

¿A qué velocidad se expande el Universo?

José Luis Bernal

Instituto de Ciencias del Cosmos – Universitat de Barcelona

Agrupació Astronòmica Sabadell

03/10/18

Cosmología, eso es?

Cosmología: Parte de la astronomía que trata de las leyes generales, del origen y de la evolución del Universo [RAE]

Piezas básicas

❖ Postulados de Einstein:

- Las leyes de la física son las mismas en todo el Universo.
- La velocidad de la luz es finita y constante.

❖ Gravedad descrita por la Relatividad General:

- Curvatura del espacio-tiempo + $\Lambda \iff$ Densidad y flujo de energía

❖ Principio cosmológico:

- Universo homogéneo e isótropo.

Piezas básicas

❖ Postulados de Einstein:

- Las leyes de la física son las mismas en todo el Universo.

Ecuaciones de Friedmann-Leimaître-Robertson-Walker

❖ Gravedad descrita por la Relatividad General:

- Curvatura del espacio-tiempo \Leftrightarrow Densidad y flujo de energía

¿Universo estático?

¿Universo en evolución?

❖ Principio cosmológico:

- Universo homogéneo e isótropo.

Universo estático o dinámico?

Medir la velocidad de otras galaxias, pero cómo?

Universo estático o dinámico?

Redshift: cuando hay un movimiento relativo entre la fuente y el observador, la longitud de onda de la luz que se observa es distinta a la de la emitida

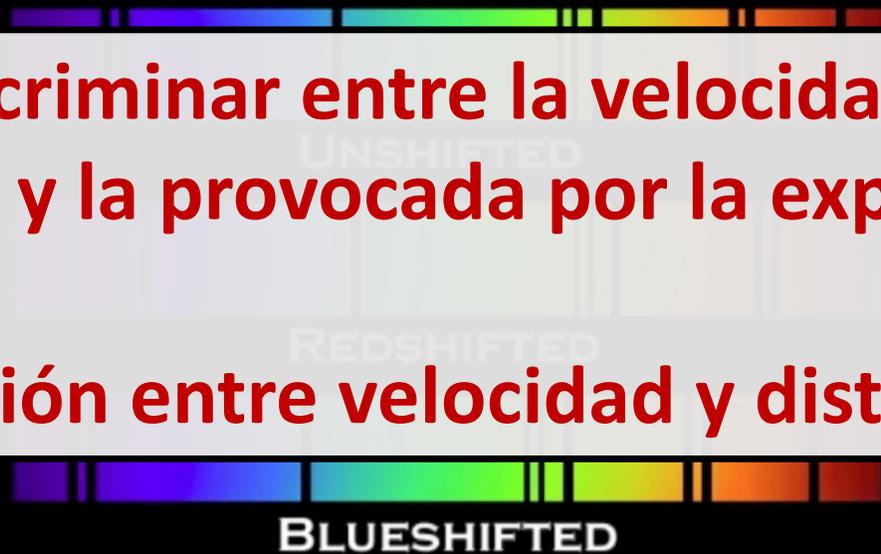


Universo estático o dinámico?

Redshift: cuando hay un movimiento relativo entre la fuente y el observador, la longitud de onda de la luz que se observa es distinta a la de la emitida

Es necesario discriminar entre la velocidad individual de la fuente y la provocada por la expansión.

Relación entre velocidad y distancia?



Universo estático o dinámico?

Paralajes

Posición en el cielo

+

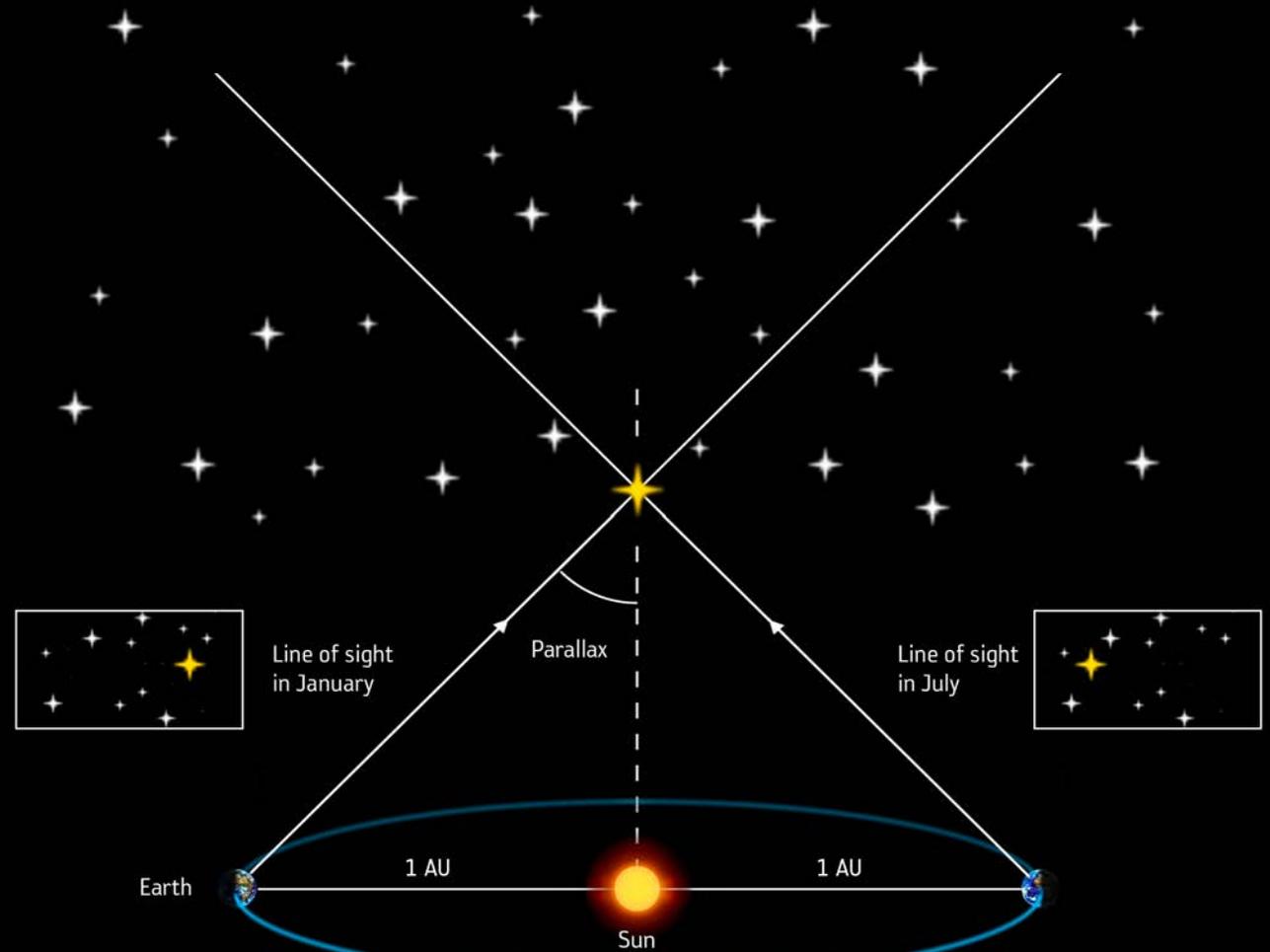
Geometría

+

Movimiento de la Tierra

⇓

Distancia a objetos cercanos

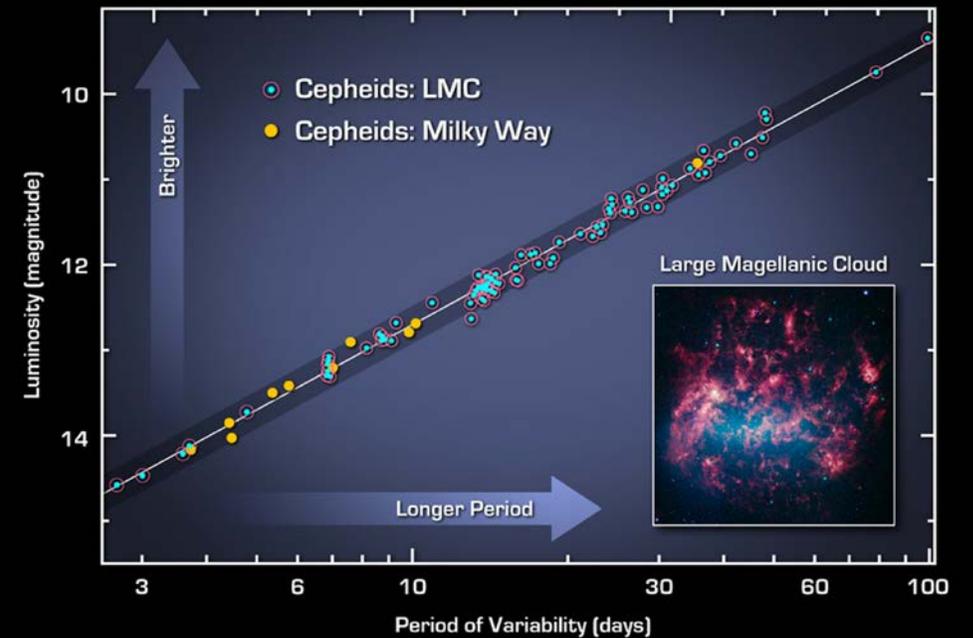


Universo estático o dinámico?

Candelas estándar: Estimar la distancia de una fuente a partir de su luminosidad conocida.



Cefeidas:
Relación entre
el periodo de
variabilidad y la
luminosidad
absoluta



Universo estático o dinámico?

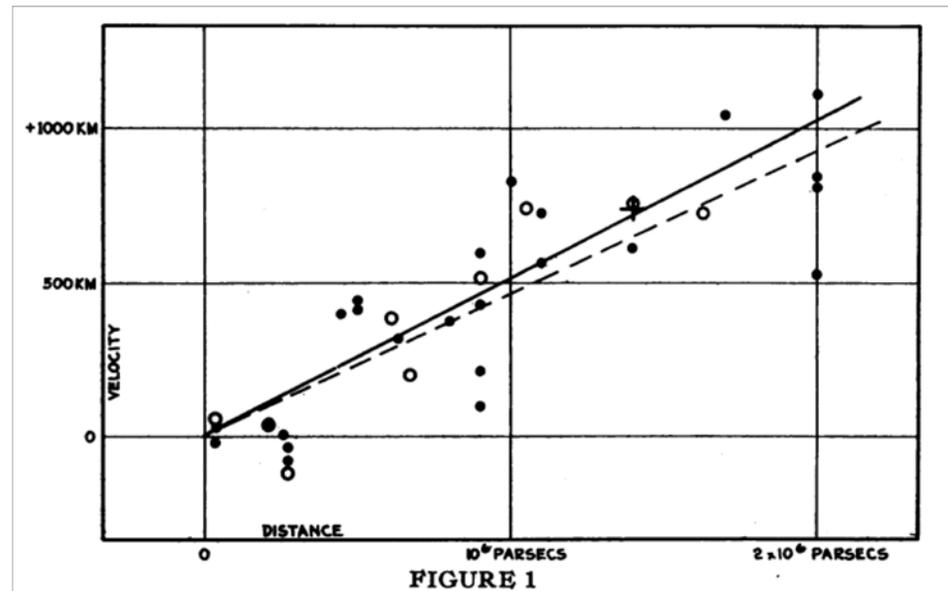
Medir la velocidad de otras galaxias, pero cómo?

Hubble (1929): las nebulosas extragalácticas se alejan radialmente de nuestro sistema en todas direcciones

Ley de Hubble

$$v = H_0 d$$

$$H_0 \sim \frac{1}{\text{Edad del Universo}}$$



Hubble 1929

Universo estático o dinámico?

Medir la velocidad de otras galaxias, pero cómo?

Hubble (1929): las nebulosas
de nuestra galaxia

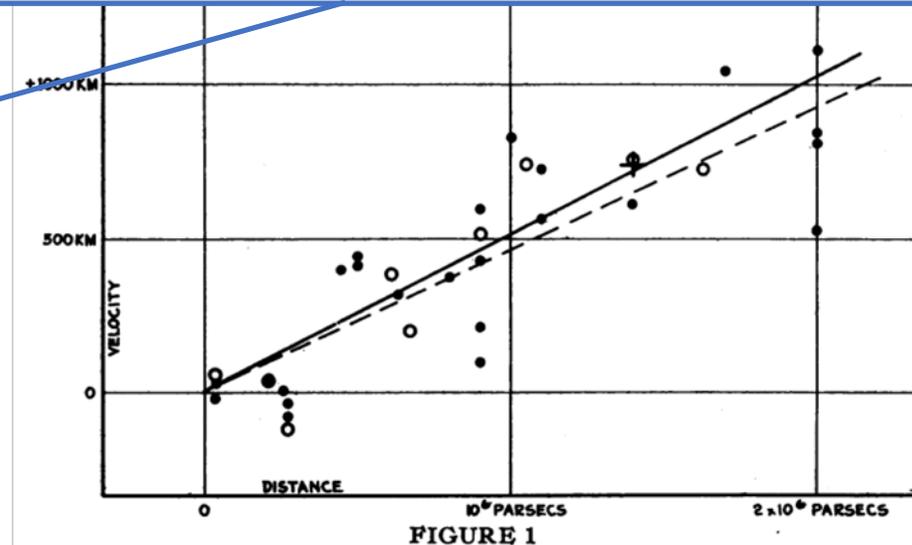
H_0 = Constante de Hubble \Rightarrow Velocidad de expansión a una distancia d

$$[H_0] \equiv \text{km/s/Mpc}$$

Ley de Hubble

$$v = H_0 d$$

$$H_0 \sim \frac{1}{\text{Edad del Universo}}$$



Hubble 1929

Universo estático o dinámico?

Ecuaciones de Friedmann-Leimaître-Robertson-Walker

~~¿Universo estático?~~

¡El Universo se está expandiendo!

Ley de Hubble

λ de la luz también se expande con el Universo:
redshift \Leftrightarrow tiempo

$$H_0 \sim \frac{1}{\text{Edad del Universo}}$$



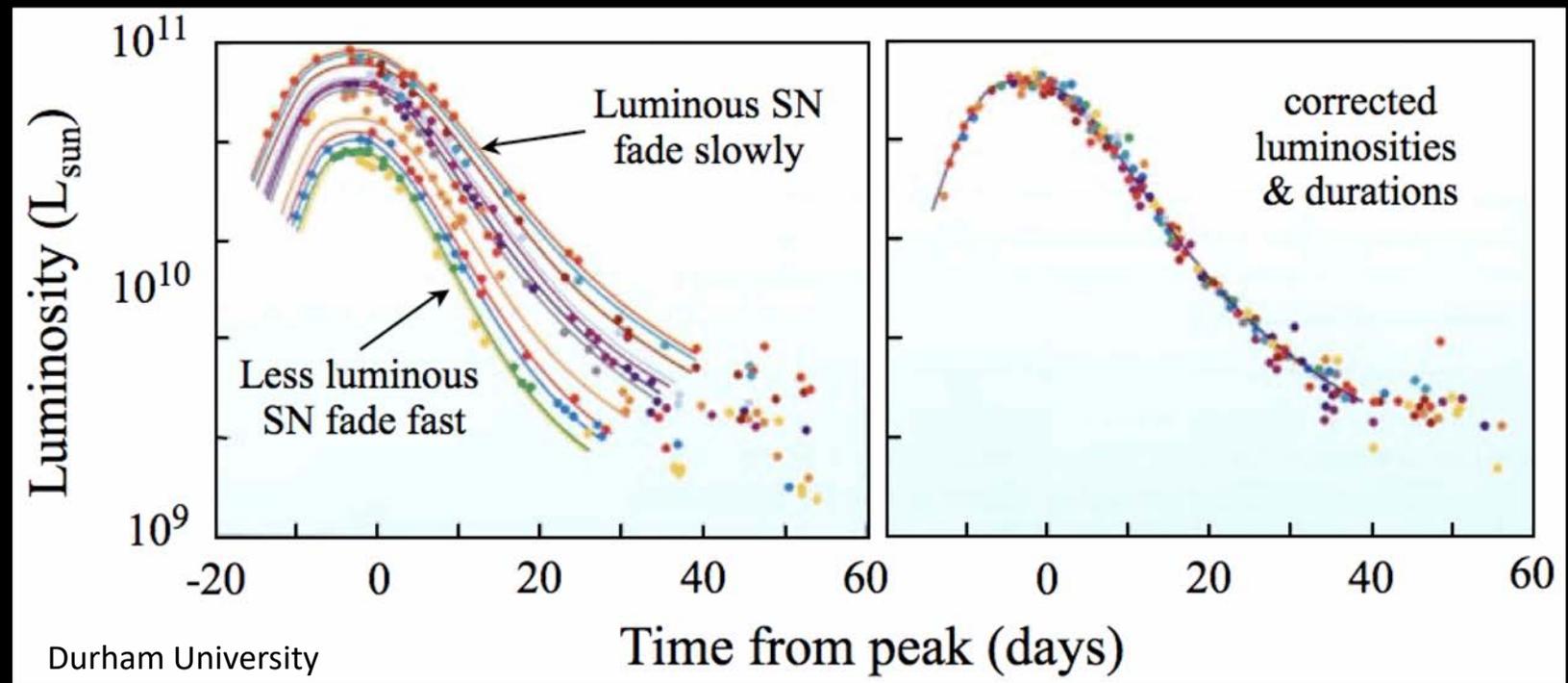
Hubble 1929

Universo estático o dinámico?

Candelas estándar: Estimar la distancia de una fuente a partir de su luminosidad conocida.



SNe Tipo Ia: Relación entre el color, la anchura de la curva de luz y la luminosidad absoluta



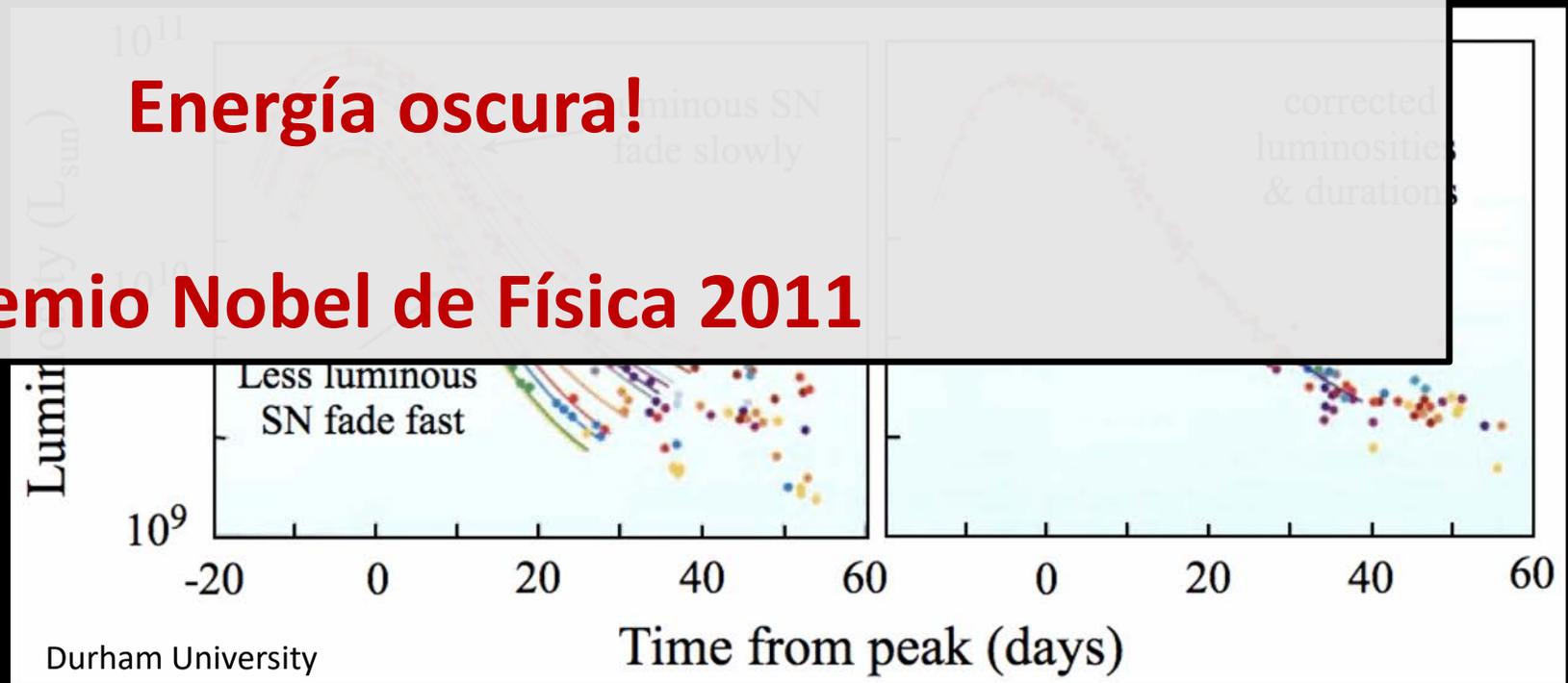
Universo estático o dinámico?

Candelas estándar: Estimar la distancia de una fuente a partir de su luminosidad conocida.

Descubrimiento de la expansión acelerada del Universo

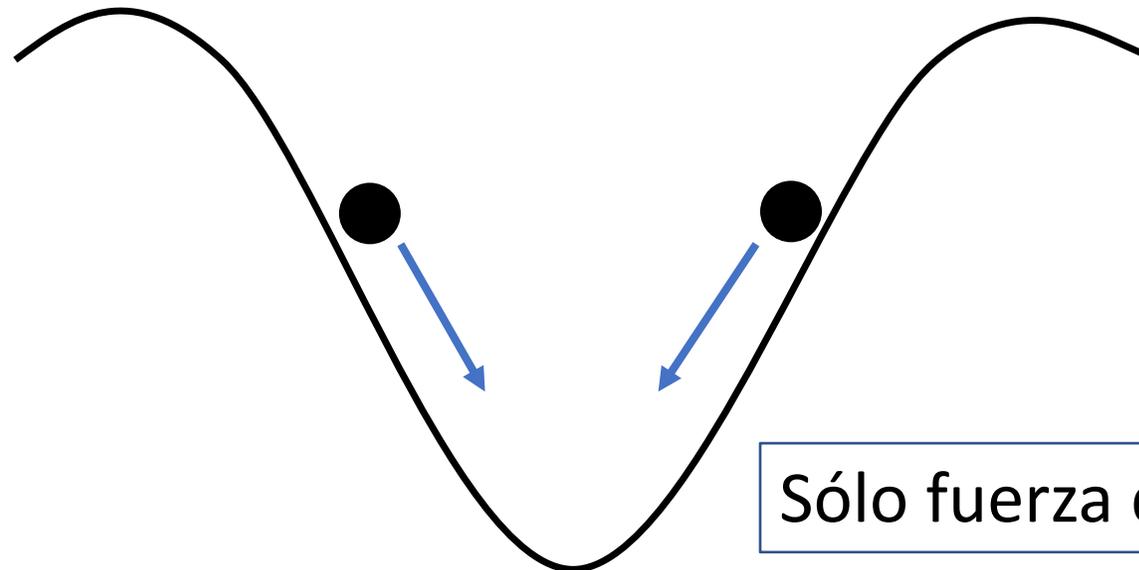
Energía oscura!

Premio Nobel de Física 2011



Fondo de Radiación de Microondas

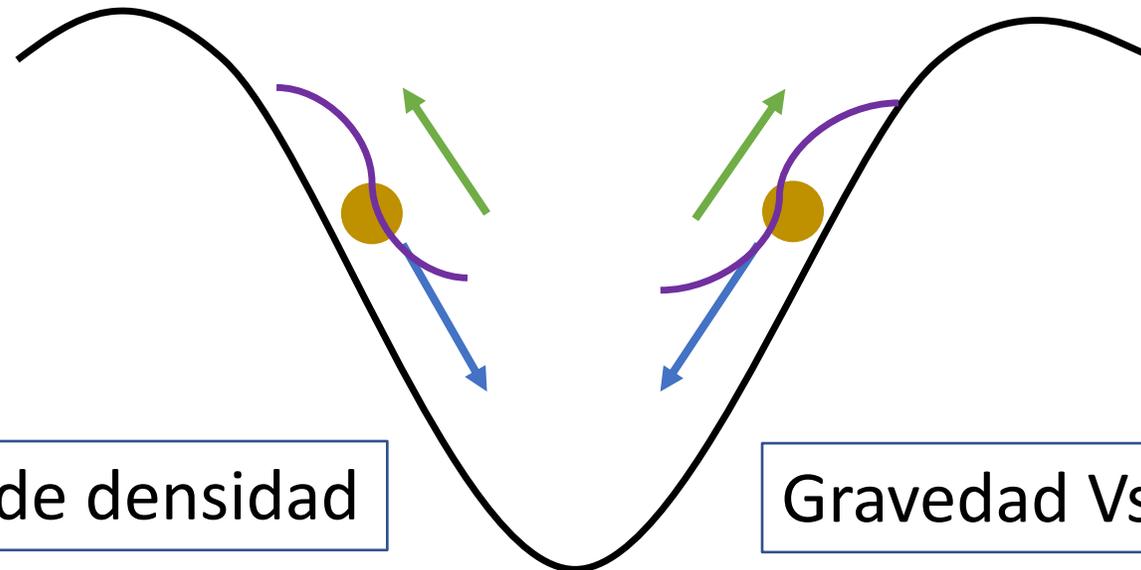
- $t < 380.000$ años: antes de que se formaran los átomos de hidrógeno
 - Materia oscura: atracción gravitatoria
 - Fotones: presión de radiación sobre los bariones
 - Materia ordinaria: gravedad e interacción con fotones



Sólo fuerza de la Gravedad

Fondo de Radiación de Microondas

- $t < 380.000$ años: antes de que se formaran los átomos de hidrógeno
 - Materia oscura: atracción gravitatoria
 - Fotones: presión de radiación sobre los bariones
 - Materia ordinaria: gravedad e interacción con fotones

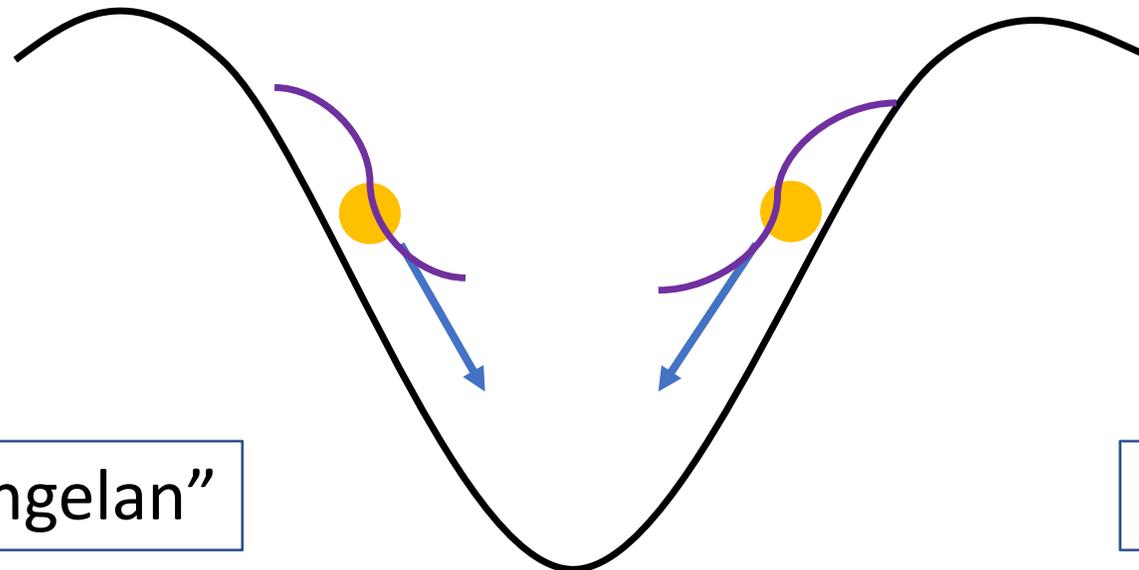


Ondas acústicas de densidad

Gravedad Vs Presión de radiación

Fondo de Radiación de Microondas

- $t < 380.000$ años: antes de que se formaran los átomos de hidrógeno
 - Materia oscura: atracción gravitatoria
 - Fotones: presión de radiación sobre los bariones
 - Materia ordinaria: gravedad e interacción con fotones
- Recombinación ($t = 380.000$ años): átomos de hidrógeno y fotones libres



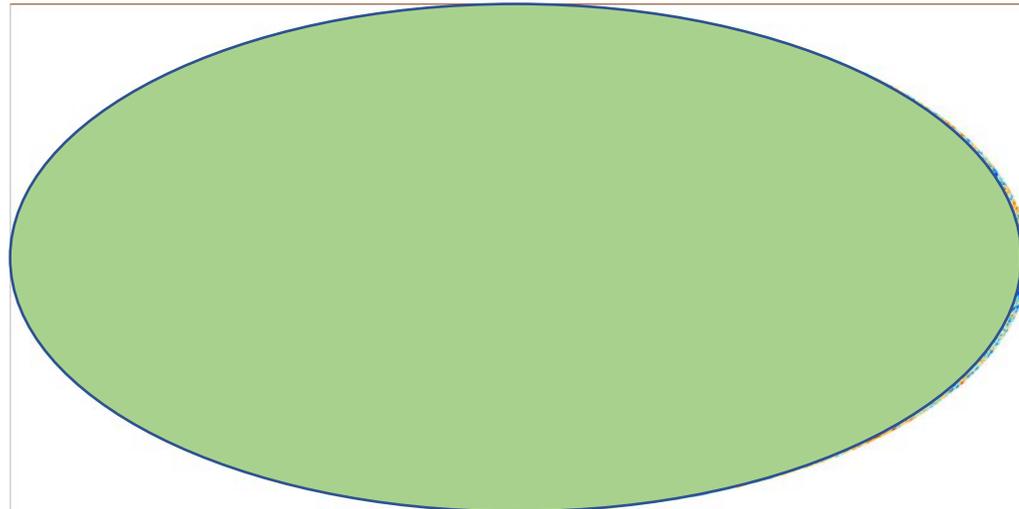
Las ondas se “congelan”

Sólo Gravedad

Fondo de Radiación de Microondas

- $t < 380.000$ años: antes de que se formaran los átomos de hidrógeno
- Recombinación ($t = 380.000$ años): átomos de hidrógeno y fotones libres
- FRM: Foto de la última interacción entre electrones y fotones

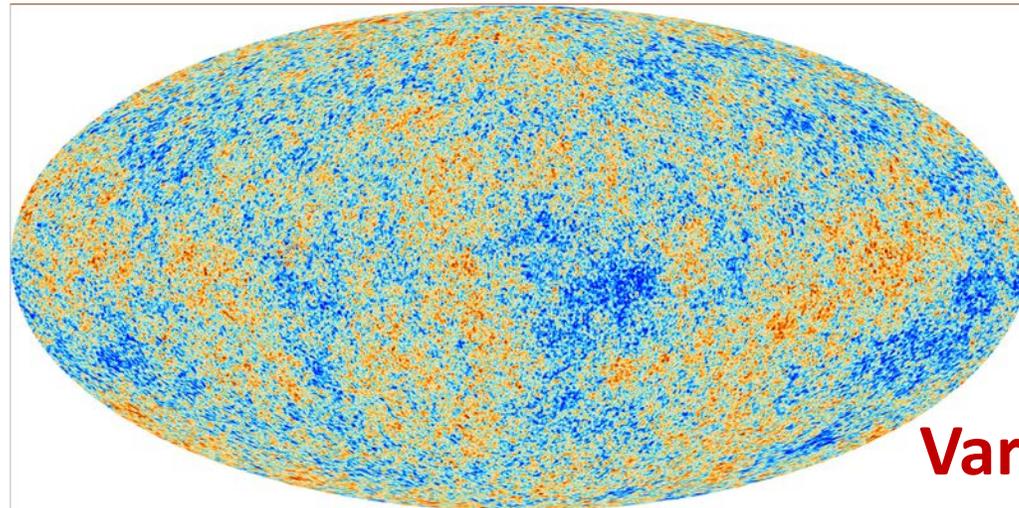
La luz más antigua que recibimos, enfriada a 2.7 K!



Fondo de Radiación de Microondas

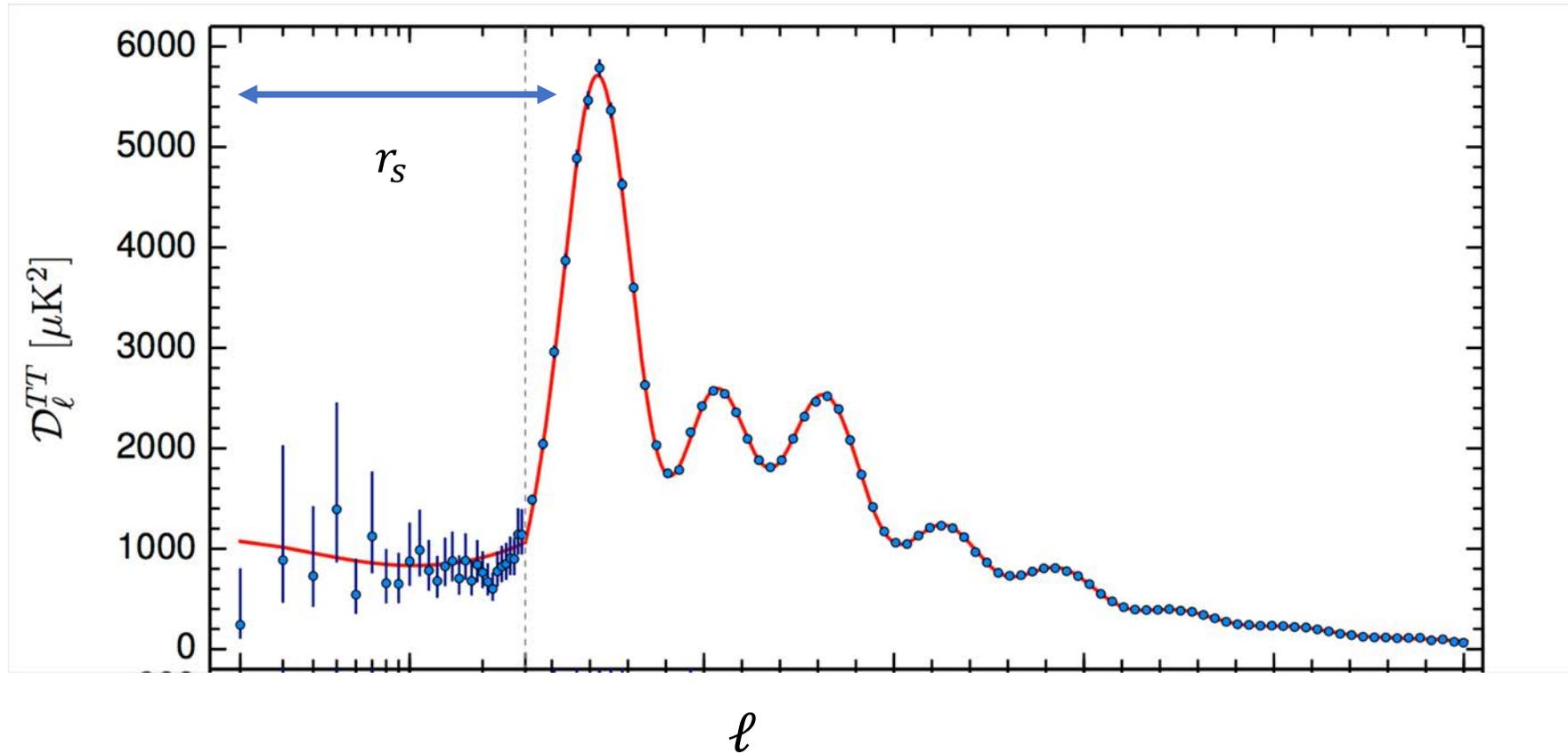
- $t < 380.000$ años: antes de que se formaran los átomos de hidrógeno
- Recombinación ($t = 380.000$ años): átomos de hidrógeno y fotones libres
- FRM: Foto de la última interacción entre electrones y fotones

La luz más antigua que recibimos, enfriada a 2.7 K!



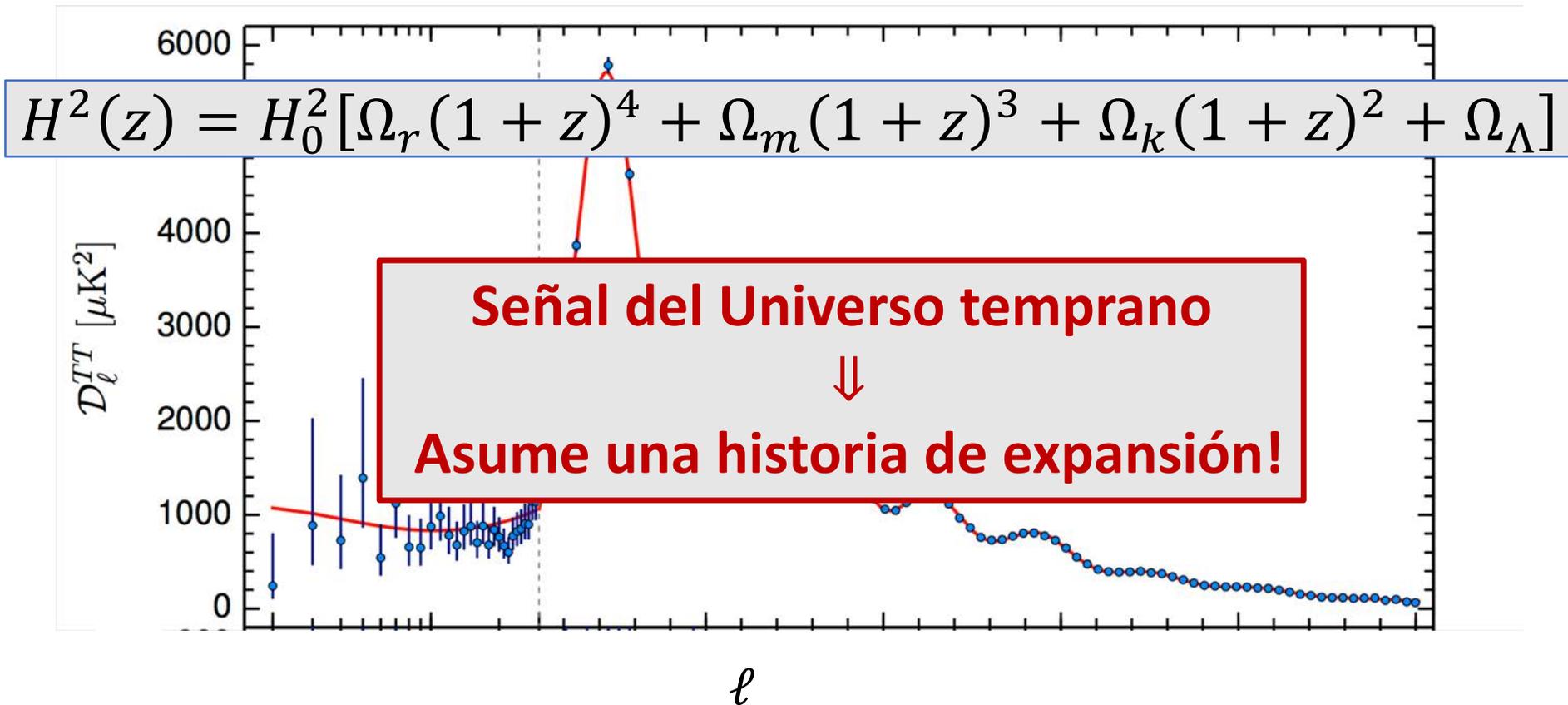
Variaciones de $\sim 10^{-5}$ K!!!

Fondo de Radiación de Microondas



Extremadamente sensible!!

Fondo de Radiación de Microondas

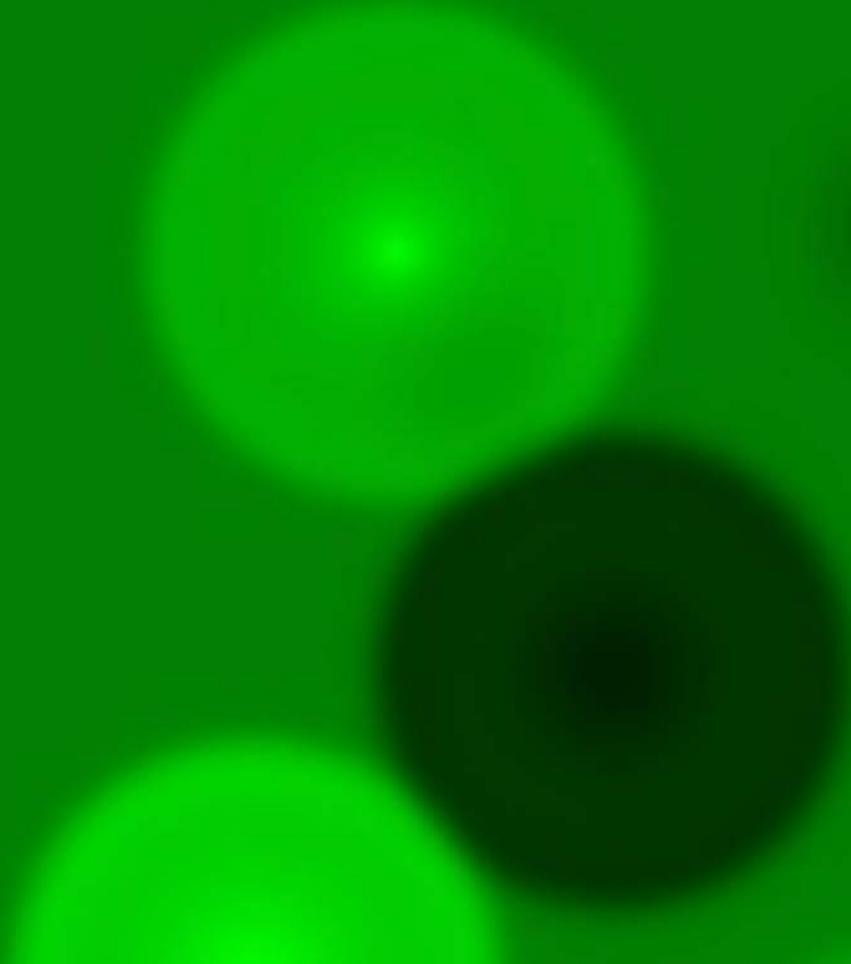


Extremadamente sensible!!

Evolución hasta distribución de galaxias



Evolución hasta distribución de galaxias

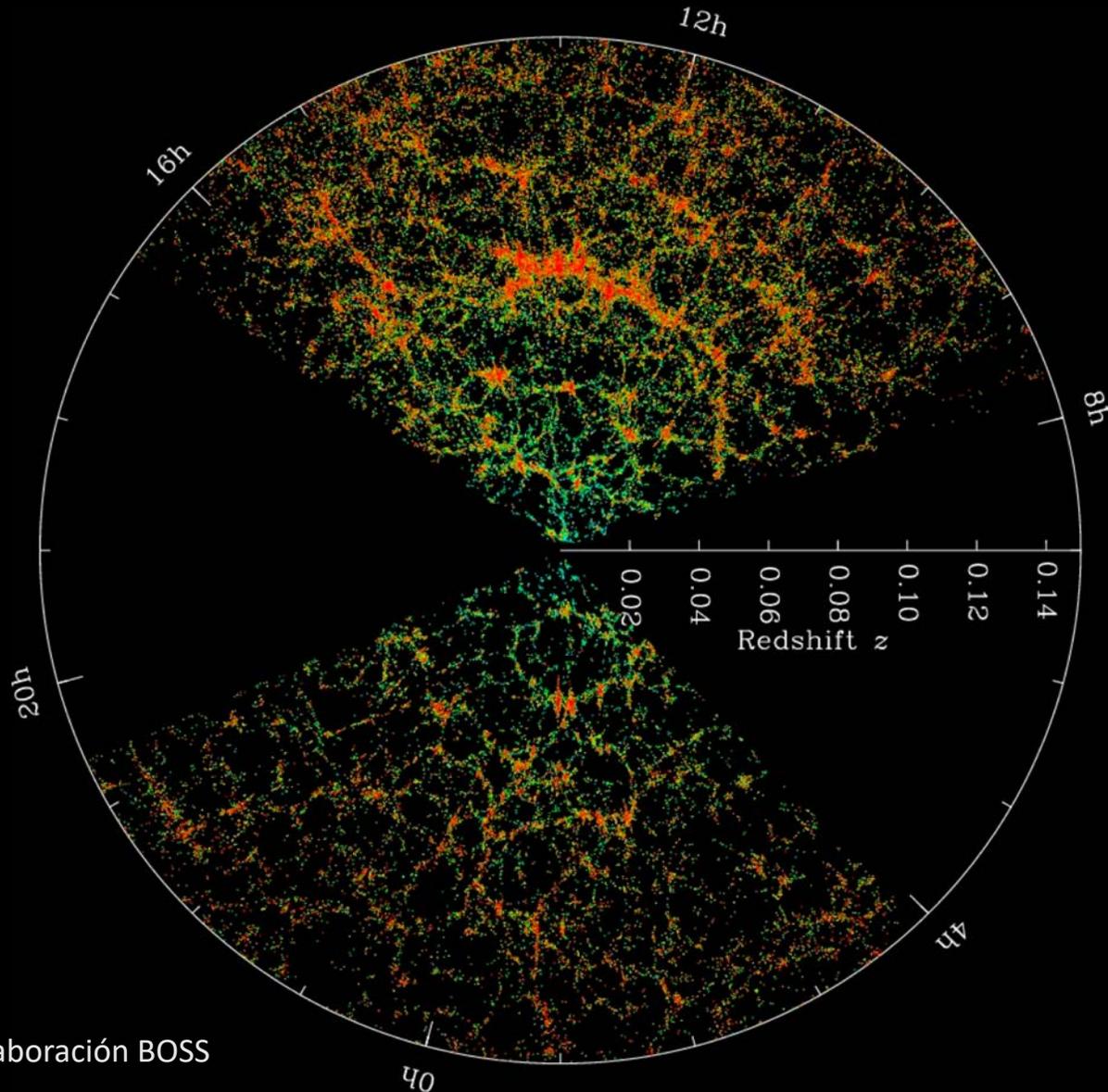


Evolución hasta distribución de galaxias

Evolución hasta distribución de galaxias

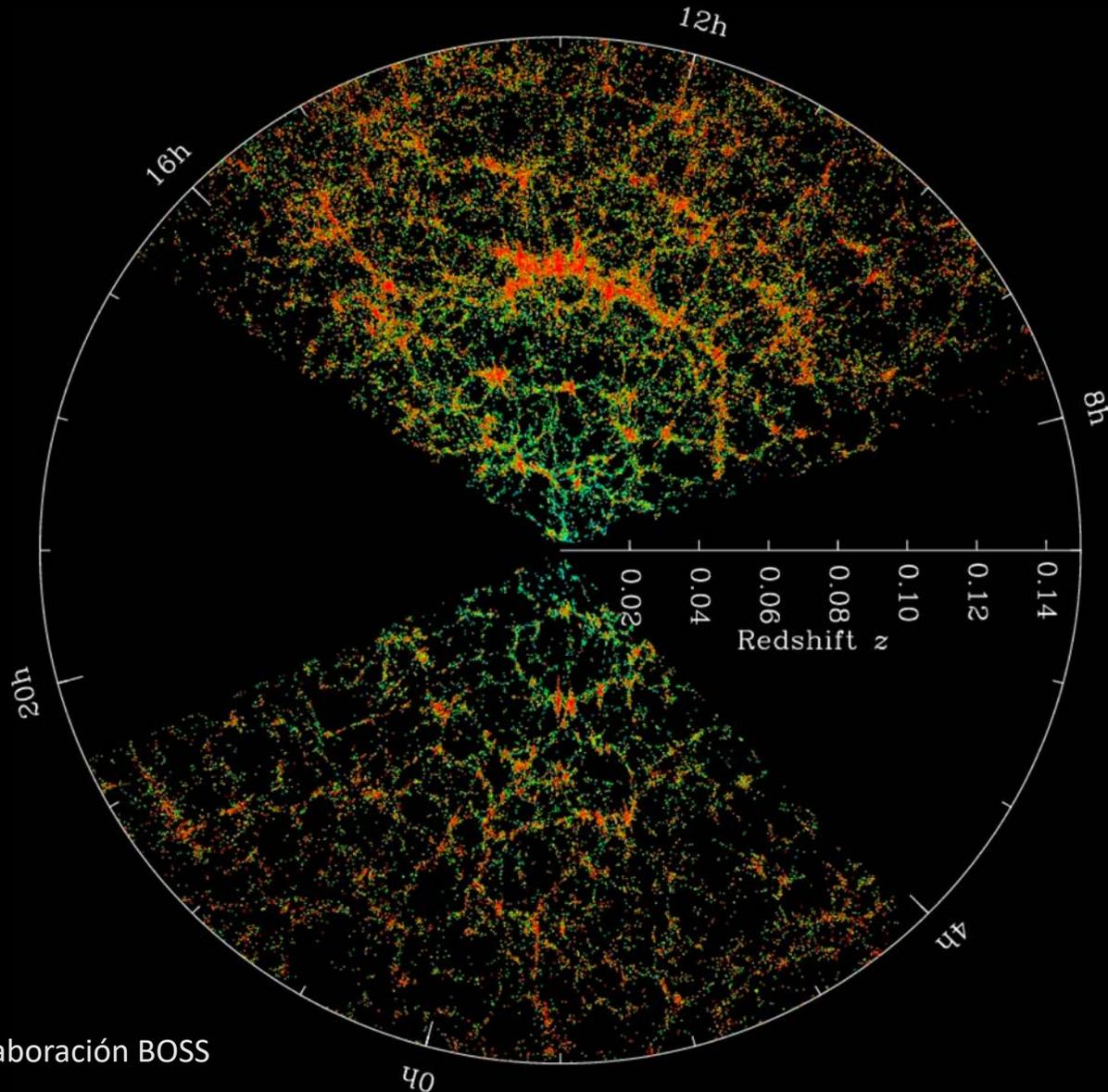
Evolución hasta distribución de galaxias

Evolución hasta distribución de galaxias

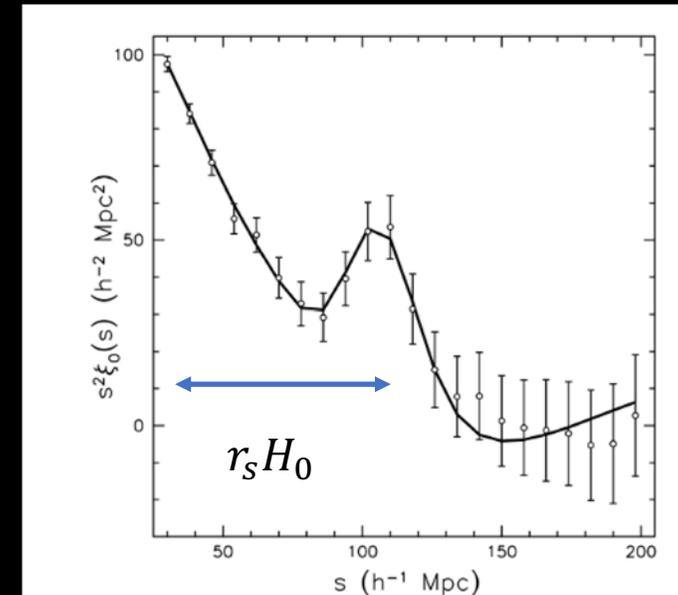


Escondida debajo de esta red cósmica se sigue encontrando una huella de las ondas acústicas de bariones del FRM

Evolución hasta distribución de galaxias



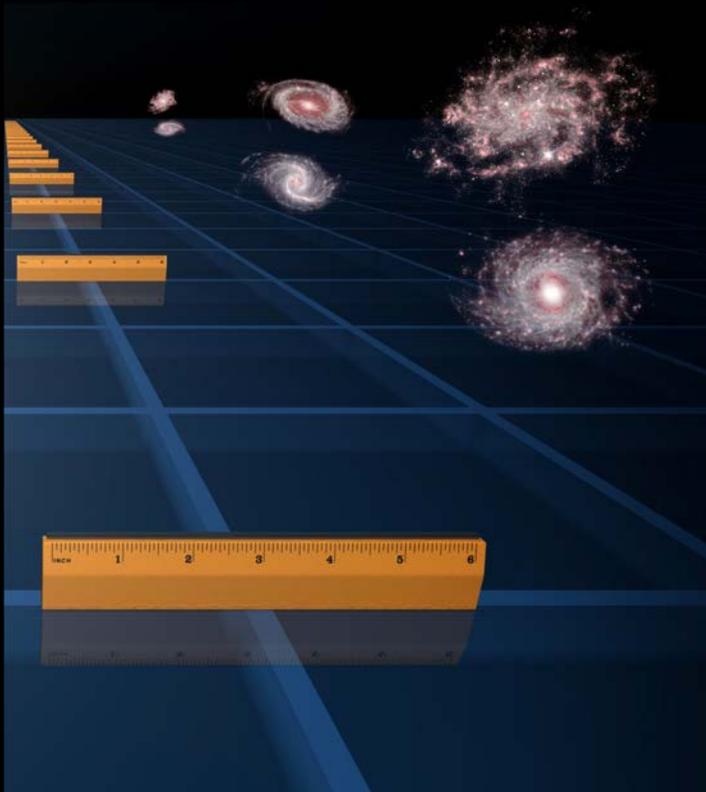
Escondida debajo de esta red cósmica se sigue encontrando una huella de las ondas acústicas de bariones del FRM



Anderson et al 2014

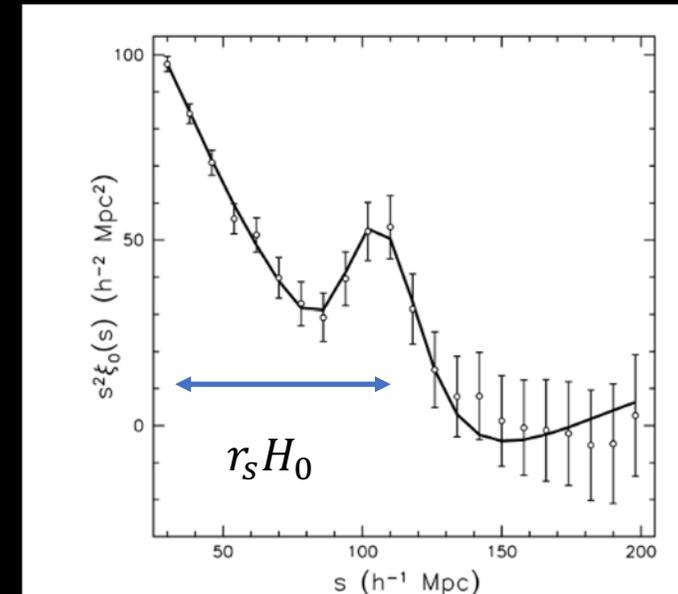
Universo estático o dinámico?

Reglas estándar: Estimar la distancia a un intervalo de redshift a partir de una escala espacial conocida.



Oscilaciones acústicas de bariones:

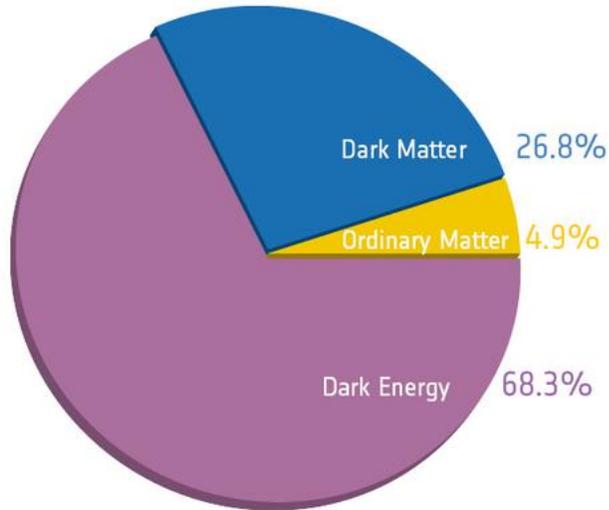
Un pico visible en la correlación entre galaxias marca la regla estándar



Anderson et al 2014

Modelo Estándar de Cosmología: Λ CDM

- Sólo 6 parámetros libres en el modelo



Colaboración Planck

Relatividad General

Principio cosmológico

Geometría Plana

Materia oscura fría

Constante cosmológica

- Reproduce sorprendentemente bien todas las observaciones menos...

La constante de Hubble

Velocidad de expansión: H_0

H_0 es la velocidad de expansión del Universo local a una distancia d .



$H(z)$ describe la historia de expansión del Universo.



$$d(z) = \int_0^z \frac{cdz'}{H(z')} \implies \text{La distancia es la integral de } H(z) !!$$

Universo local

Medida directa de H_0

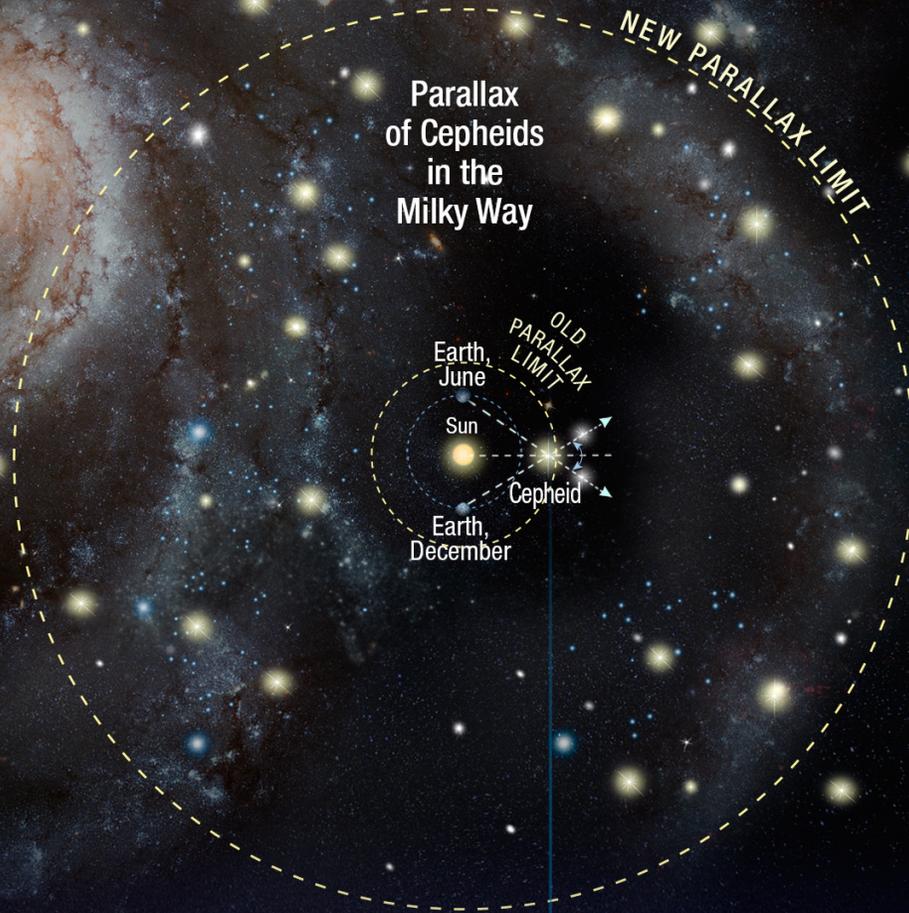
Indepen. del modelo cosmológico

Universo más lejano

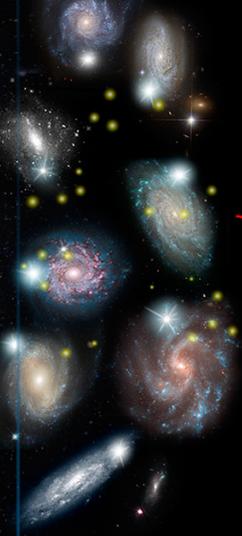
Medida directa de $H(z)$

H_0 asumiendo una historia de expansión

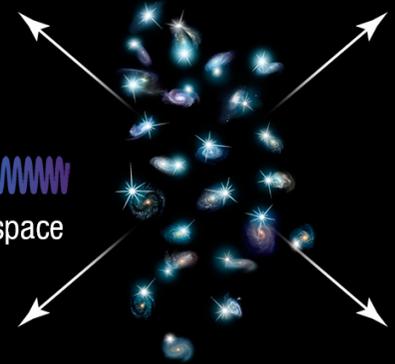
3 pasos para medir la constante de Hubble



Galaxies hosting Cepheids and Type Ia supernovae



Distant galaxies in the expanding universe hosting Type Ia supernovae

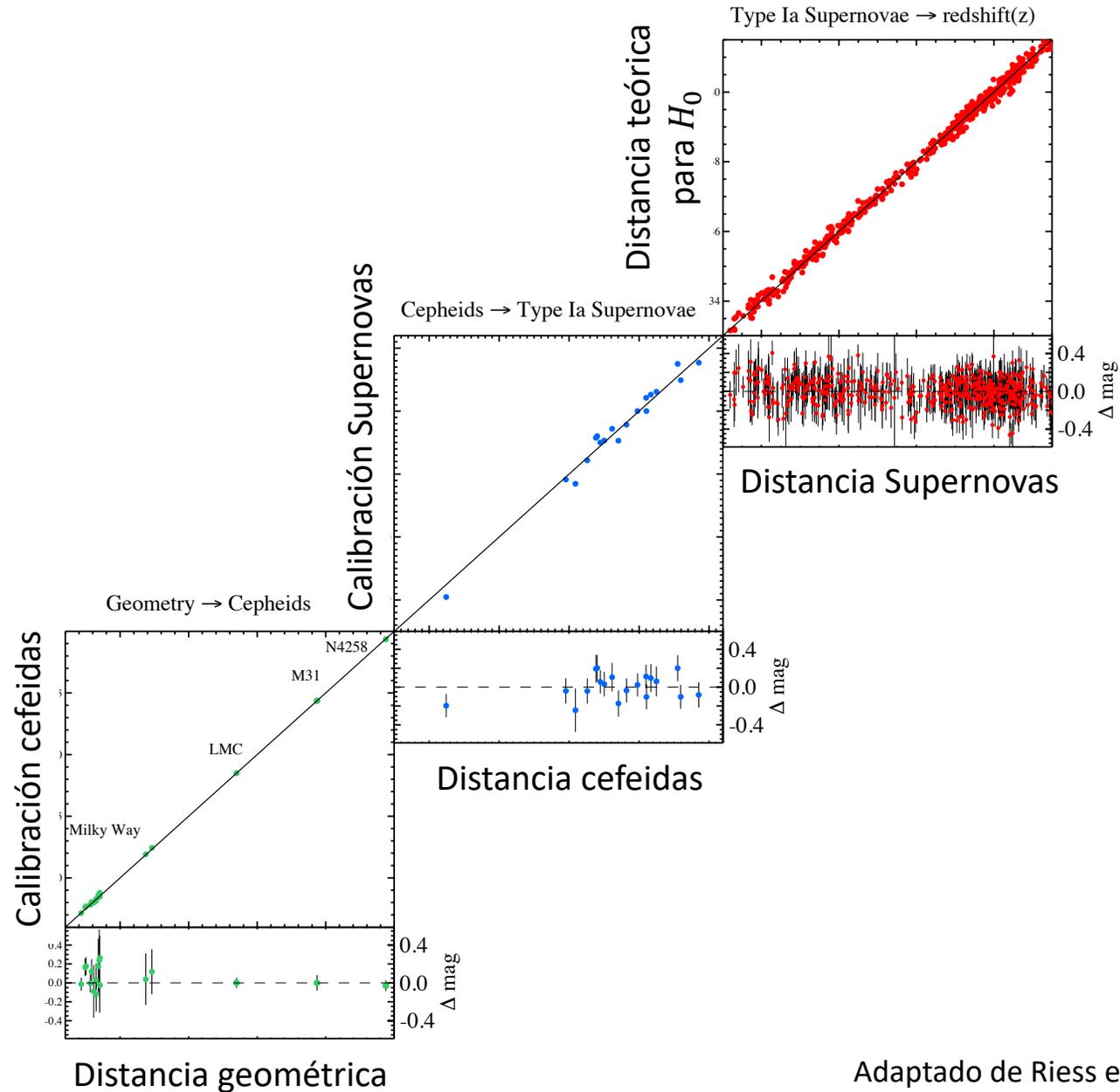


Light redshifted (stretched) by expansion of space

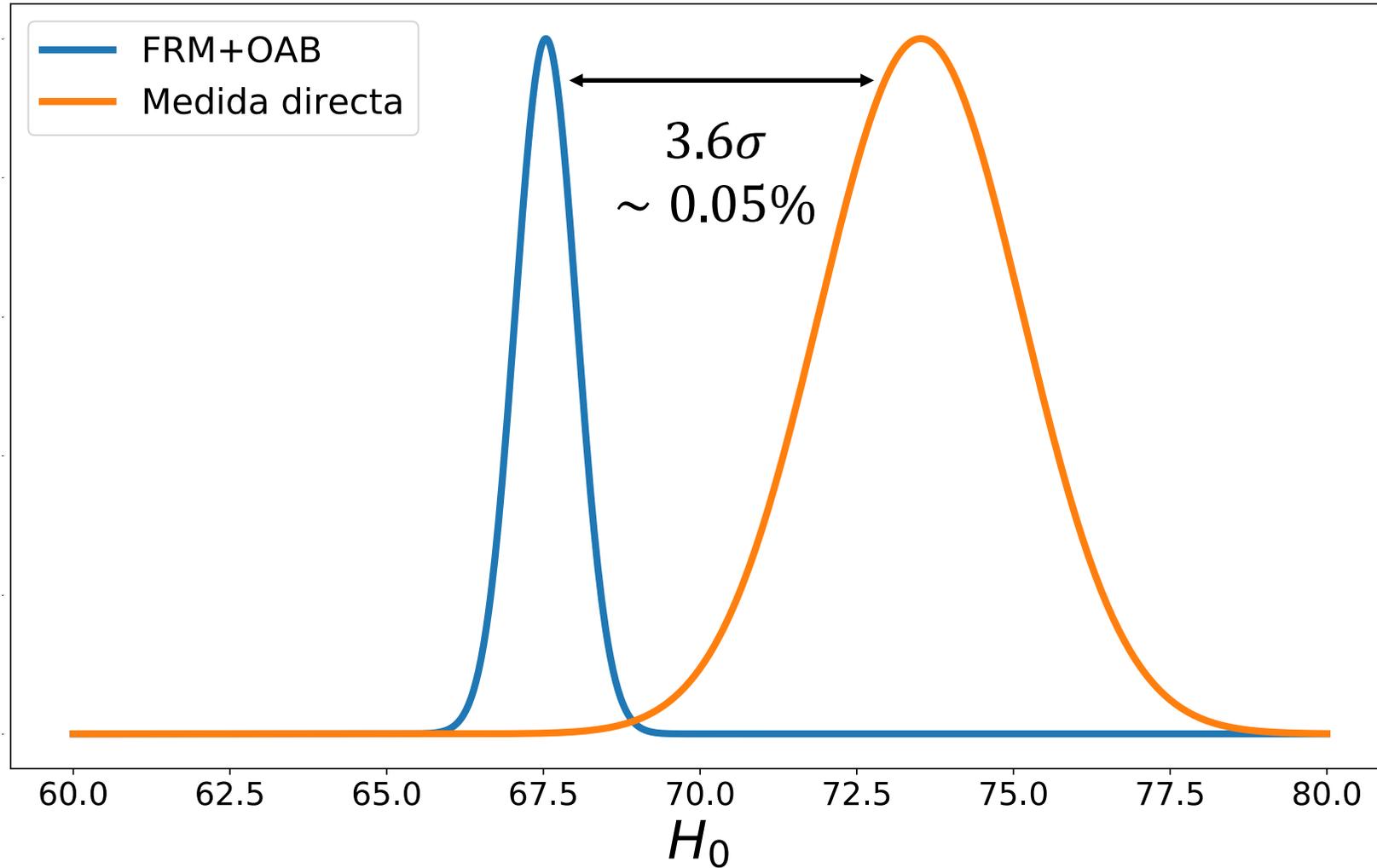
The diagram shows a wave of light with a long wavelength (red) on the left and a shorter wavelength (blue) on the right, illustrating the stretching of light as it travels through an expanding universe.



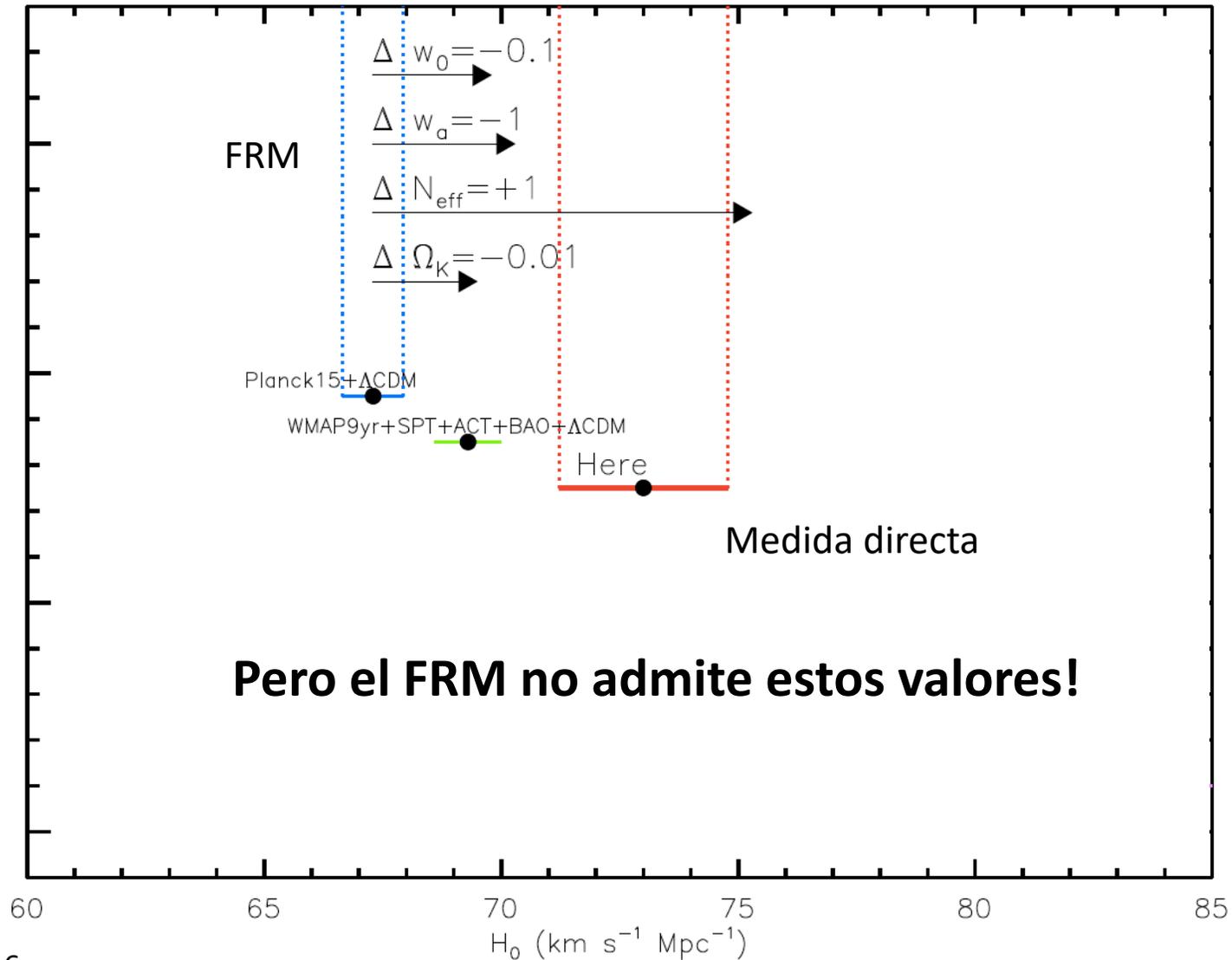
Velocidad de expansión: H_0



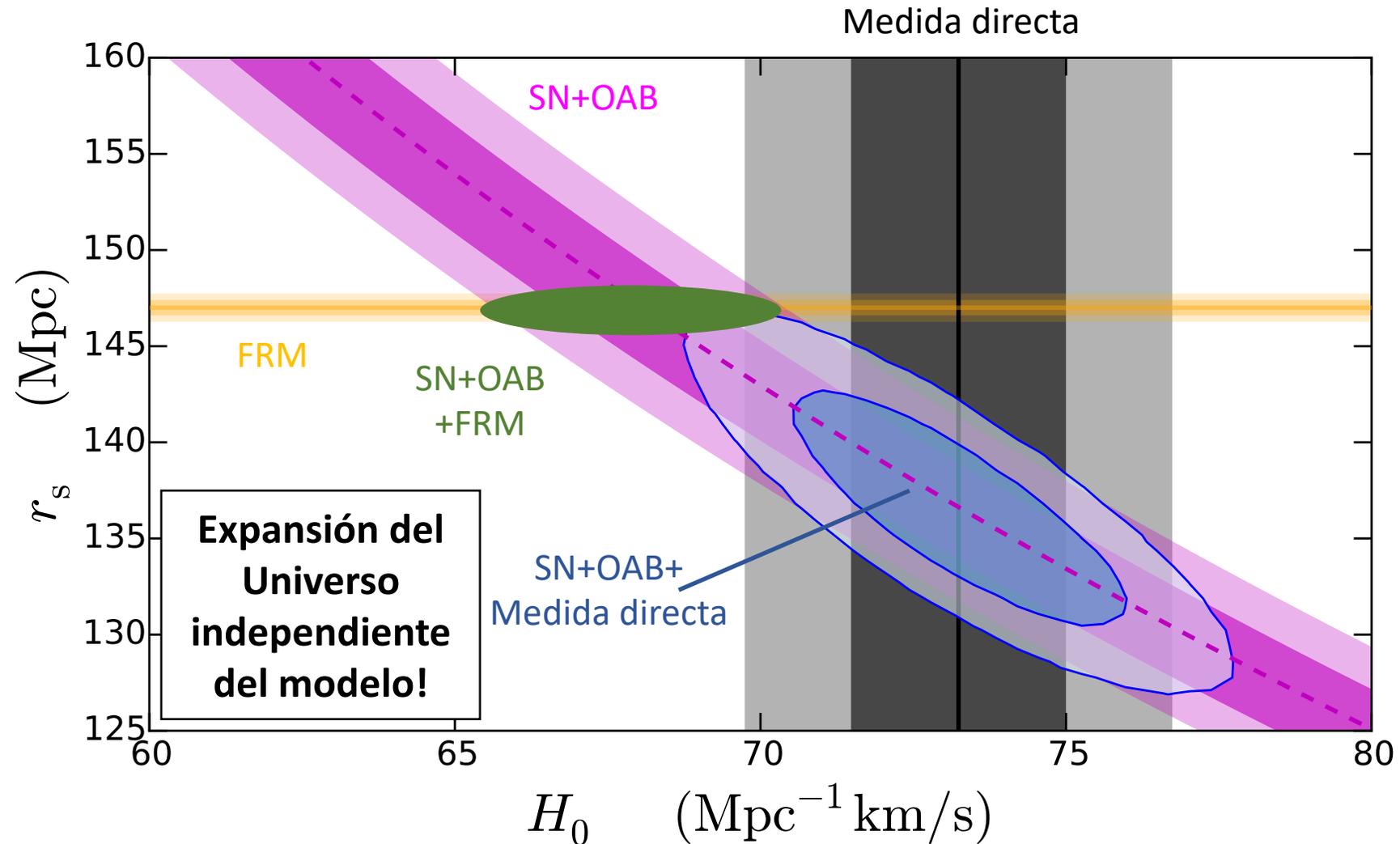
La Tensión en la Constante de Hubble



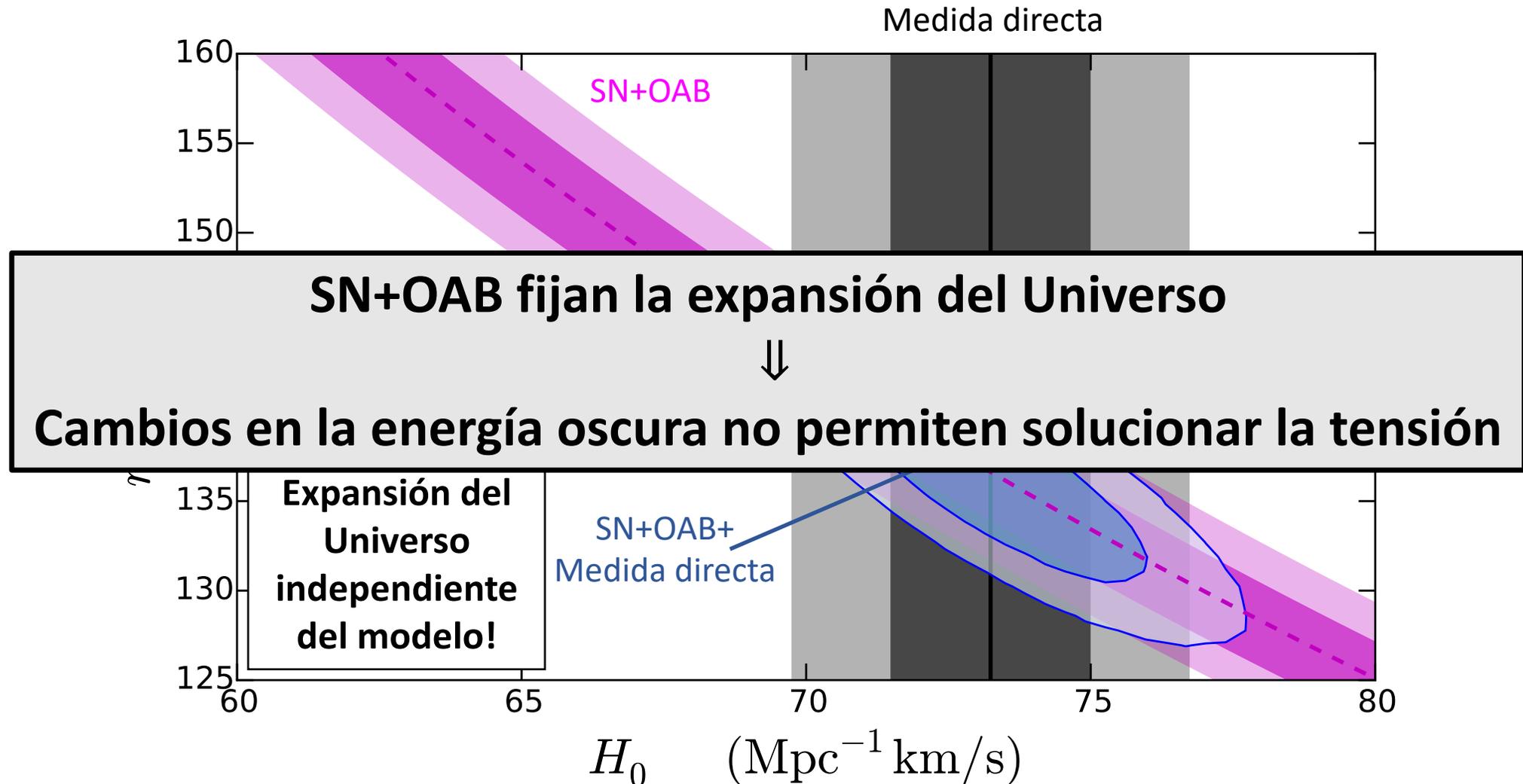
La Tensión en la Constante de Hubble



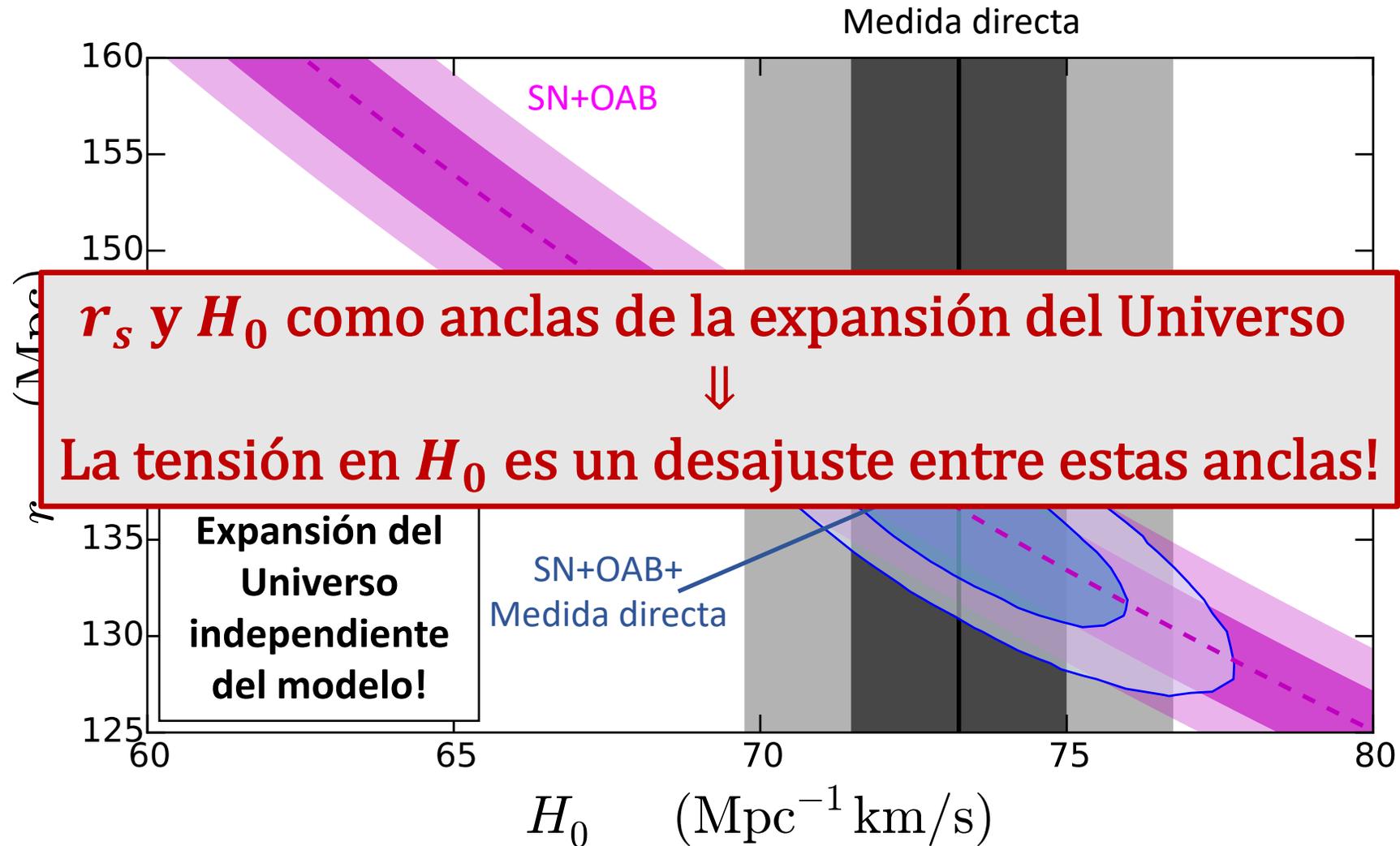
La Tensión en la Constante de Hubble



La Tensión en la Constante de Hubble



La Tensión en la Constante de Hubble



¿Cómo romper la tensión?

¿Cómo romper la tensión?

Ondas gravitacionales

Con la frecuencia y la amplitud de la onda recibida, se puede medir la distancia.

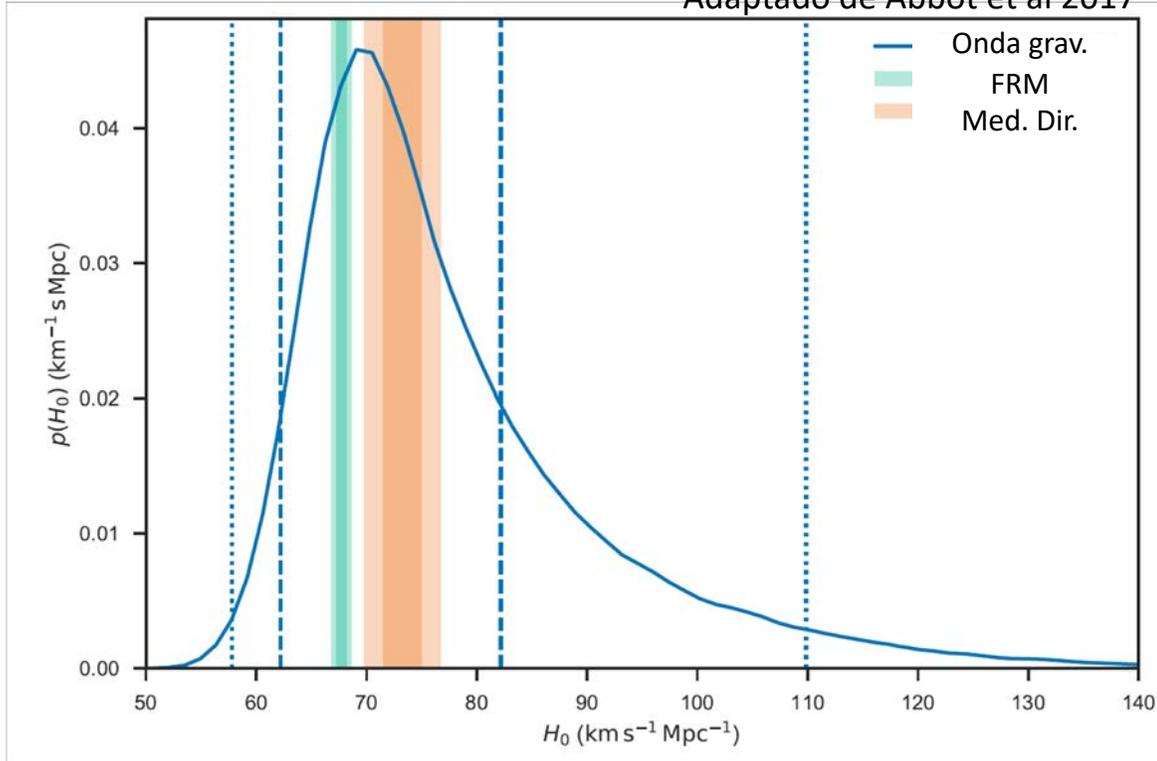
Si hay contraparte electromagnética



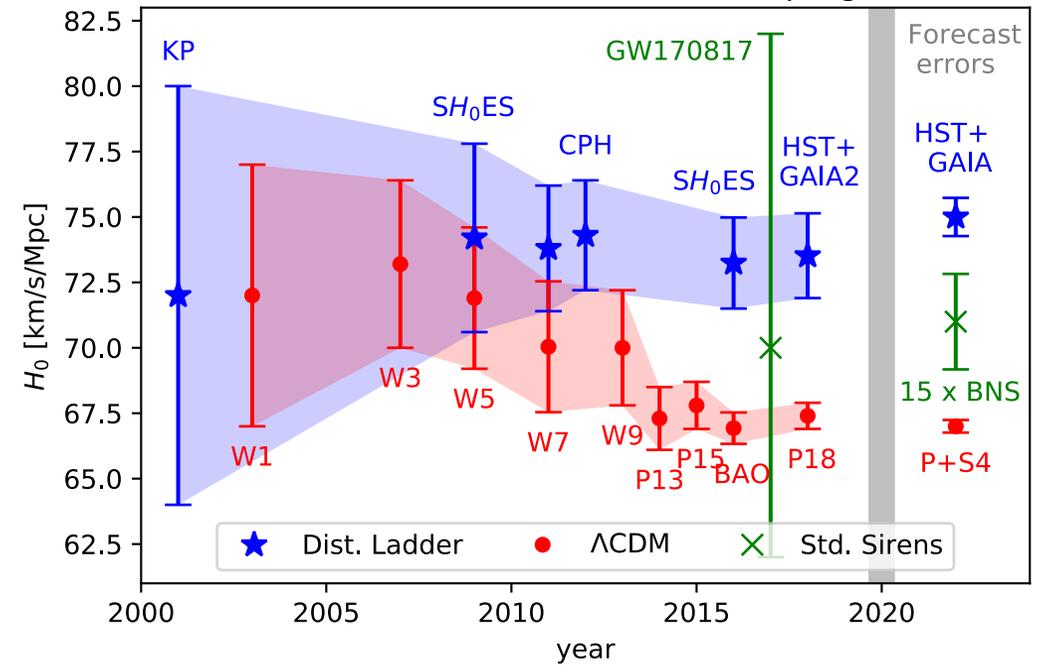
Sirena estándar!

¿Cómo romper la tensión?

Adaptado de Abbot et al 2017



Ezquiaga et al 2018



Sirenas estándar

Prueba muy potente en el futuro para H_0

Conclusiones

- El modelo cosmológico estándar es robusto y muy efectivo, pero aún existe una gran discrepancia en la constante de Hubble.
- Distintos métodos para medir distancias.
- Tensión en la constante de Hubble \Leftrightarrow Desajuste entre anclas de la expansión.
- Cosmología exótica? Nueva astrofísica?