

Análisis de la evidencia observacional de energía oscura

Hugo A. Villalba V.

Director: PhD. Juan C. Sanabria.

Universidad de los Andes
Bogotá D.C.

“El aumento del conocimiento depende por completo de la existencia del desacuerdo.”

—Karl Popper

Índice

I. Introducción

- ▶ Motivación

II. Energía oscura en la cosmología moderna

- ▶ Fundamentos de Relatividad General y Cosmología

III. Cien años de controversias y tensiones

- ▶ Breve recuento históricos sobre la energía oscura en la cosmología de los siglos 20 y 21

IV. En busca de la energía oscura: evidencia observacional

- ▶ Análisis de la evidencia primaria y secundaria

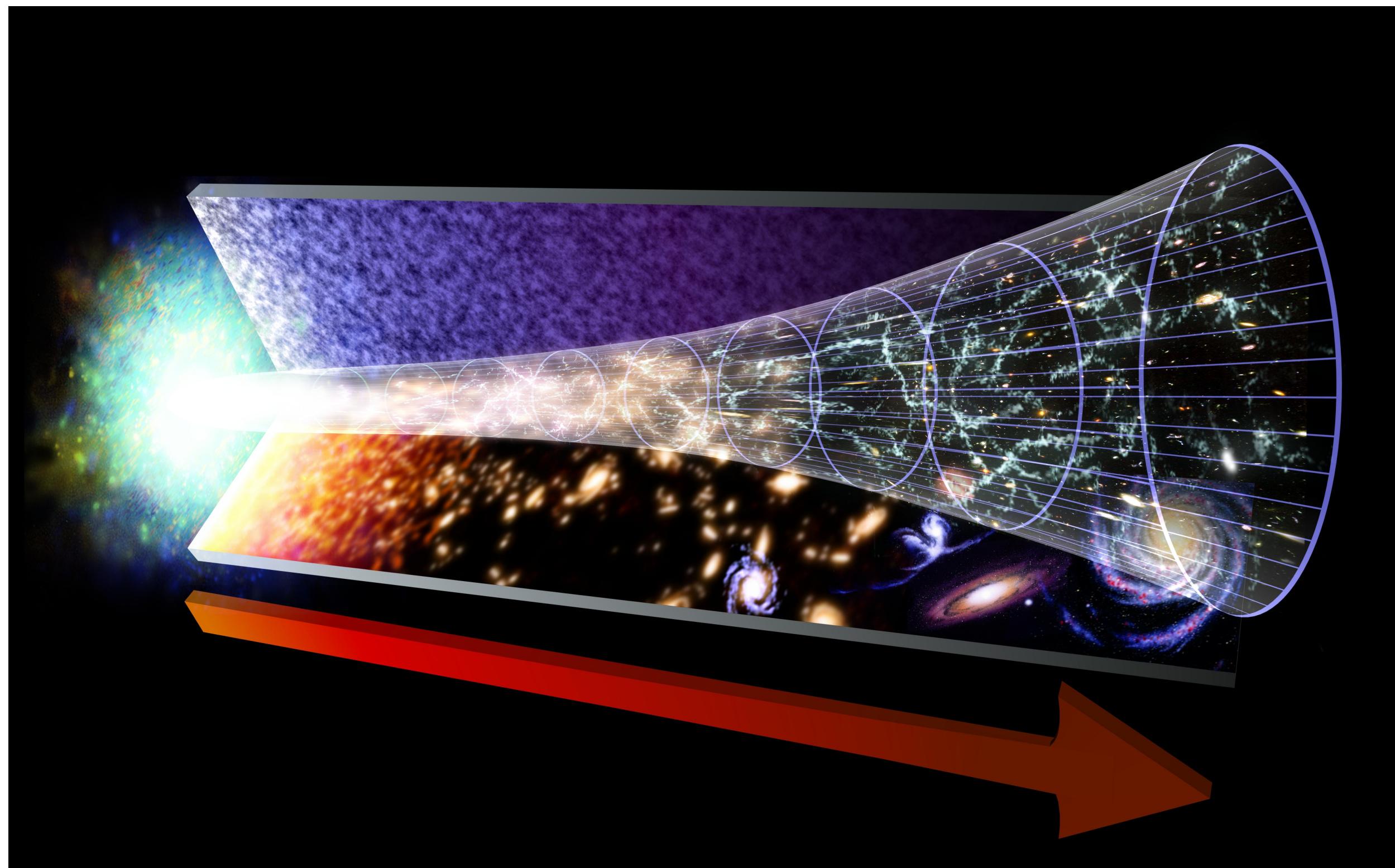
V. Sobre controversias y tensiones

- ▶ Presentación de la Controversia sobre SN Ia y la Tensión de Hubble

VI. Conclusiones y perspectivas

¿Energía oscura?

Forma de energía de vacío a cuyas propiedades gravitacionales repulsivas se le atribuye la expansión acelerada del universo.



Tomado de NASA/GSFC

¿Por qué estudiar la energía oscura?

- ◆ Determina el destino del universo
- ◆ Representa (o eso creemos) el 70% de la energía del universo
- ◆ Conocemos poco o nada de sus efectos y estructura microscópica

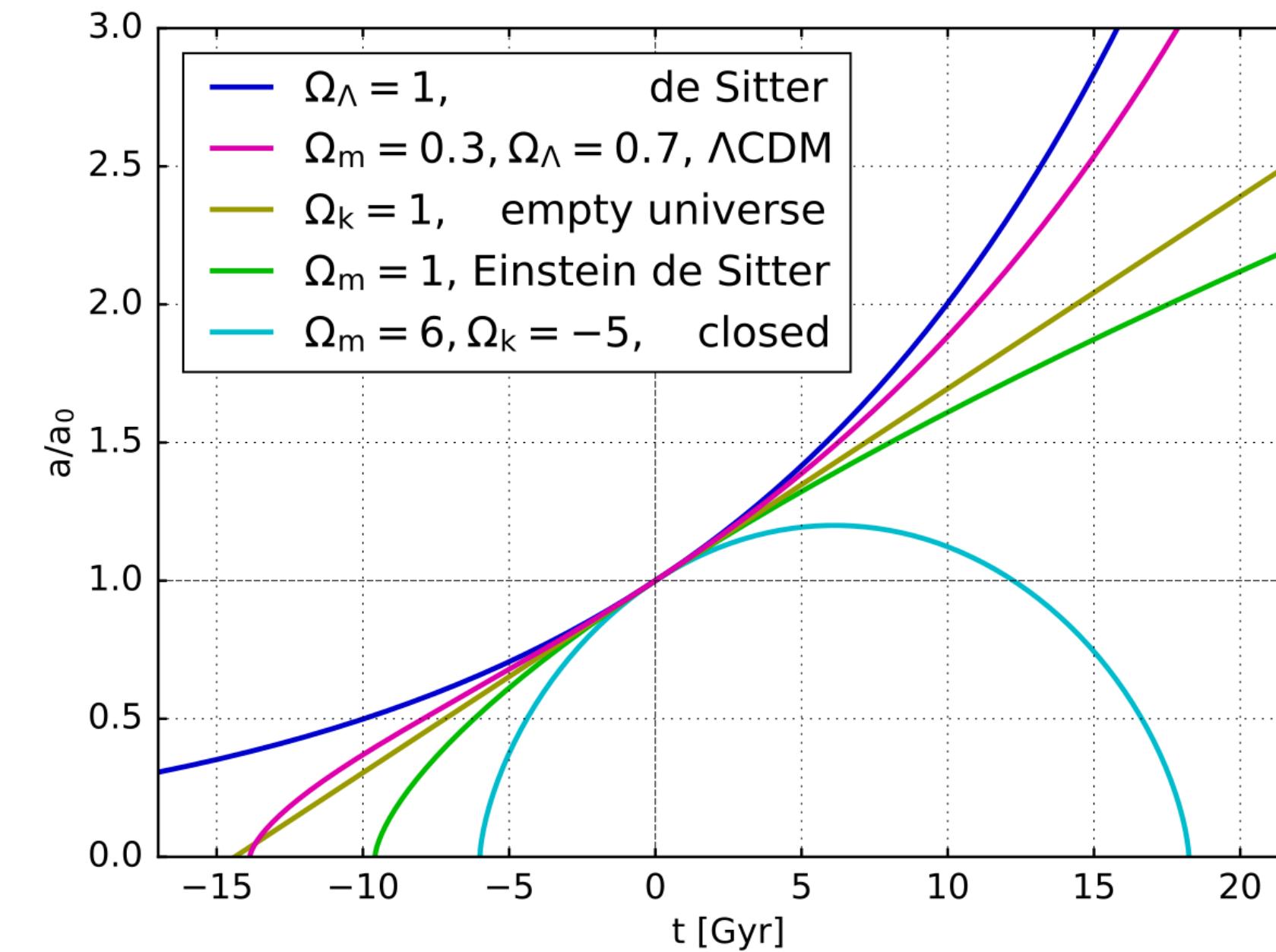
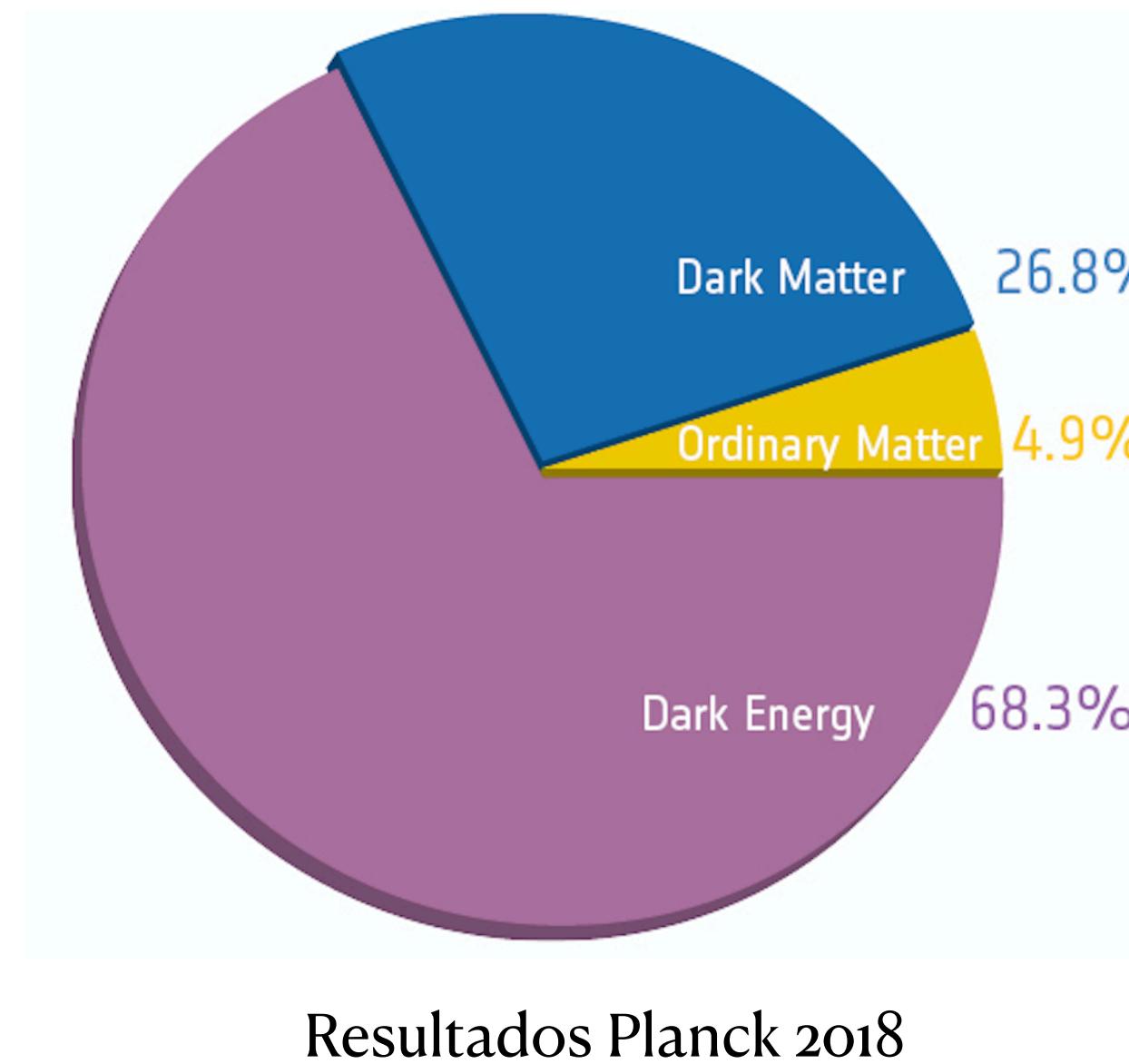


Imagen de dominio público

Energía oscura en la cosmología moderna

Conceptos básicos

- 1. Cosmología:** estudio del universo a gran escala y como un todo.
- 2. Ingredientes de un modelo cosmológico.**
 - 2.1. Geometría del Espacio-Tiempo.
 - 2.2. Energía presente en el universo y sus interacciones.
 - 2.3. Interacción geometría-energía.
- 3. Modelo Estándar de la Cosmología Moderna: Λ CDM**
 - 3.1. Principio cosmológico
 - 3.2. Materia ordinaria + CDM + Constante Cosmológica Λ
 - 3.3. Relatividad general

Energía oscura en la cosmología moderna

Modelo ΛCDM : Fundamentos

Principio Cosmológico y Métrica Robertson-Walker (RW)

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - \kappa r^2} + r^2 d\Omega^2 \right]; \quad d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2$$

Ecuaciones de campo de Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Fluido Perfecto

$$T^{\mu\nu} = (\rho + p)U^\mu U^\nu + pg^{\mu\nu}$$

$$p = w\rho$$

Energía oscura en la cosmología moderna

Modelo ΛCDM : Algunos Resultados

Ecuaciones de Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{\kappa}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

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

Evolución del factor de escala

$$\rho_i = \rho_{0i}a^{-3(1+w_i)}$$

$$a \propto t^{2/3(1+w)}$$

Componente	w_i
Materia (M)	0
Radiación (R)	$\frac{1}{3}$
Vacío (Λ)	-1
Curvatura (C)	$-\frac{1}{3}$

Energía de vacío

$$\rho_{vacio} = \frac{\Lambda}{8\pi G}$$

$$P_{vacio} = -\rho_{vacio}$$

$$a = a_0 e^{Ht}$$

$$H = \frac{\dot{a}}{a} = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}}$$

En busca de la energía oscura: Evidencia observacional

Medición de parámetros: $w_{DE} - \Omega_{DE}$

I. Evidencia Primaria

I.I. Supernovas de tipo Ia (SN Ia)

I.II. Radiación Cósmica de Fondo (CMB)

I.III. Oscilaciones Acústicas de Bariones (BAO)

II. Evidencia Secundaria

II.I. Lentes gravitacionales

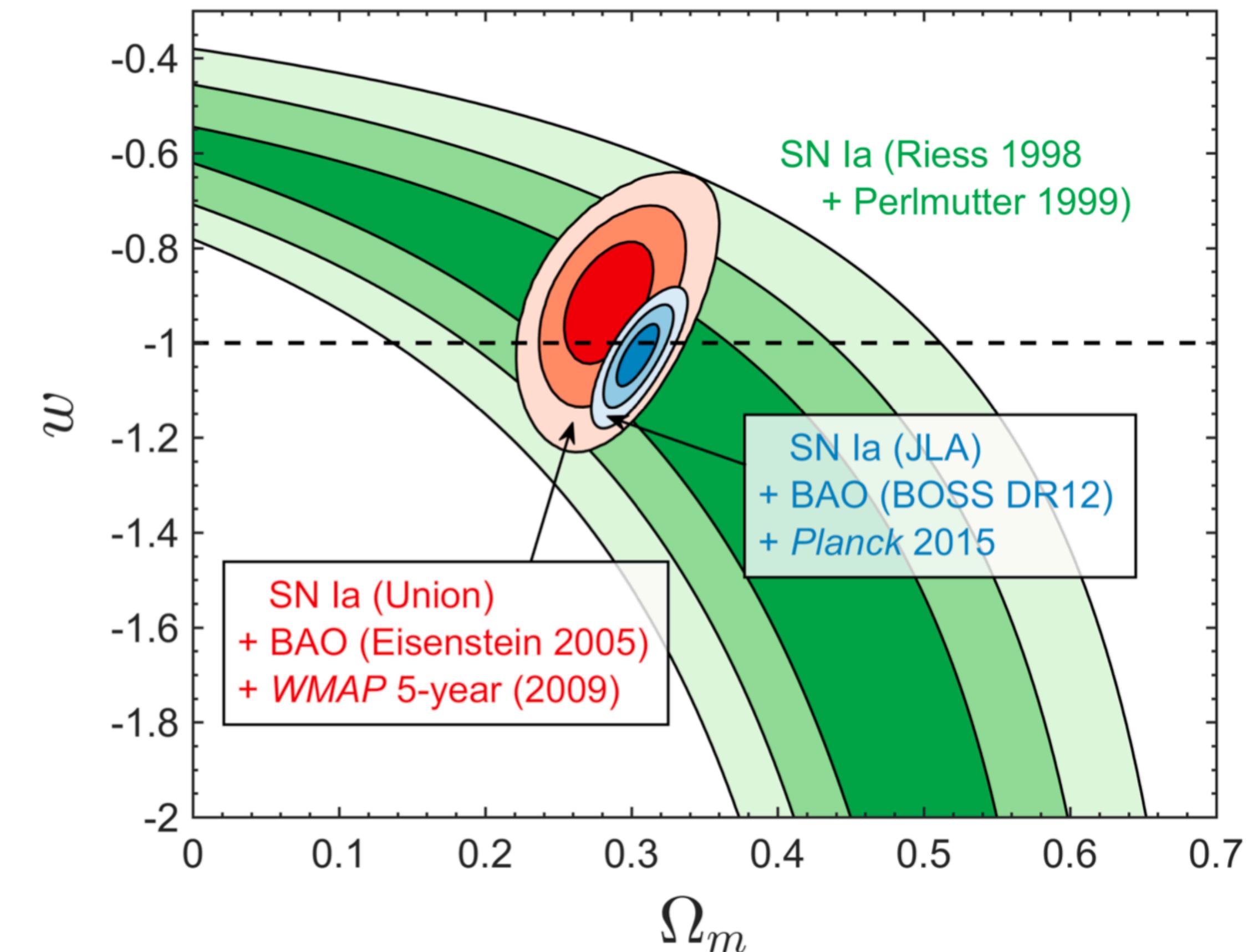
II.II. Gamma-ray Burst

II.III. Sirenas estándar

III. Otras pruebas

III.I. Problema de la edad del universo

III.II. Medición directa de H_0

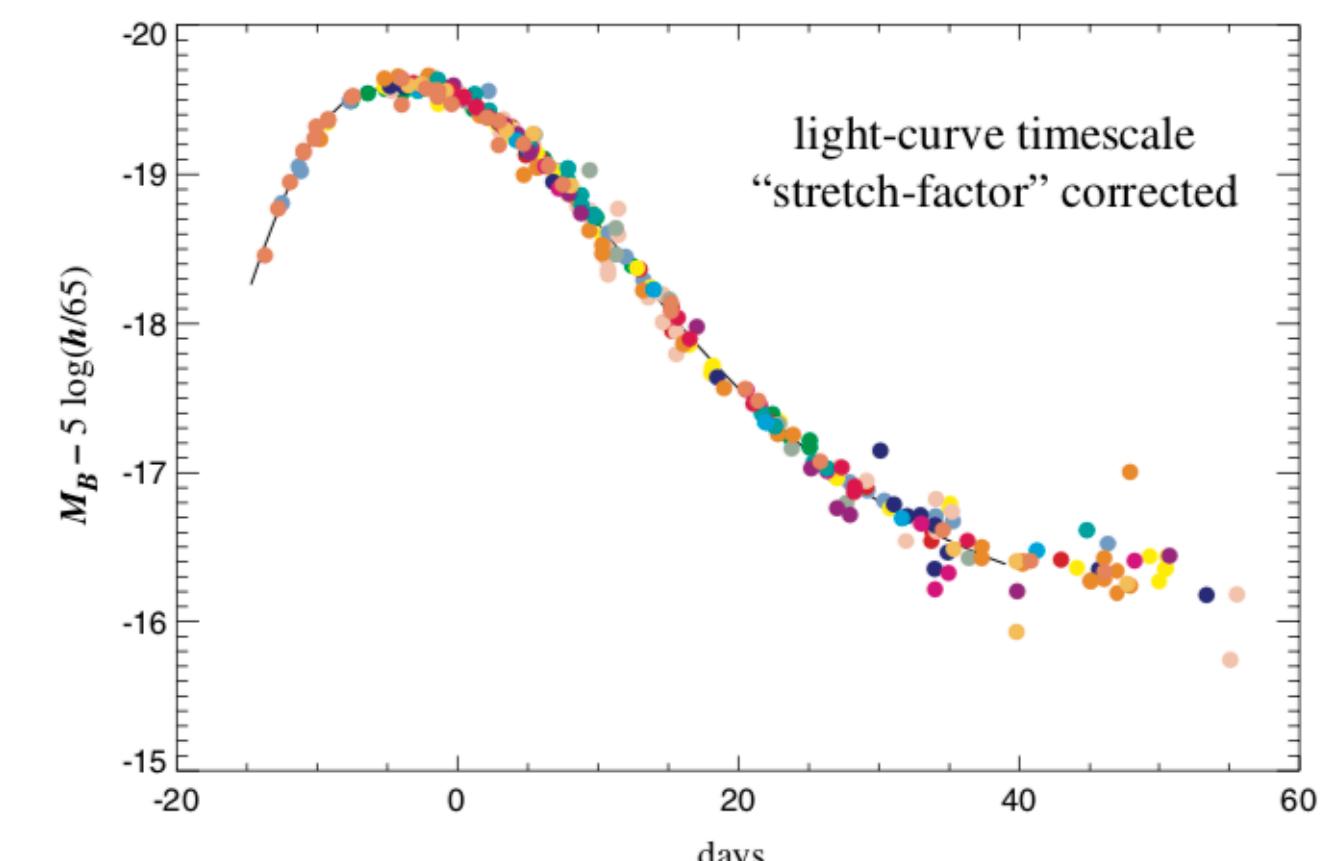
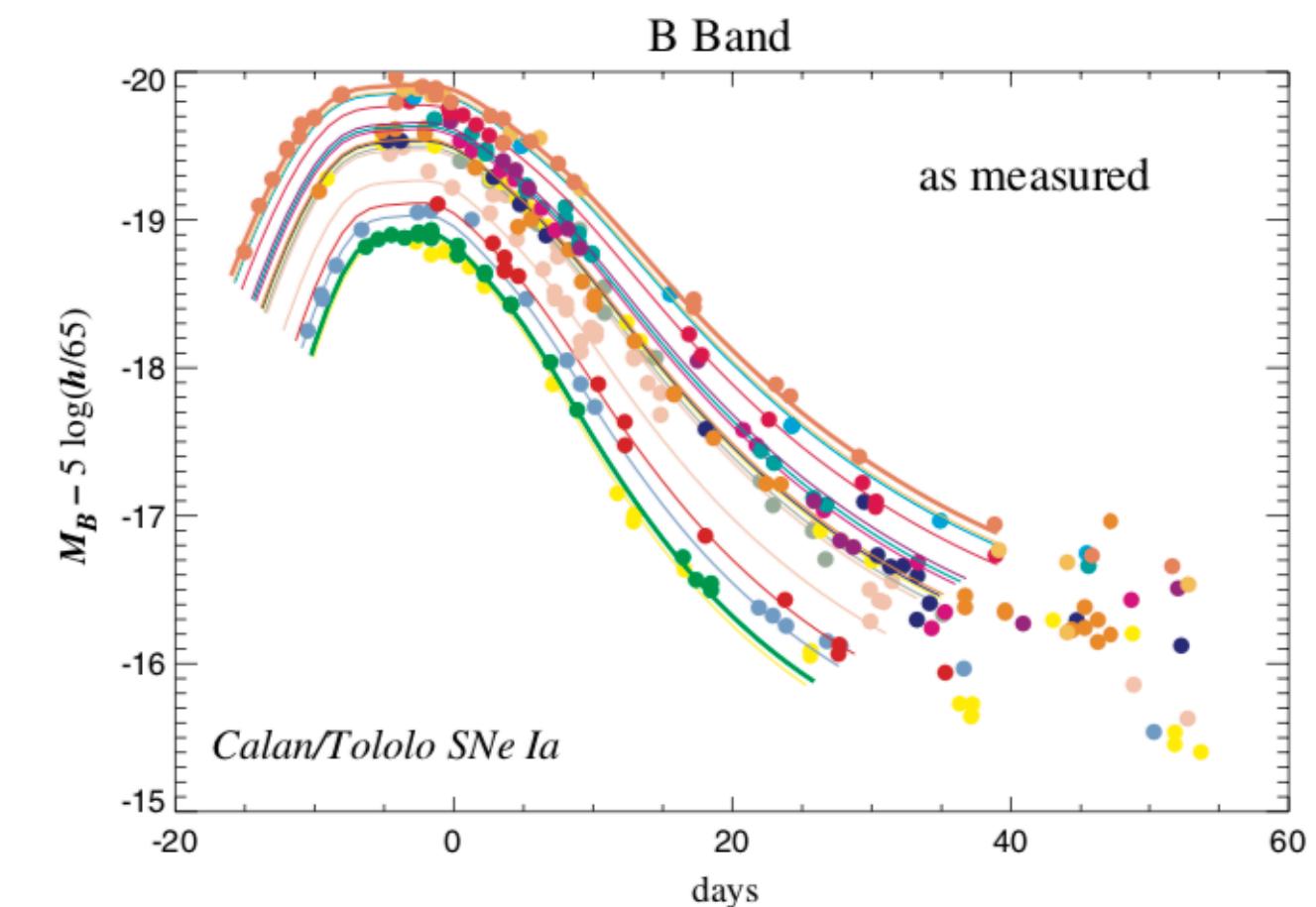


Tomado de Huterer & Shafer (2017)

En busca de la energía oscura: Evidencia observacional

Evidencia 1: Supernovas de tipo Ia (SN Ia)

- ◆ Velas estándar (estandarizables)
 - ▶ Explosión termonuclear de enana blanca C-O
 - ▶ Límite de Chandrasekhar: $M_0 \approx 1.44M_{sol}$
 - ▶ Luminosidad: $M \approx -19$
- ◆ Proceso de estandarización
 - ▶ Relación entre pico de luminosidad y tasa de desvanecimiento
 - ▶ Correcciones de color (enrojecimiento)
 - ▶ ¿Evolución de la luminosidad?



Kim, et al. (1997)

Tomado de Kim (1997).

En busca de la energía oscura: Evidencia observacional

Evidencia 1: Supernovas de tipo Ia (SN Ia)

◆ Diagrama de Hubble

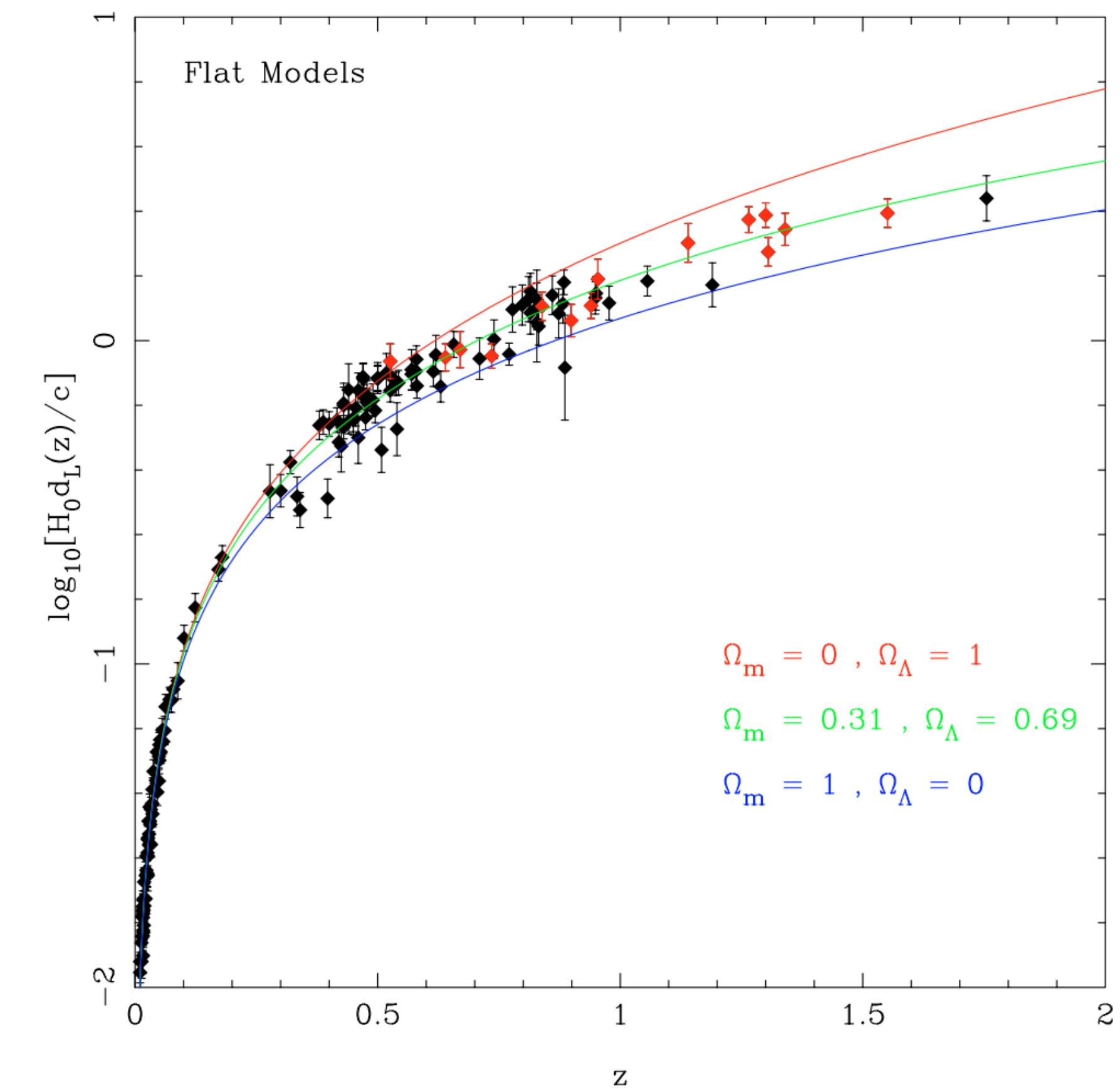
- Módulo de distancia: $\mu \equiv m - M = 5 \log_{10} \left(\frac{d_L}{10pc} \right)$
- Corrimiento al rojo (z): espectro electromagnético

◆ Distancia de luminosidad y parámetros cosmológicos

$$d_L = \frac{(1+z)}{H_0 \sqrt{|\Omega_{c0}|}} S_k \left(\sqrt{|\Omega_{c0}|} \int_0^z \frac{dz'}{E(z')} \right); \quad E(z) \equiv \frac{H(z)}{H_0} = \left[\sum_{i(c)} \Omega_{i0} (1+z)^{3(1+w_i)} \right]^{1/2}$$

◆ Primera evidencia:

- 1998-1999: Supernova Cosmology Project (SCP) y High-Z Supernova Search Team (HZT)
- Muestra: 42 SN Ia en $0.2 < z < 0.8$
- Resultados: $\Omega_m = 0.28^{+0.09}_{-0.08}$ (68%)
-

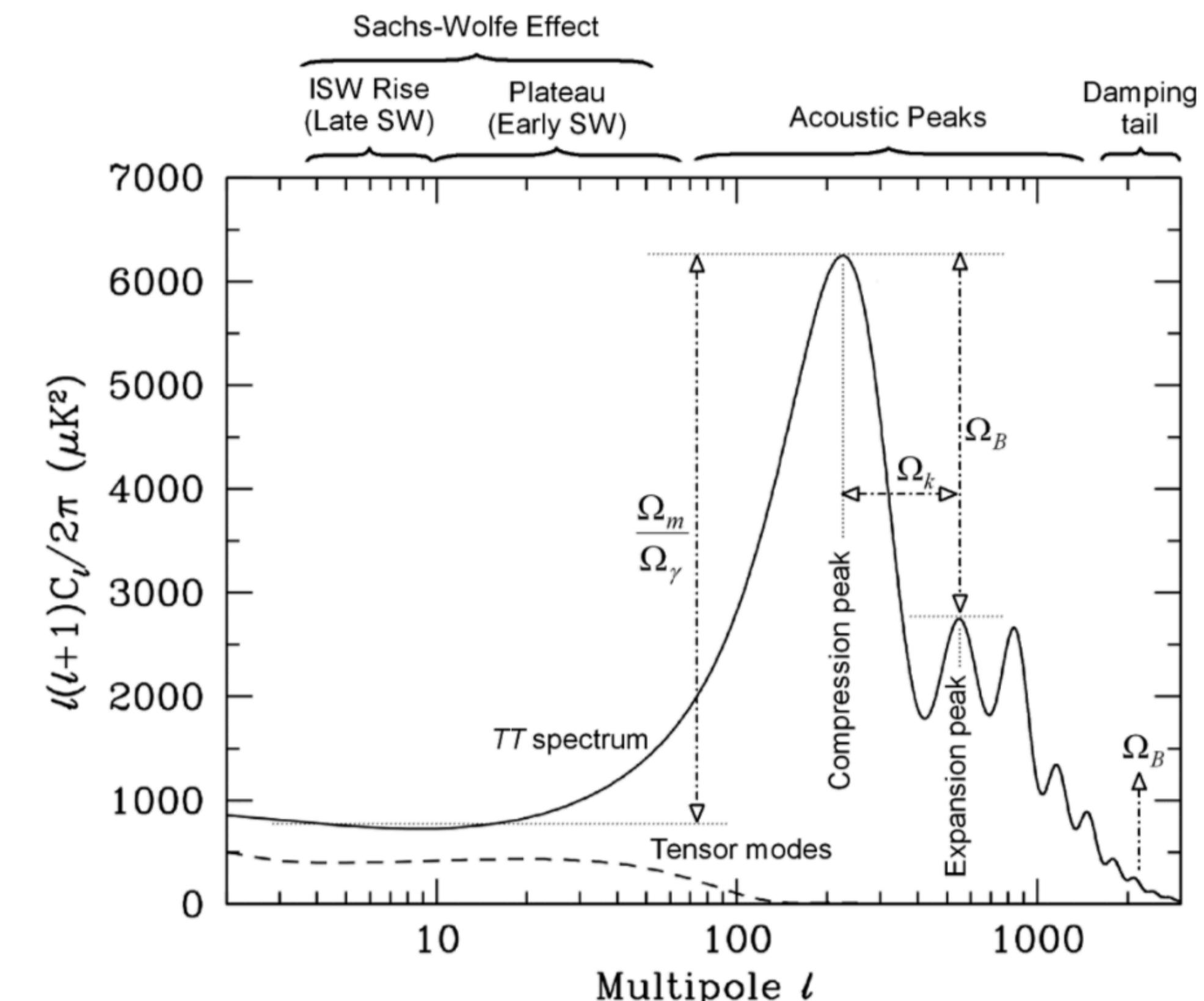


Tomado de Choudhury & Padmanabhan (2005).

En busca de la energía oscura: Evidencia observacional

Evidencia 2: Radiación Cósmica de Fondo (CMB)

- ◆ Radiación remanente del universo temprano
 - ▶ Recombinación: formación de átomos (380 mil años después del Big Bang)
 - ▶ Desacoplamiento de fotones: CMB
- ◆ Espectro de potencia de CMB:
 - ▶ Energía oscura afecta a las anisotropías
 - ▶ Cambio de posición de picos acústicos
 - ▶ Estimar parámetros cosmológicos: posición y amplitud de picos acústicos



Tomado de Jones (2017)

En busca de la energía oscura: Evidencia observacional

Evidencia 2: Radiación Cósmica de Fondo (CMB)

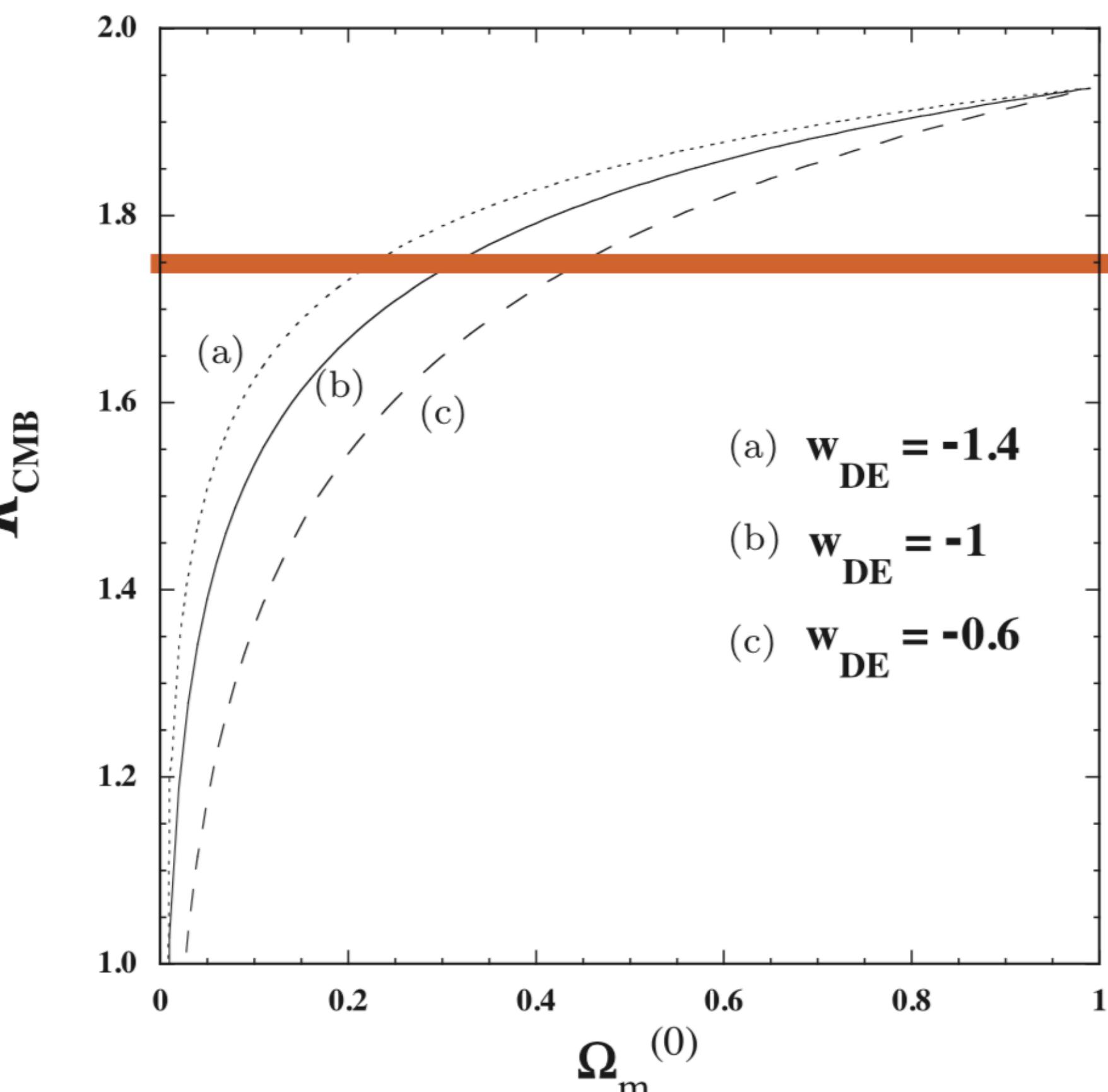
- ◆ Posición de los picos acústicos: oscilaciones en el gas barión-fotón.

$$\theta_A \equiv \frac{r_s(z_*)}{d_A^{(c)}(z_*)} ; \quad r_s(z) = \frac{1}{1+z} \int_{1+z}^{\infty} \frac{c_s(z')}{H(z')} dz' ; \quad \theta_A = \pi/\ell_A$$

- ◆ El multipolo ℓ_A depende del factor de corrimiento de CMB:

$$R_{CMB} \equiv \sqrt{\frac{\Omega_m}{\Omega_k}} \sinh \left(\sqrt{\Omega_k} \int_0^{z_*} \frac{dz'}{E(z')} \right)$$

- ◆ R_{CMB} depende del parámetro de la ecuación de estado w_{DE} → Degeneración de parámetros.

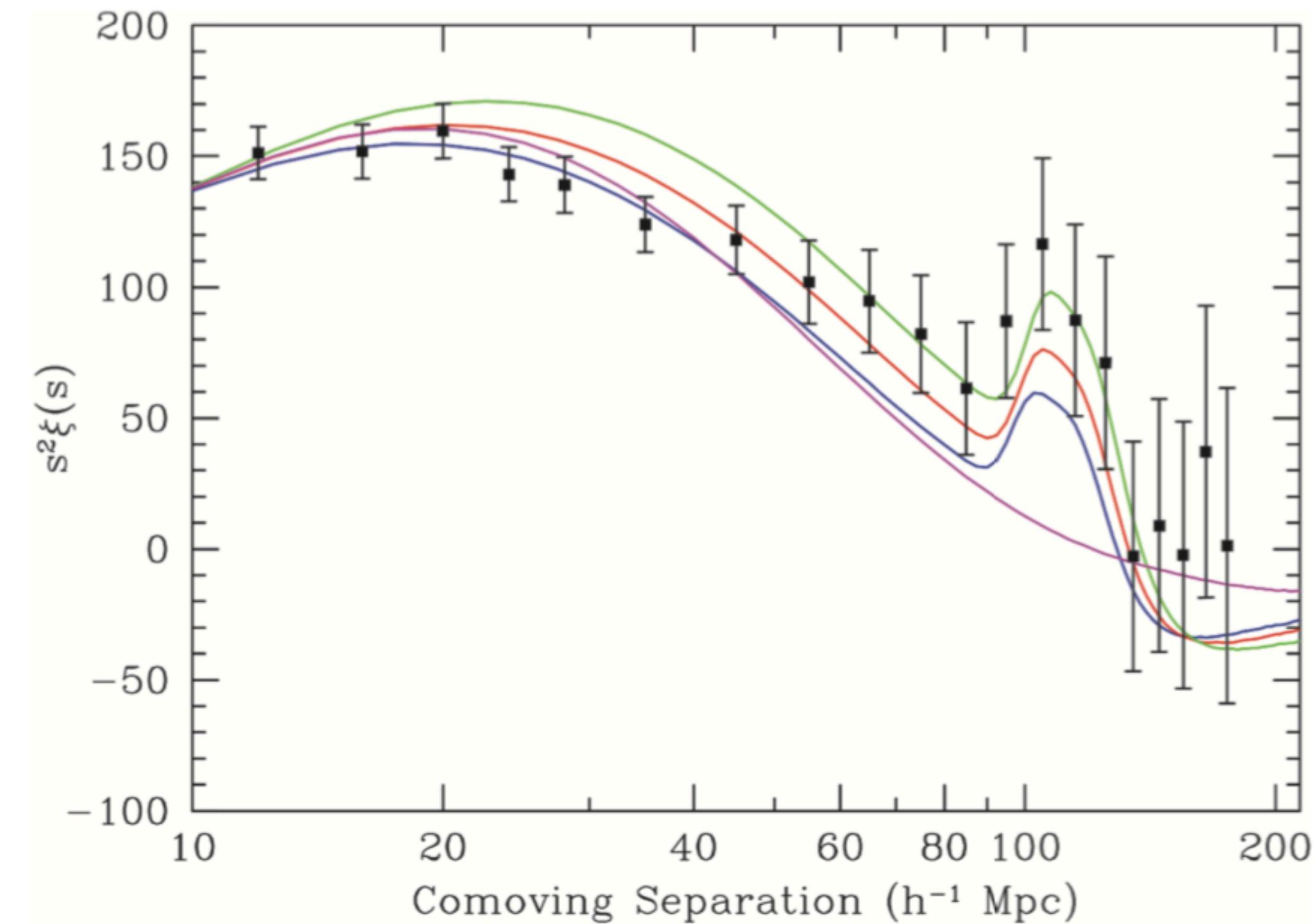


Tomado de Tsujikawa (2018).

En busca de la energía oscura: Evidencia observacional

Evidencia 3: Oscilaciones Acústicas de Bariones (BAO)

- ◆ Huellas de las oscilaciones en el gas barión-fotón: CMB y BAO
- ◆ Procesos en el gas barión-fotón:
 - ▶ $P_{Rad} >$ Atracción Gravitacional → Fluctuaciones
 - ▶ Inestabilidad gravitacional
 - ▶ Interacción gravitacional materia bariónica — oscura
 - ▶ Evolución y formación de halos galácticos
- ◆ Perturbaciones primigenias en la densidad de bariones → Distribución actual de galaxias
- ◆ Primera evidencia:
 - ▶ Eisenstein et al. (2005)
 - ▶ Sloan Digital Sky Survey (SDSS): 46 mil galaxias
 - ▶ Separación promedio: 100 Mpc
 - ▶ Resultados: $\Omega_m = 0.273 \pm 0.025$; $w = -0.80 \pm 0.18$



Tomado de Tsujikawa (2018b) como reproducción de Eisenstein et al. (2005).

En busca de la energía oscura: Evidencia observacional

Evidencia 3: Oscilaciones Acústicas de Bariones (BAO)

- ◆ Horizonte de sonido en la época de desacoplamiento fotones–bariones $r_s(z_{drag})$: BAO como regla estándar

- ◆ Análisis estadístico: Función de correlación de 2-puntos y Espectro de Potencia.

- ▶ Acumulación (desacumulación de materia)

- ◆ Medición radial y angular de BAO:

$$d\theta_s = \frac{r_s}{d_A(z)} \quad ; \quad dz_s = r_s H(z)$$

- ◆ Distancia de volumen: $D_V(z) \equiv \left[(1+z)^2 d_A^2(z) \frac{z}{H(z)} \right]^{1/3}$

- ◆ Errores sistemáticos: distribución de materia oscura, varianza cósmica, entre otros.

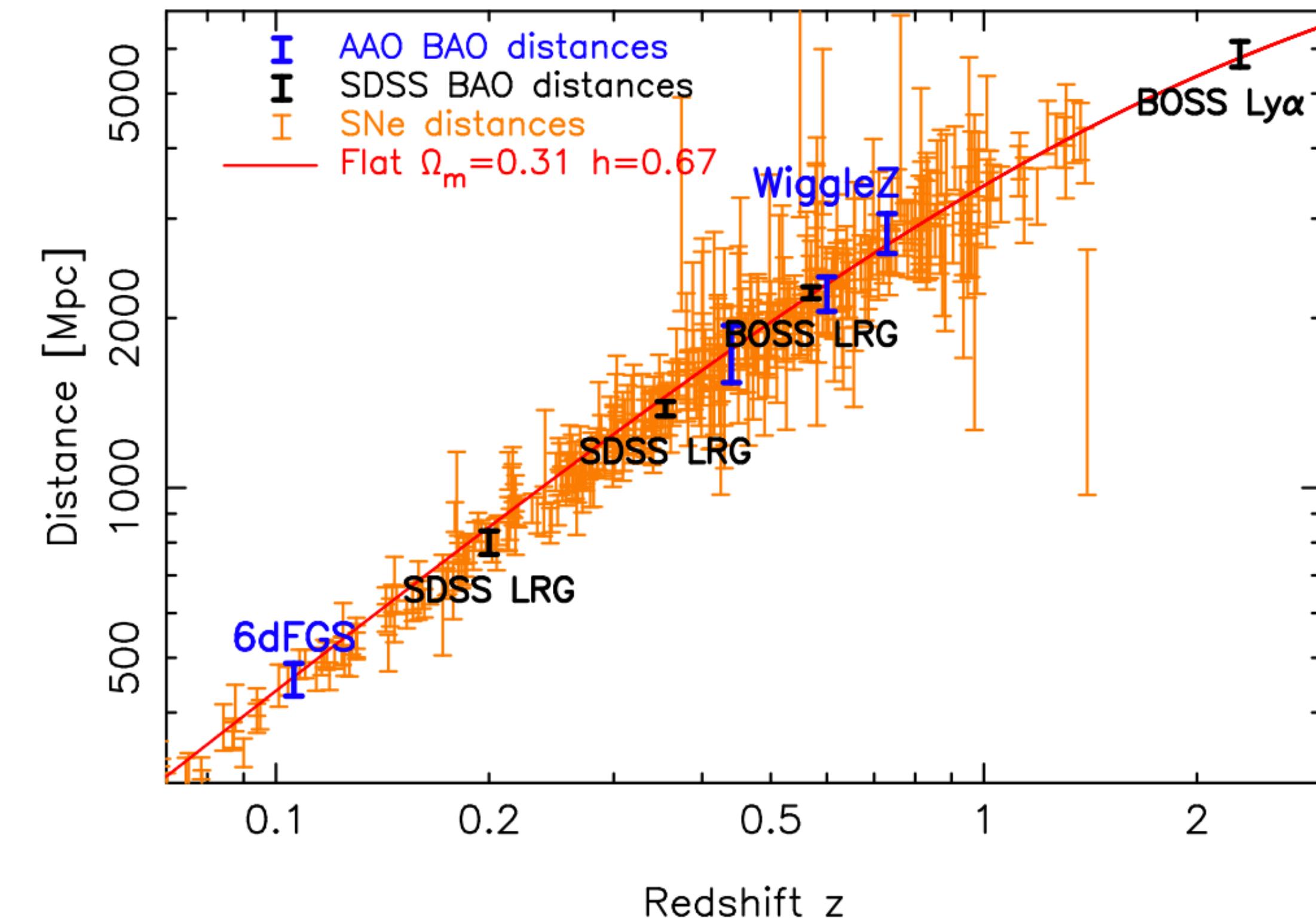
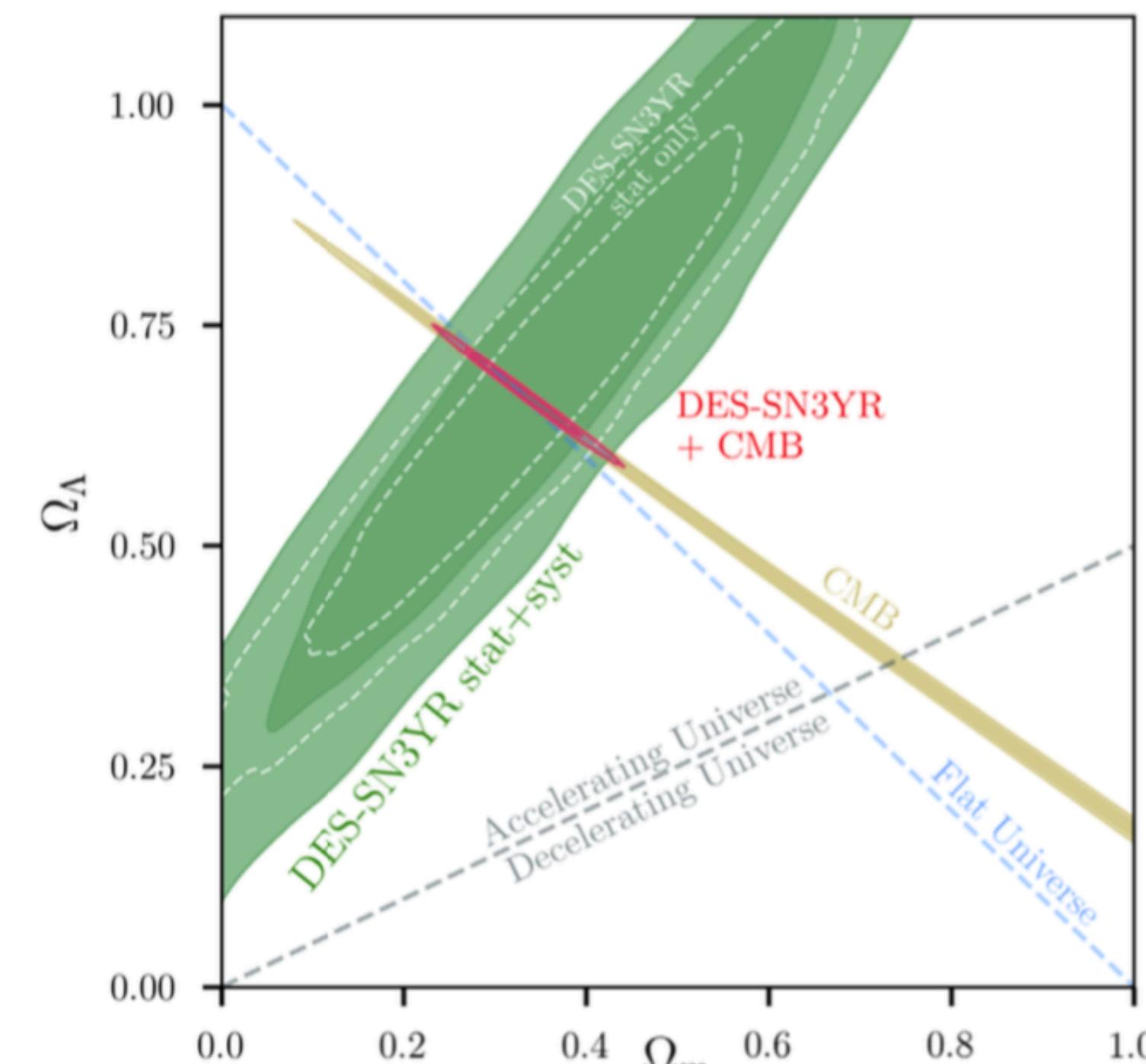


Diagrama de Hubble para BAO. Tomado de Lahav & Liddle (2014).

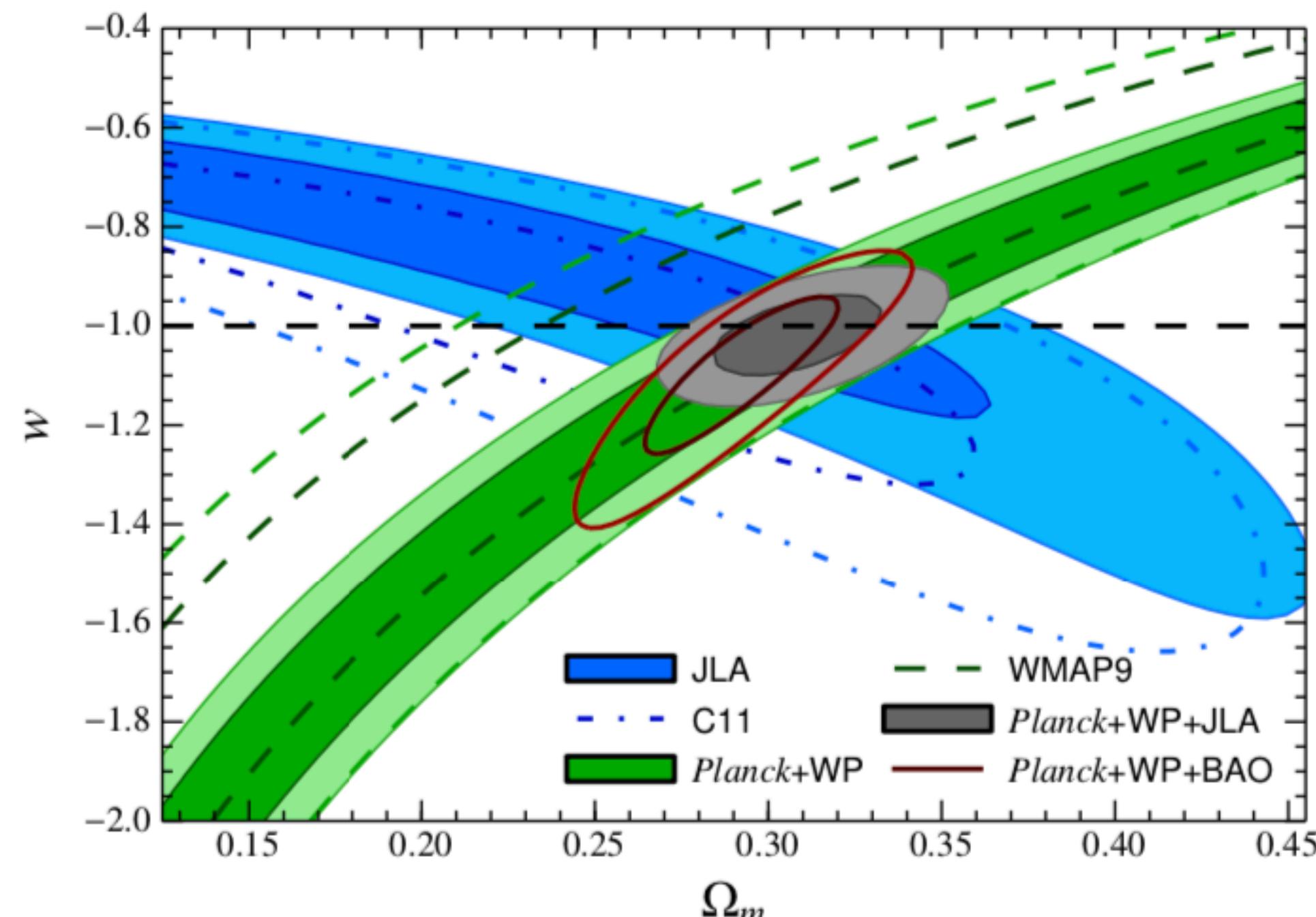
En busca de la energía oscura: Evidencia observacional

Resultados conjuntos: SN Ia + CMB + BAO



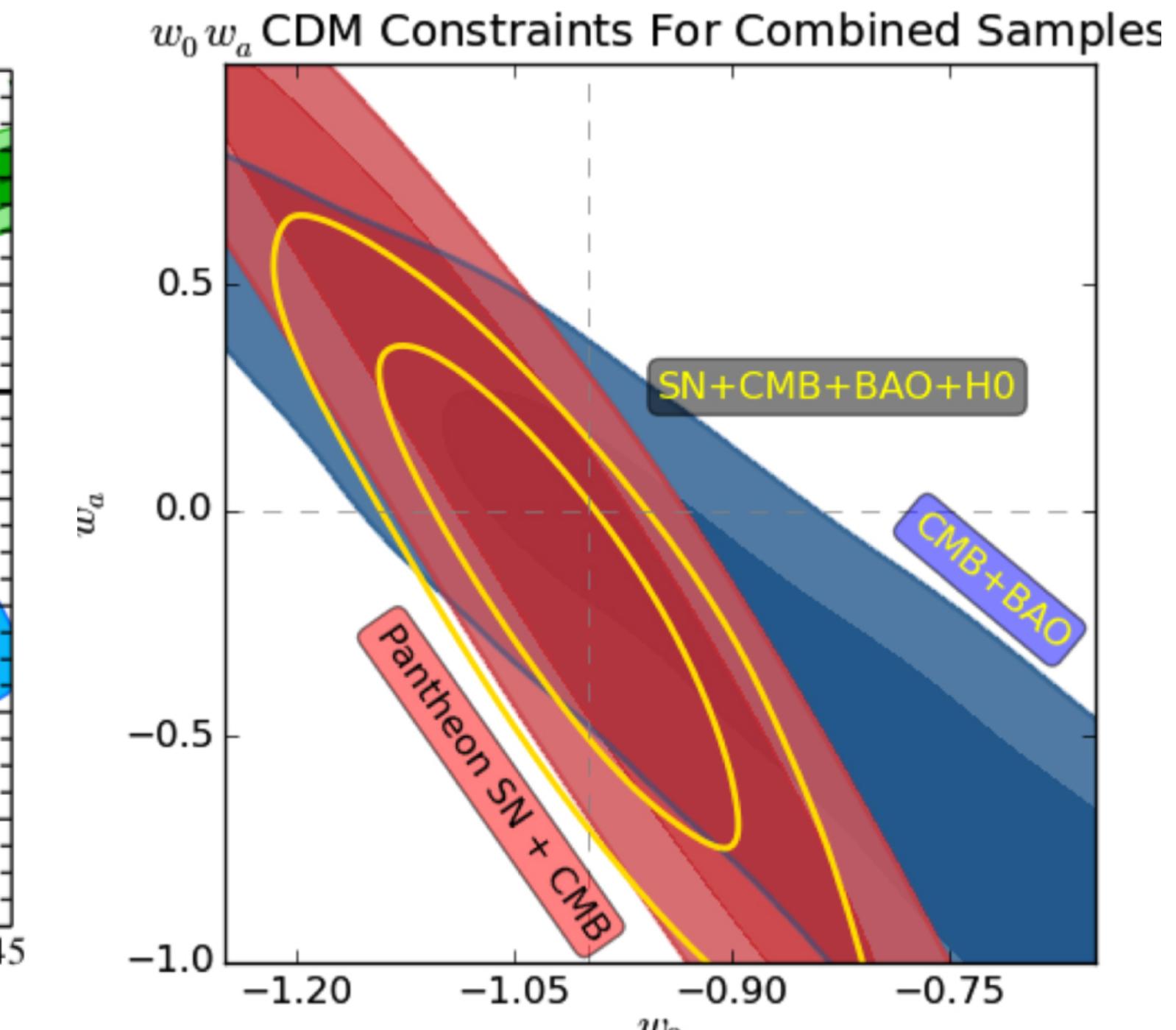
Tomado de Abbott et al. (2019)

$$\Omega_\Lambda = 0.670 \pm 0.032$$



Tomado de Betoule et al. (2014)

$$w = -1.027 \pm 0.055$$



Tomado de Scolnic et al. (2018)

$$w_0 = -1.007 \pm 0.089$$
$$w_a = -0.222 \pm 0.407$$

En busca de la energía oscura: Evidencia observacional

Evidencia secundaria

I. Lentes gravitacionales

- ▶ Estructuras de materia en línea de visión
- ▶ Distorsiones en las imágenes
- ▶ Débiles, fuertes y microlentes
- ▶ ‘Cosmic Shear’ y tomografía en 3D

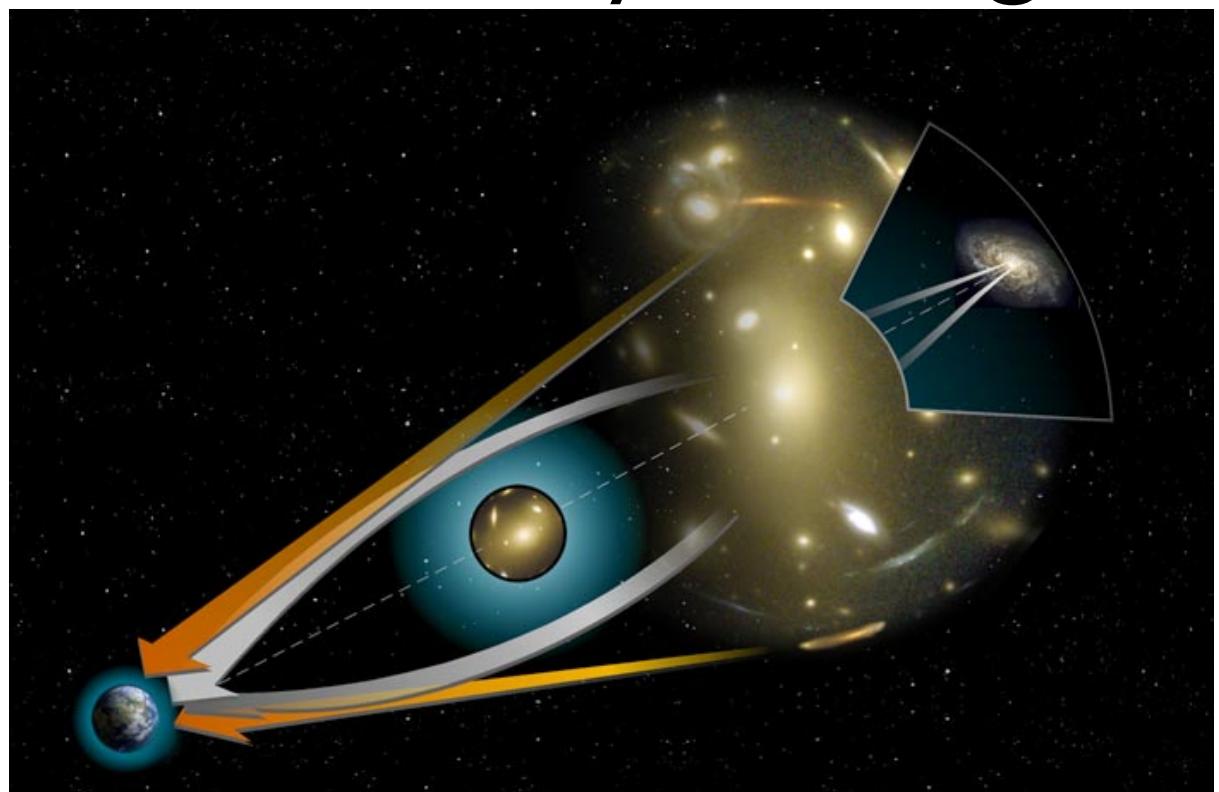


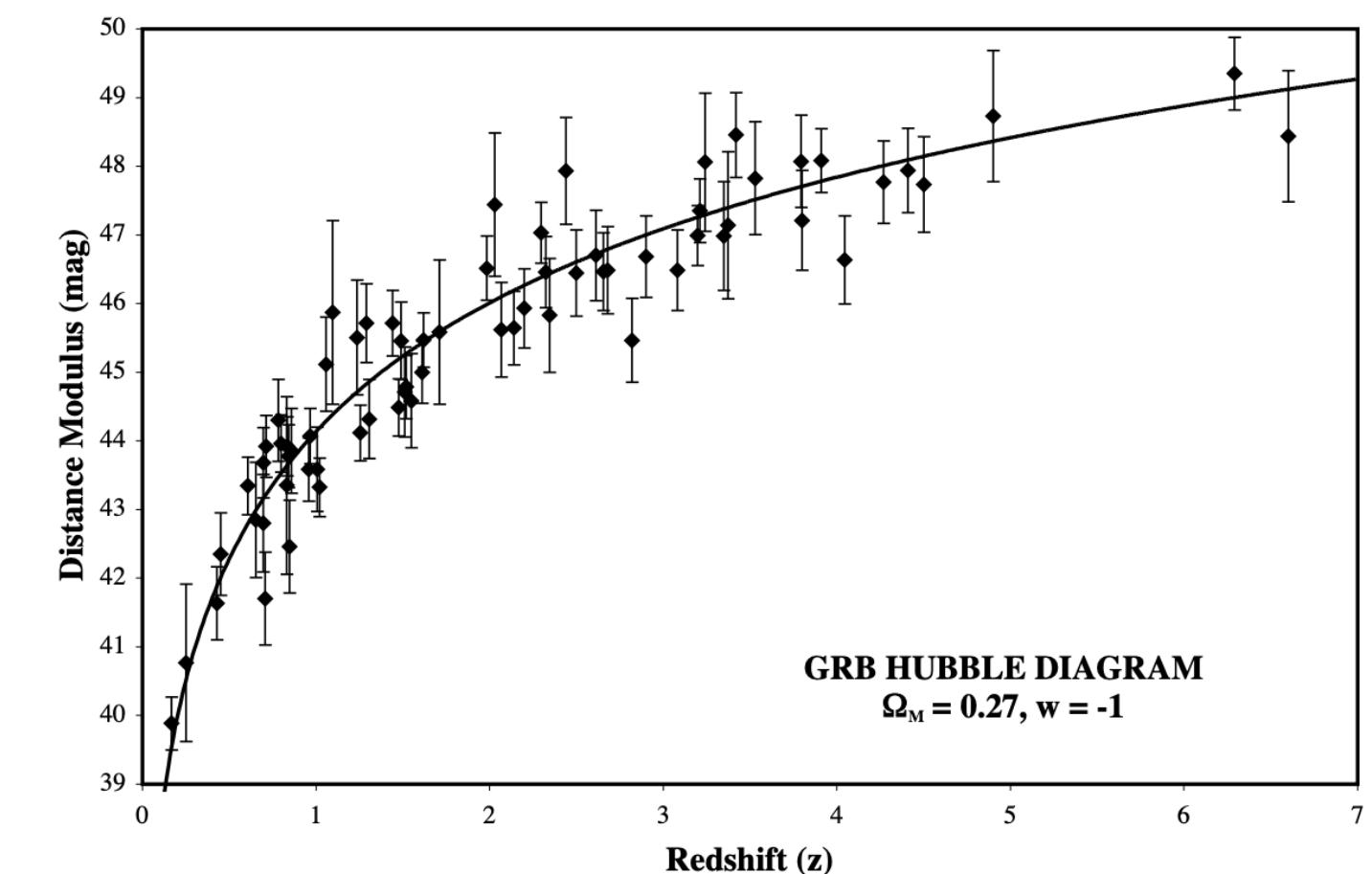
Imagen de dominio público

II. Gamma-ray Burst (GRB)

- ▶ Explosiones extremadamente energéticas
- ▶ Detectables a alto z (~ 8)
- ▶ No son velas estandarizadas
- ▶ Complemento a SNIa:

$$\Omega_m = 0.27$$

$$w = -1$$



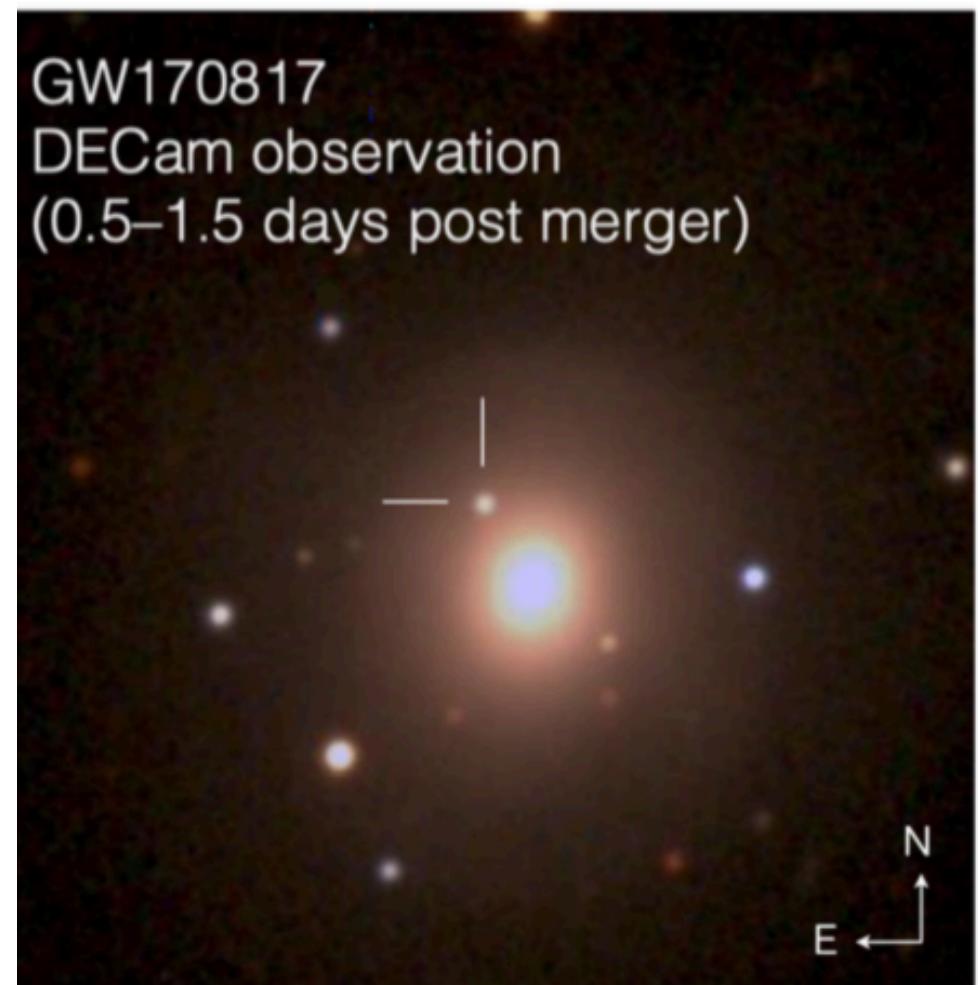
Tomado de Schaefer (2007)

En busca de la energía oscura: Evidencia observacional

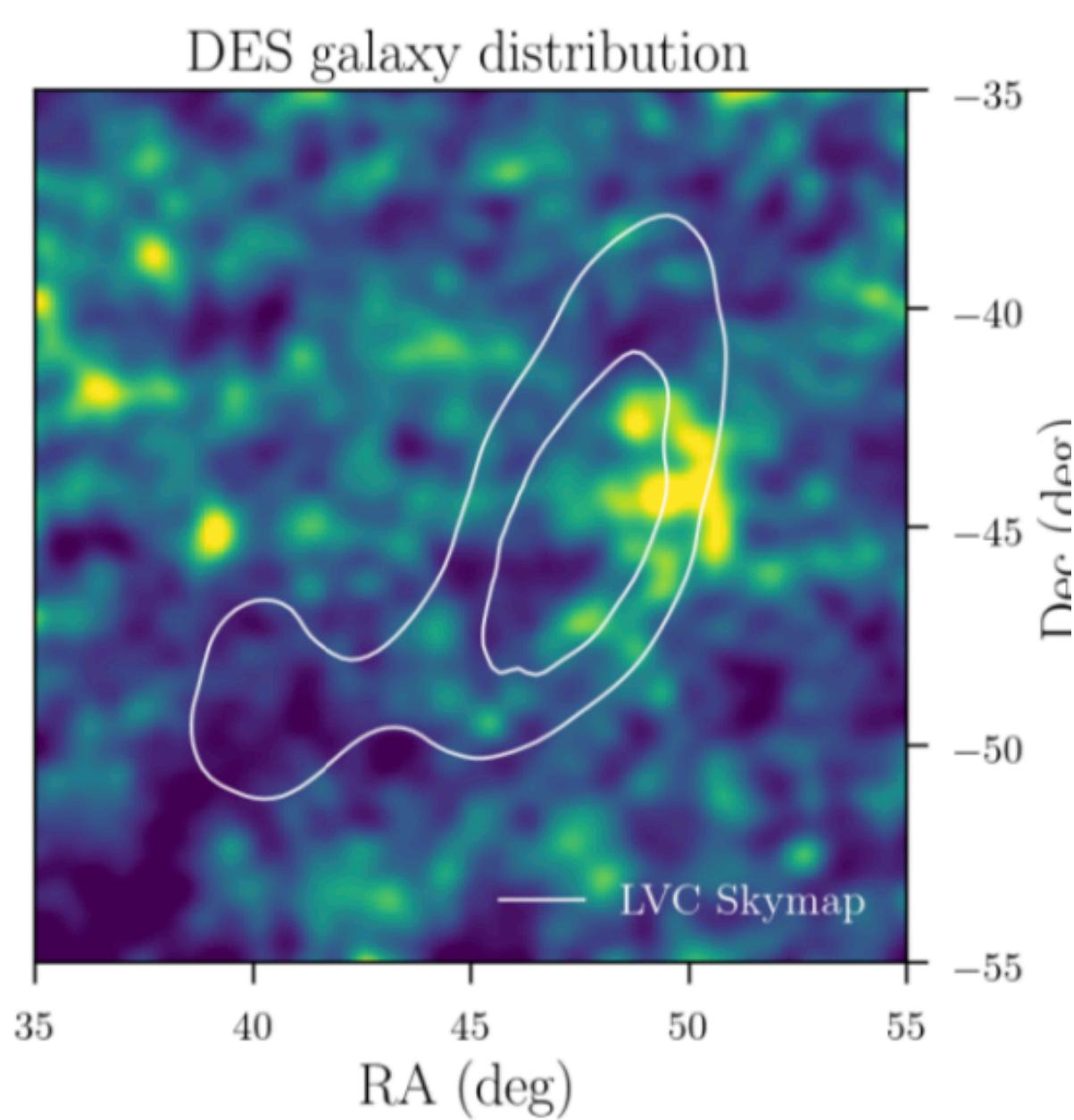
Evidencia secundaria

III. Sirenas estándar

- ▶ Mensajeras múltiples:
Ondas gravitacionales + EM
- ▶ Indicador absoluto de distancia
- ▶ Fusión de sistemas binarios de agujeros negros o estrellas de neutrones
- ▶ Primera detección:
GW 170817 + GRB 170817A
- ▶ Determinación de z :
Directa o Estadística
- ▶ Resultados recientes: $H_0 = 72.0^{+12.0}_{-8.2}$ (Palmese, 2020)



(a) Método directo



(b) Método estadístico

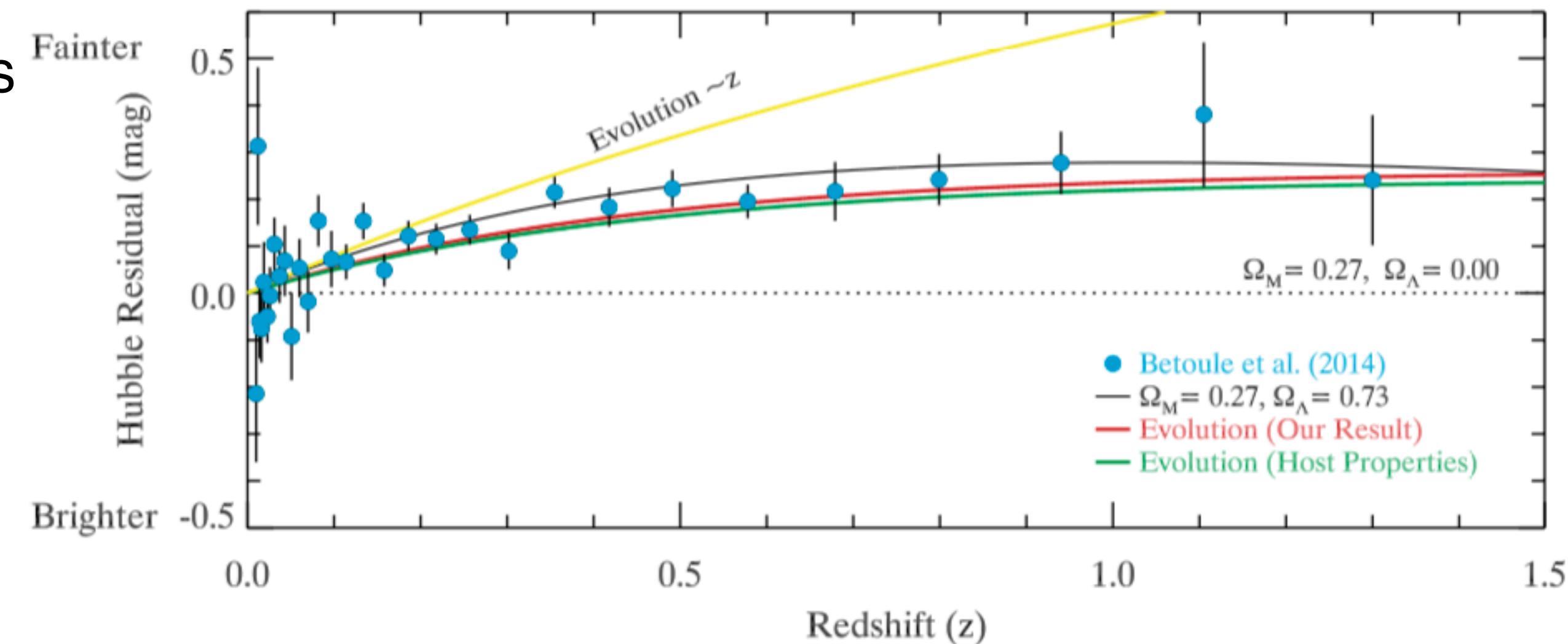
Tomado de Soares-Santos et al. (2017, 2018)

Controversia sobre SN Ia y Tensión de Hubble

Controversia: SN Ia como velas estándar

♦ **Kang et. al (2020):**

1. Existe correlación entre la luminosidad de SN Ia y las características morfológicas de galaxias anfitrionas
2. Evolución de la luminosidad podría “imitar” a la energía oscura.
3. SN Ia no son velas estándar de calidad.



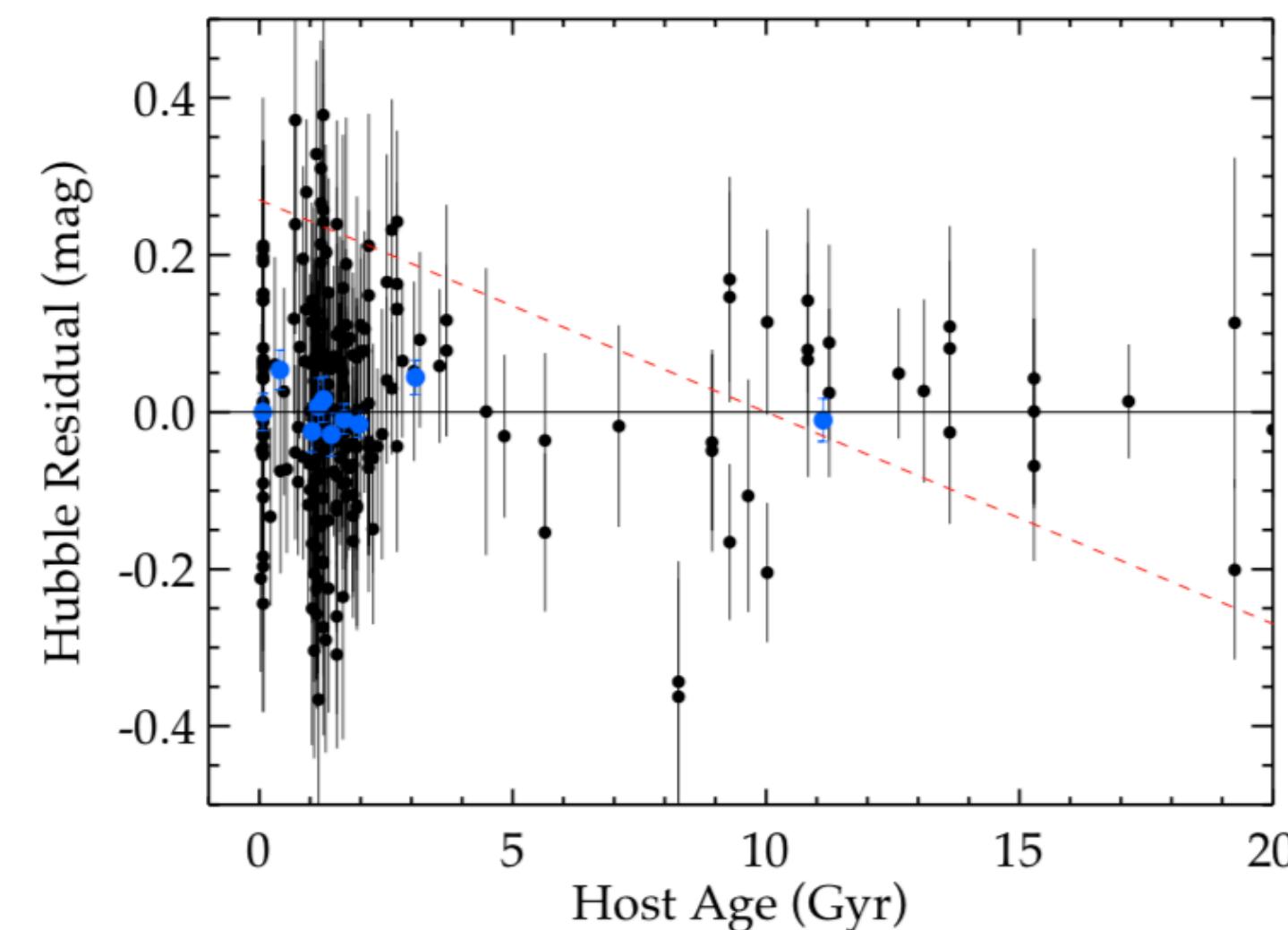
Tomado de Kang et. al. (2020)

Controversia sobre SN Ia y Tensión de Hubble

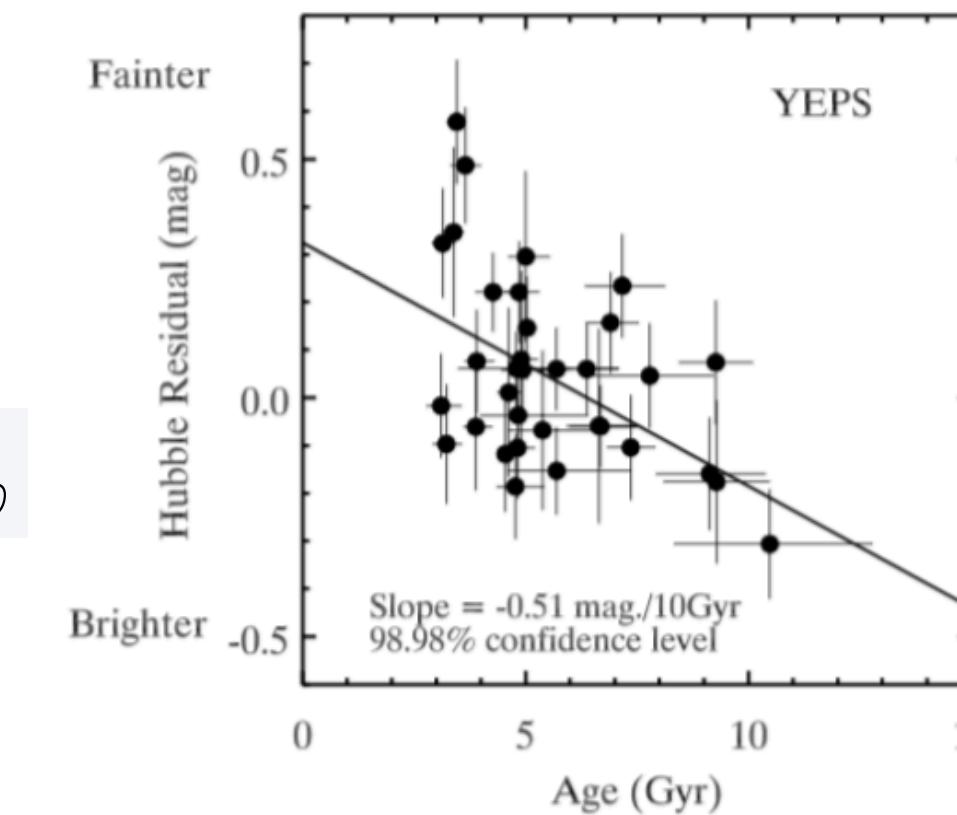
Controversia: SN Ia como velas estándar

♦ Kang et. al (2020):

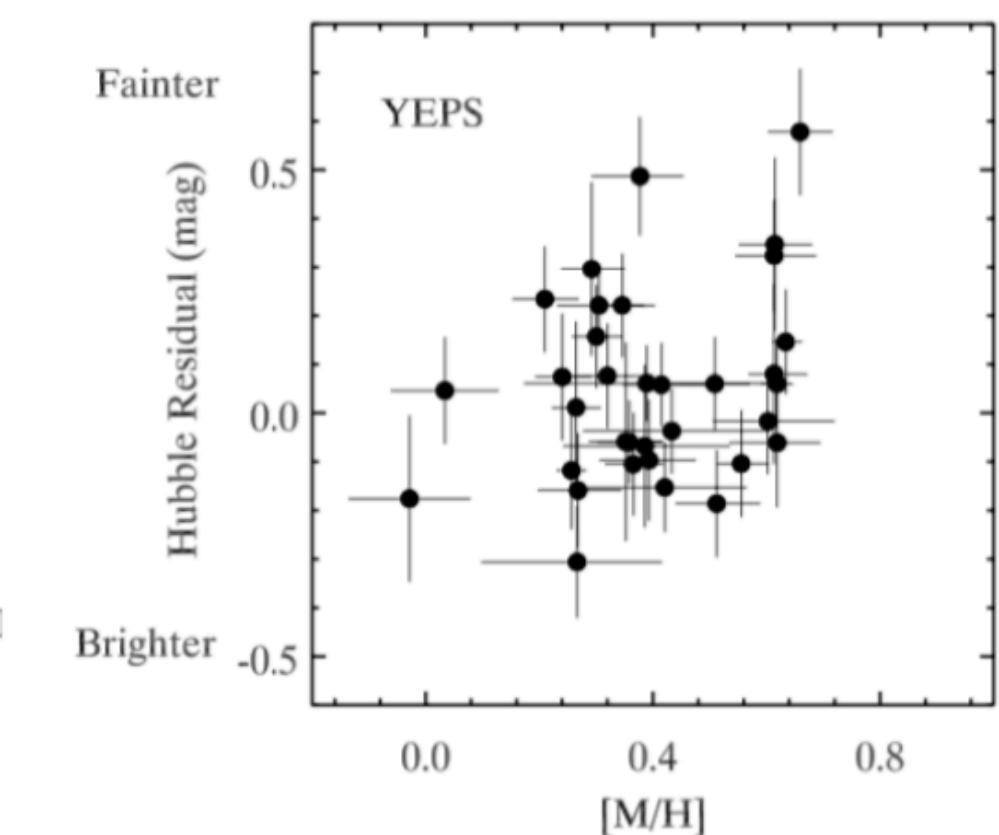
- Catálogo YONSEI
- 60 SN Ia en $0.01 < z < 0.08$
- Correlación entre el Residuo de Hubble y la edad estelar a 99.5 %
- Evolución de la luminosidad induce errores sistemáticos en medición de parámetros cosmológicos



Tomado de Rose et al. (2020)



(a) Correlación entre HR y edad



(b) Correlación entre HR y metalicidad

♦ Rose et. al (2020):

- Críticas a la muestra: tamaño (60:34-10-4), calidad (pocos datos)
- Fuentes de incertidumbres no consideradas
- Resultados inconsistentes al utilizar otra muestra: Pantheon (254 SN Ia)
- Evidencia de energía oscura es sólida

Tomado de Kang et al. (2020)

Controversia actual y Tensión de Hubble

Tensión de Hubble

♦ Mediciones de H_0

1. Indirectas (Universo temprano): $(67.4 \pm 0.5) \text{ km/s/Mpc}$

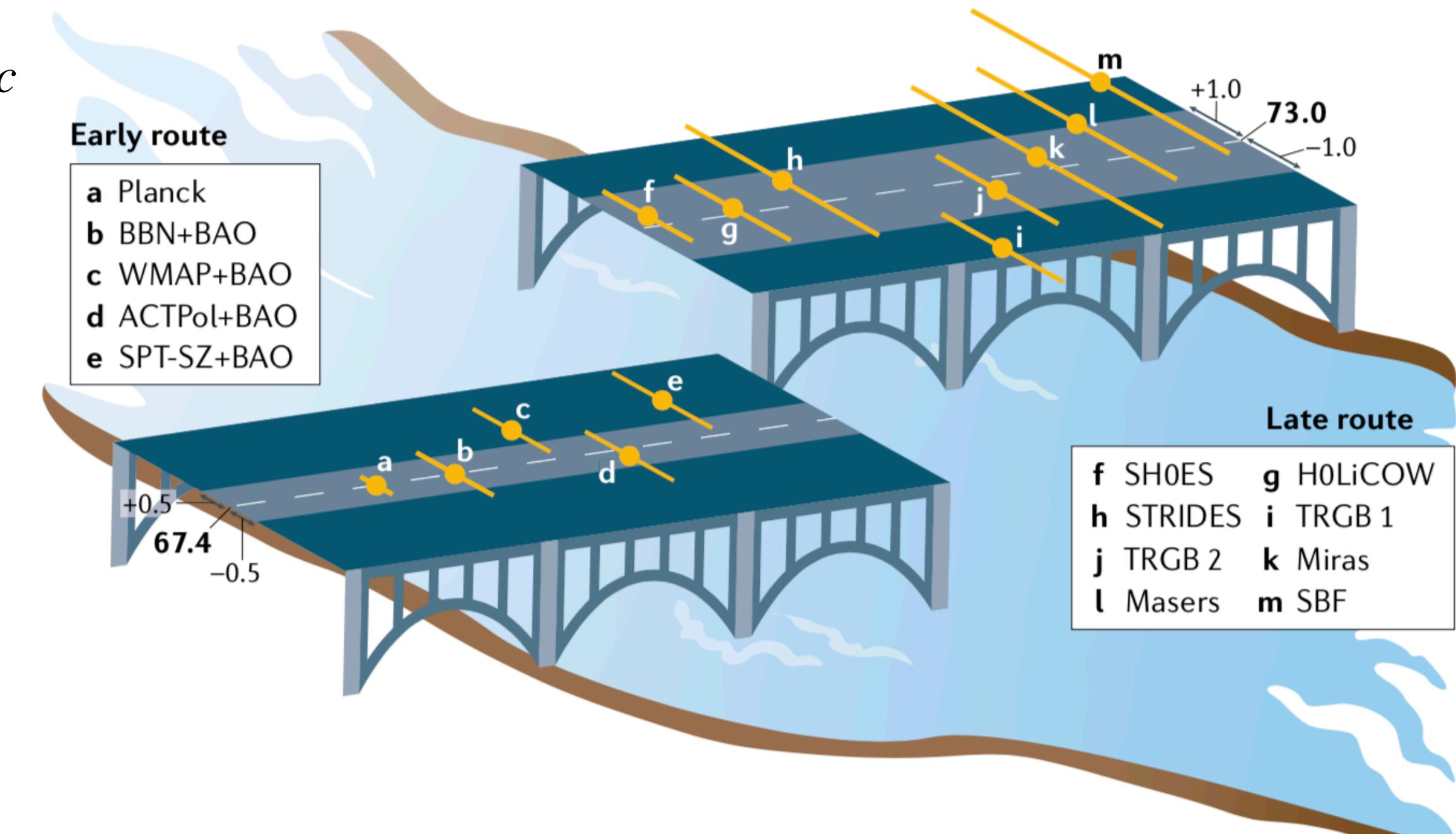
- CMB
- BAO
- BBN

2. Directas (Universo tardío): $(73.0 \pm 1.0) \text{ km/s/Mpc}$

- Cefeidas
- SN Ia
- TRGB

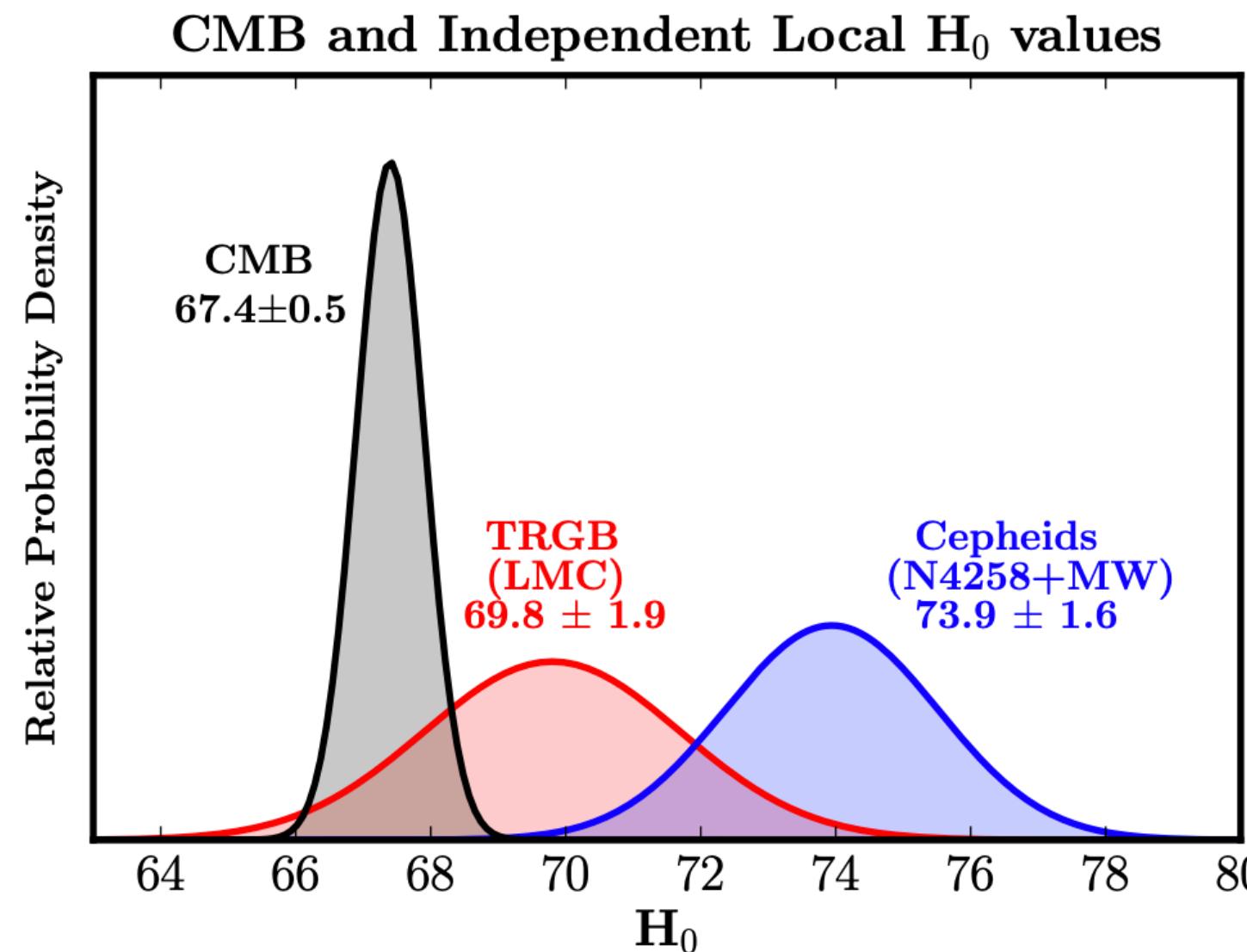
♦ Discrepancias de entre $4\sigma - 6\sigma$ (Riess, 2020)

♦ Probabilidad de que sea un efecto estadístico: 0.001 % (Lincoln, 2020)



Tomado de Riess (2020)

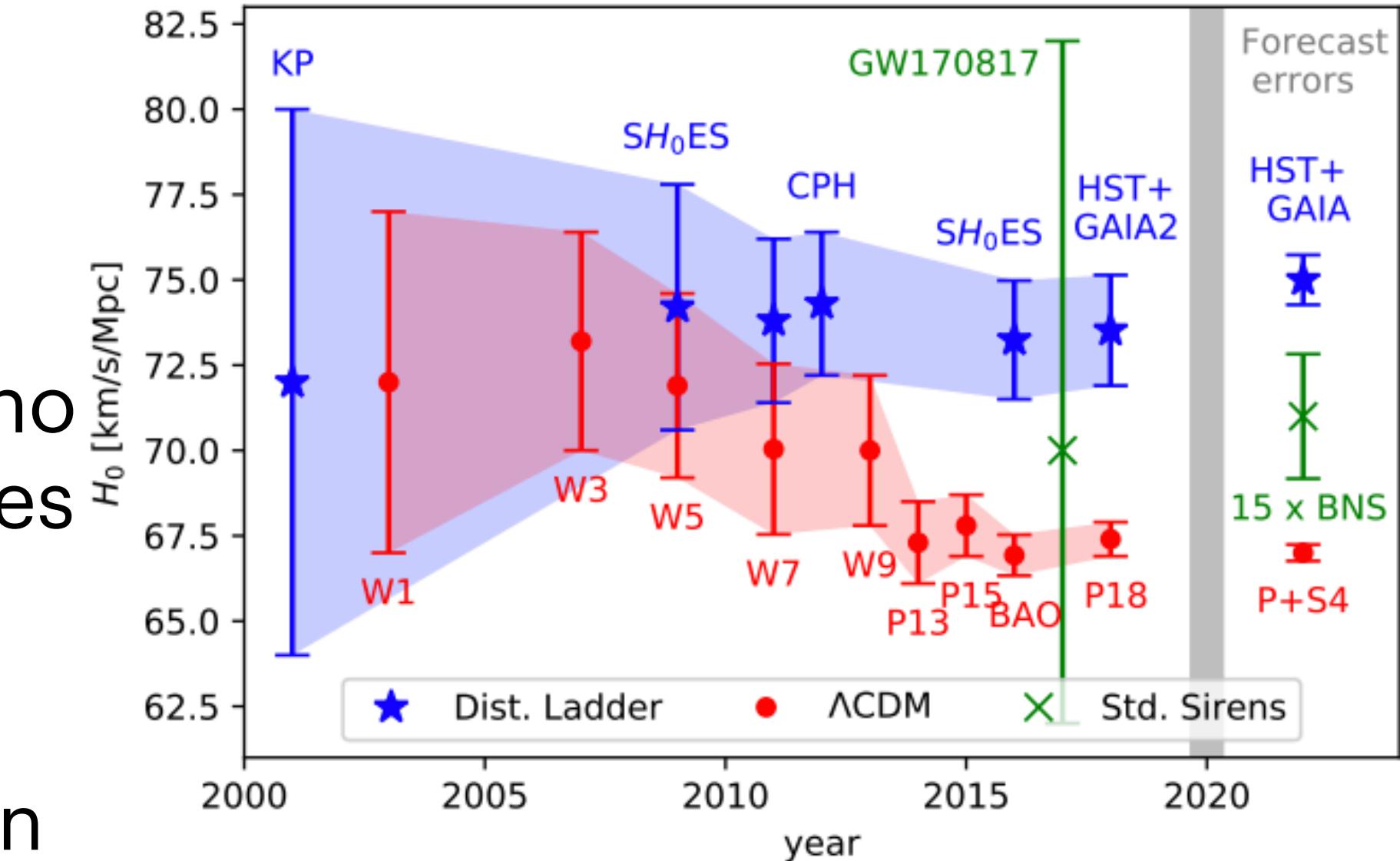
Controversia actual y Tensión de Hubble



Tomado de Freedman et al. (2019).

Tensión de Hubble

- ◆ Otras fuentes observaciones no han aportado pistas adicionales
- ◆ Tres (3) alternativas de solución



Tomado de Ezquiaga & Zumalacárregui (2018)

1. Errores sistemáticos: Calibración de la escalera cósmica de distancias
2. Extensiones del modelo Λ CDM: Campos escalares en el universo temprano
3. Sustitución de la cosmología estándar: Modelos dinámicos para explicar origen de energía oscura. Ejemplo: quintaesencia, k-esencia, gravedad modificada, etc.

Conclusiones y perspectivas

Tensión de Hubble

- ✓ La evidencia observacional indica que existe la energía oscura (DE).
- ✓ La naturaleza microscópica de la DE es aún desconocida pero sabemos que representa el 70 % de la energía total del universo y tiene carácter gravitacional repulsivo.
- ✓ Persisten tensiones y controversias la existencia y naturaleza de la DE así como sobre los métodos de medición de los parámetros que la caracterizan.
- ✓ Actualmente no hay evidencia fehaciente sobre la evolución de la luminosidad de las SN Ia.
- ✓ La cosmología moderna enfrenta una crisis originada por la Tensión de Hubble.
- ✓ El desenlace de la crisis actual puede llegar a ser incluso un cambio de paradigma cosmológico.
- ✓ El panorama es esperanzador para la cosmología y los nuevos cosmólogos: ¡Hay mucho trabajo!

Referencias

- ◉ S. M. Carroll (2019b). Spacetime and Geometry. Cambridge University Press.
- ◉ D. J. Eisenstein, et al. (2005). ‘Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies’. *The Astrophysical Journal* 633(2):560–574.
- ◉ B. J. T. Jones (2017b). Precision Cosmology. Cambridge University Press.
- ◉ D. Huterer & D. L. Shafer (2017). ‘Dark energy two decades after: observables, probes, consistency tests’. *Reports on Progress in Physics* 81(1):016901.
- ◉ Y. Kang, et al. (2020). ‘Early-type Host Galaxies of Type Ia Supernovae. II. Evidence for Luminosity Evolution in Supernova Cosmology’. *The Astrophysical Journal* 889(1):8.
- ◉ D. Lincoln (2020). ‘Is Modern Cosmology in Crisis?’. *The Physics Teacher* 58(4):234–237.
- ◉ Planck Collaboration, et al. (2018). ‘Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters’. arXiv e-prints p. arXiv:1807.06209.
- ◉ S. Perlmutter & B. P. Schmidt (2003). Measuring Cosmology with Supernovae, pp. 195–217. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- ◉ A. G. Riess (2020). ‘The expansion of the universe is faster than expected’. *Nature Reviews Physics* 2(1):10–12.
- ◉ A. G. Riess, et al. (2019). ‘Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics beyond Λ CDM’. *The Astrophysical Journal* 876(1):85.
- ◉ B. M. Rose, et al. (2020). ‘Evidence for Cosmic Acceleration Is Robust to Observed Correlations between Type Ia Supernova Luminosity and Stellar Age’. *The Astrophysical Journal* 896(1):L4.
- ◉ S. Tsujikawa (2011). Dark Energy: Investigation and Modeling, vol. 370 of *Astrophysics and Space Science Library*, p. 331.
- ◉ S. Tsujikawa (2018a). Chapter 5: Observational Evidence of Dark Energy at the Background Level, pp. 69–82. World Scientific.
- ◉ S. Tsujikawa (2018b). Chapter 8: Observational Probes for Dark Energy from CMB, Galaxy Clusterings, BAO, Weak Lensing, pp. 165–194. World Scientific.
- ◉ S. Weinberg (2008). Cosmology. Oxford University Press.