonte sónico.
- Su valor puede calcularse a partir de los datos del FCR.



# La señal de los bariones



# Conclusiones

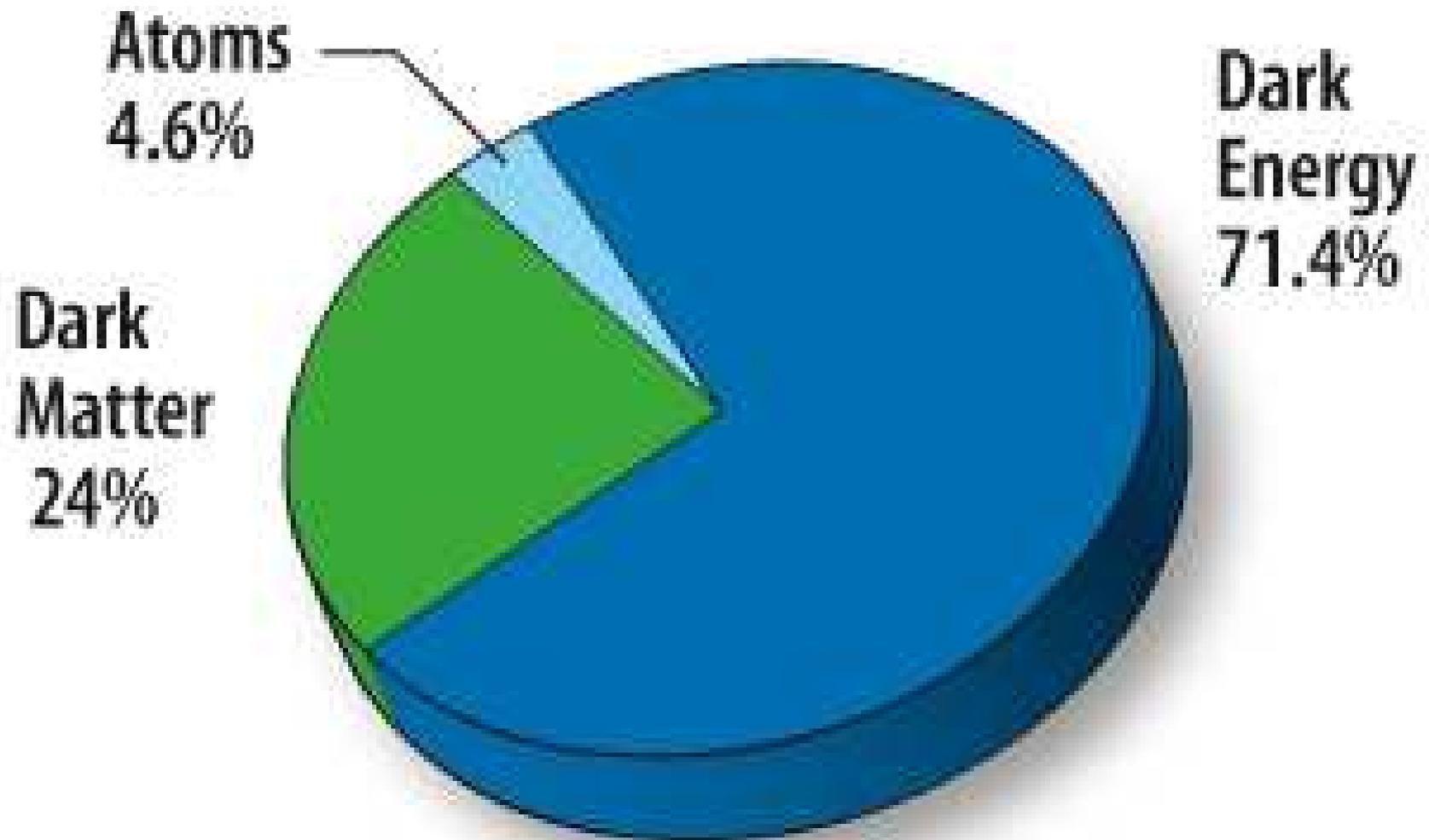


# Resultados (Planck)

Parámetro	$N$	$V \pm \sigma$
Edad del Universo (Ga)	$t_0$	$13,717 \pm 0,048$
Constante de Hubble (km/s/Mpc)	$H_0$	$67,3 \pm 1,4$
Densidad de Bariones	$\Omega_B$	$0,04868 \pm 0,00093$
Densidad de Materia Oscura	$\Omega_M$	$0,266 \pm 0,015$
Densidad de “Energía Oscura”	$\Omega_\Lambda$	$0,685 \pm 0,018$
“Densidad de Curvatura”	$\Omega_K$	$-0,0004 \pm 0,0033$



# La materia del Universo (WMAP)



# Nuestro conocimiento del Universo

- Los datos obtenidos de las escalas de distancias y principalmente del **Fondo Cósmico de Radiación** resumen nuestro conocimiento actual de Universo.



# Nuestro conocimiento del Universo

- Los datos obtenidos de las escalas de distancias y principalmente del **Fondo Cósmico de Radiación** resumen nuestro conocimiento actual de Universo.
- “We find no strong evidence to favour any extension to the base  $\Lambda$ CDM cosmology, either from the CMB temperature power spectrum alone, or in combination with the Planck lensing power spectrum and other astrophysical data sets.” **Planck**



# Tres sapos grandes

- Hay, sin embargo, **varios problemas** en la física del modelo cosmológico estándar:



# Tres sapos grandes

- Hay, sin embargo, **varios problemas** en la física del modelo cosmológico estándar:
- La materia oscura,



# Tres sapos grandes

- Hay, sin embargo, **varios problemas** en la física del modelo cosmológico estándar:
- La materia oscura,
- La **energía oscura** y



# Tres sapos grandes

- Hay, sin embargo, **varios problemas** en la física del modelo cosmológico estándar:
- La materia oscura,
- La **energía oscura** y
- El **inflatón**.



# ¿Conocemos el Universo?

- Ninguno de esos tres personajes ha sido estudiado en el laboratorio.



# ¿Conocemos el Universo?

- Ninguno de esos tres personajes ha sido estudiado en el laboratorio.
- Tampoco han sido detectados en fenómenos astrofísicos.



# ¿Conocemos el Universo?

- Ninguno de esos tres personajes ha sido estudiado en el laboratorio.
- Tampoco han sido detectados en fenómenos astrofísicos.
- Algunos “candidatos” tienen problemas de consistencia. (Por ejemplo, energía del vacío)



# ¿Conocemos el Universo?

- Ninguno de esos tres personajes ha sido estudiado en el laboratorio.
- Tampoco han sido detectados en fenómenos astrofísicos.
- Algunos “candidatos” tienen problemas de consistencia. (Por ejemplo, energía del vacío)
- Y tampoco sabemos tratar la gravitación cuántica...



# Final

Como toda ciencia que florece, la cosmología resuelve problemas viejos mientras plantea nuevos.

Lo admirable no es que el Universo sea tan grande sino que el hombre haya sido capaz de medirlo.

ANATOLE FRANCE  
*El jardín de Epicuro*

