¿Cómo medir distancias en el universo?

La relación entre la densidad de energía oscura, la densidad de materia y las supernovas tipo Ia

Nicolas Pan Rivero

Instituto de Física, Facultad de Ciencias
Universidad de la República

Examen Cosmología
20 de Diciembre de 2022

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR fcien.edu.uy

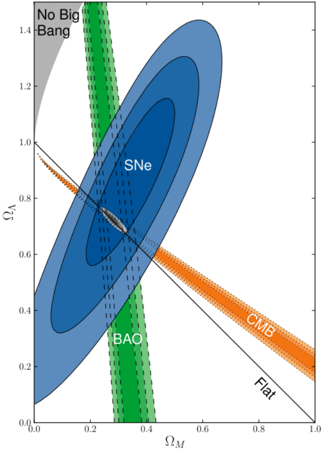
Indice

Génesis de la charla

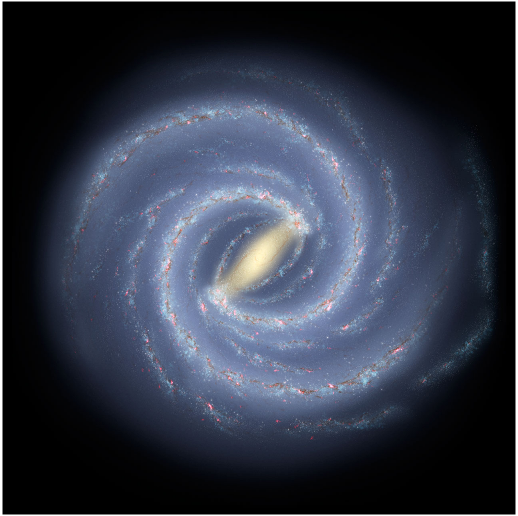
¿De qué esta compuesto nuestro universo?

- Materia
- Radiación
- Energía oscura

Amanullah et al. 2010



El universo es GRANDE



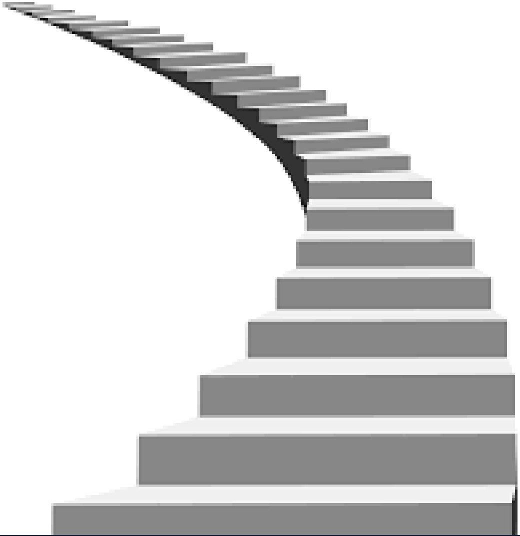
1 pc
$= 206{,}264.8$ AU
$= 3.0856 \times 10^{13}$ km
$= 3.2616$ light yr
Estrella mas cercana al Sol a 1.35 pc
Disco galáctico tiene un tamaño de 30 kpc

"When you're thinking big, think bigger than the biggest thing ever and then some. Much bigger than that in fact, really amazingly immense, a totally stunning size, real 'wow, that's big' time. It's just so big that by comparison, bigness itself looks really titchy. Gigantic multiplied by colossal multiplied by staggeringly huge is the sort of concept we're trying to get across here."

Douglas Adams

La escalera de distancias

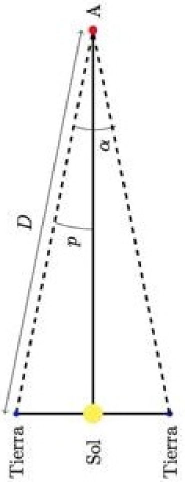
El espacio tiempo es dinámico



Medir distancias

Indicadores primarios
Geométricos y fotométricos

Paralaje



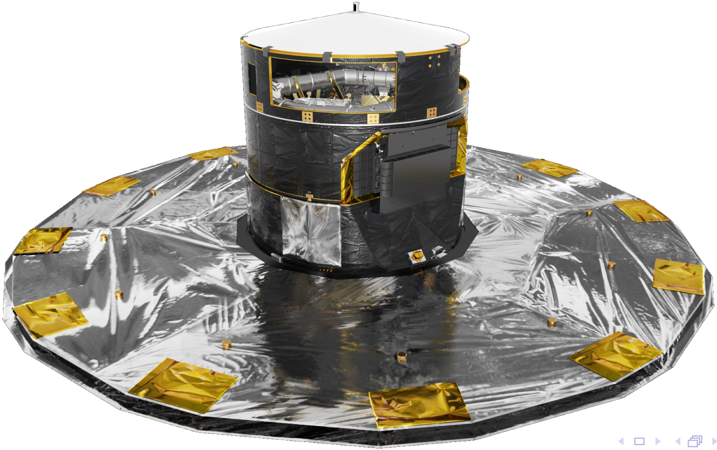
$$tan(p) \approx p = \frac{op}{ady} = \frac{1AU}{D} \quad (1)$$

$$D = \frac{1AU}{p} \quad (2)$$

p en segundos de arco y D en parsecs. Si medimos p entonces tenemos la distancia!

Gaia

Medir paralajes desde tierra es complicado, hasta 0.03''



Luminosidad aparente

$$\ell = \frac{L}{4\pi d^2}$$

Definiendo la magnitud aparente como $m \propto -2.5log(\ell)$ y la magnitud absoluta como la magnitud aparente a una distancia de 10 pc. La distancia se puede escribir como

$$d = 10^{1+(m-M)/5}pc$$

Podemos reescribir esta ecuación como

$$m - M = 5log(d) - 5$$

Si conocemos M y medimos m entonces tenemos la distancia!
Conocemos M para por ejemplo estrellas RR Lyraes y Cefeidas pero necesitamos cosas mas brillantes para medir distancias mas lejanas.

Medir distancias

Indicadores secundarios

- Relación de Tully-Fisher
- Relación de Faber-Jackson
- Supernovas tipo Ia

El universo es dinámico

Necesitamos modificar la ecuación de la luminosidad aparente debido a que la expansión del universo afecta a los fotones. Se obtiene

$$\ell = \frac{L}{4\pi r_1^2 a^2(t_0)(1+z)^2}$$

definiendo la distancia lumínica $d_L = a(t_0) r_1 (1+z)$ obtenemos

$$\ell = \frac{L}{4\pi d_L^2}$$

Objetivo: ecuación para $d_L = d_L(z)$

Teníamos 3 ecuaciones fundamentales

- Ecuación de Friedmann

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

- Ecuación de continuidad

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + P) = 0$$

- Ecuación de estado

$$P = \omega\rho$$

donde podemos escribir ρ como

$$\rho = \frac{3H_0^2}{8\pi G}\left[\Omega_\Lambda + \Omega_M(\frac{a_0}{a})^3 + \Omega_R(\frac{a_0}{a})^4\right]$$

donde se cumple que $\Omega_\Lambda + \Omega_M + \Omega_R + \Omega_K = 1$ con $\Omega_K = \frac{-K}{a_0^2H_0^2}$

Objetivo: ecuación para $d_L = d_L(z)$

Sustituyendo ρ en la ecuación de Friedmann y haciendo el cambio de variable $x = a/a_0 = 1/(1+z)$ obtenemos

$$dt = \frac{dx}{H_0 x \sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_K x^{-2} + \Omega_M x^{-3} + \Omega_R x^{-4}}}$$

Ahora, la coordenada radial r(z) es

$$r(z) = S\left[\frac{1}{a_0 H_0}\int_{1/(1+z)}^{1} \frac{dx}{x^2\sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_K x^{-2} + \Omega_M x^{-3} + \Omega_R x^{-4}}}\right]$$

donde usamos que $\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}}$. S[y] es una función tal que $S[y] = sin(y)$ para K=+1, $S[y] = y$ para K=0 y $S[y] = sinh(y)$ para K=-1.

Objetivo: ecuación para $d_L = d_L(z)$

Ahora recordando que $d_L(z) = a_0 r(z)(1+z)$ obtenemos para un universo plano

$$d_L(z) = \frac{1+z}{H_0} \int_{1/(1+z)}^{1} \frac{dx}{x^2\sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_M x^{-3} + \Omega_R x^{-4}}}$$

Recordemos que $\Omega_R << \Omega_M$. Así tenemos una ecuación para $d_L(z) = d_L(z; \Omega_M, \Omega_\Lambda)$. Podemos predecir entonces la magnitud aparente de una candela estándar para cualquier par de valores de Ω_Λ y Ω_M. Midiendo una magnitud aparente a cierto redshift restringimos los valores que pueden tomar las densidades a un isocontorno. Desafortunadamente las medidas tienen incertidumbre.

Un poco de historia

En 1995 Goobar & Perlmutter publican este artículo

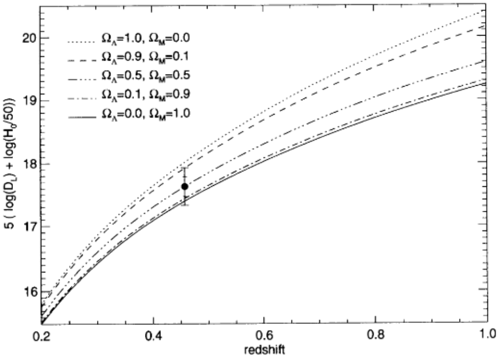
FEASIBILITY OF MEASURING THE COSMOLOGICAL CONSTANT Λ AND MASS DENSITY Ω USING TYPE Ia SUPERNOVAE

ARIEL GOOBAR[1] AND SAUL PERLMUTTER[2]

Received 1995 January 10; accepted 1995 March 14

Un poco de historia

Para el caso de un universo plano distancia lumínica vs redshift, se marca el punto con *menor* barra de error. Necesitamos medir a alto redshift.



Batalla por conquistar el alto redshift

En la década de los 90s dos equipos se pusieron en pelea con un mismo objetivo: medir supernovas a alto redshift. Ganó The Supernova Cosmology Project, cinturón de campeón y premio nobel en 2011.

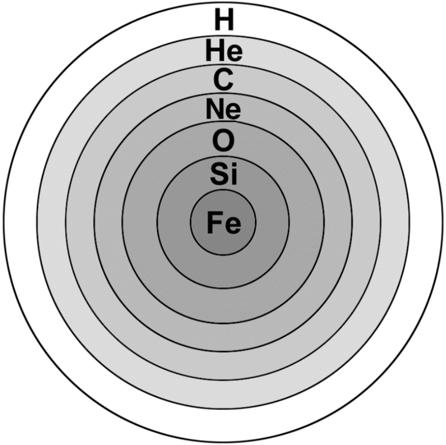
Supernovas tipo Ia

Una pregunta que aún no respondimos

¿Por qué podemos usar las supernovas tipo Ia como candelas estándar?

Estructura estelar

Repasemos brevemente qué es una estrella



Evolución estelar

La característica mas determinante en la evolución de una estrellas es su masa.

Posibles finales de una estrella: Supernovas, nebulosas planetarias, agujeros negros, estrellas de neutrones, enanas blancas.

Enanas blancas

¿Qué es una enana blanca?
Su estructura se soporta debido a la presión de electrones degenerados.

Límite de Chandrasekhar: 1.44 $M_\odot$

Tenemos un límite a la masa que puede tener una enana blanca. Si la masa es mayor, el carbono y oxígeno degenerados comienzan a fusionarse y se desencadena un runaway.

$$M_{ch} = \frac{\omega_3^0 \sqrt{3\pi}}{2} \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2} \frac{1}{(\mu_e m_H)^2}$$

donde μ_e depende de la composición química de la estrella.

Supernova tipo Ia

Sistema binario donde una enana blanca acreta masa hasta superar el límite de Chandrasekhar.

Medida de la constante de Hubble

Ya en 1929 Hubble utilizó las supernovas tipo Ia para determinar la expansión del universo.

A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

By Edwin Hubble

Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington

Communicated January 17, 1929

$$v = H_0 d$$

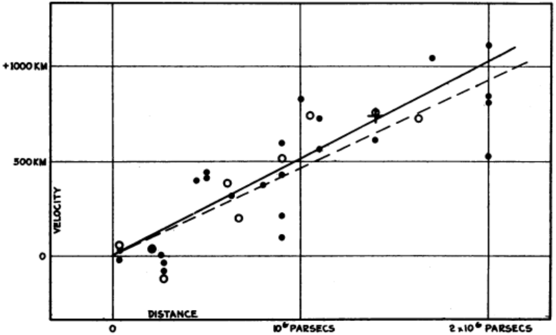


FIGURE 1

¿Las magnitudes absolutas de las supernovas tipo Ia son siempre iguales?
Según *Branch et al. (1992)* la mayoría de las supernovas tipo Ia son normales y no presentan indicios de extinción debido al polvo. En la banda B son excelentes candelas estándar tal que

$$M_B = -19.72 \pm 0.06 + 5log(H_0/50)$$

con una dispersión de $\sigma_{M_B} = 0.36$ mag.

Década de los 90s

Antes que nada remarquemos la independencia de las medidas independientemente del valor de H_0.

$$m - M = 5log(d_L) - 5$$

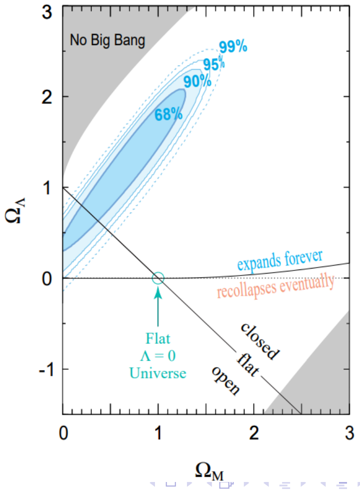
$$M = c + 5log(H_0)$$

$$d_L(z) = \frac{1+z}{H_0}\int_{1/(1+z)}^{1}\frac{dx}{x^2\sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_M x^{-3} + \Omega_R x^{-4}}}$$

notemos entonces que m es *independiente* del valor de H_0 por lo que nos ahorramos el problema de la constante de Hubble.

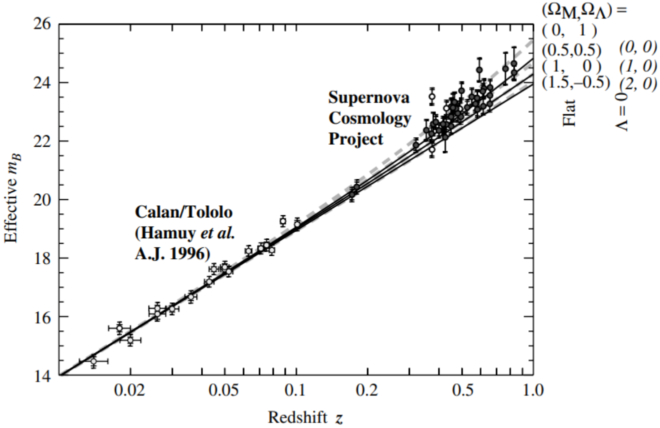
Perlmutter et al. 1998

Con un nivel de significancia del 99% descartan el caso en que $\Omega_\Lambda = 0$ y para un universo plano encuentran que $\Omega_M = 0.28$ y $\Omega_\Lambda = 0.72$



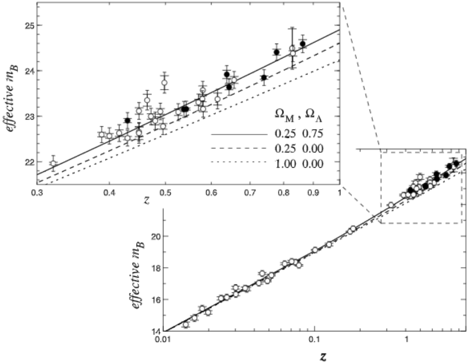
Expansión del universo: ahora acelerada!

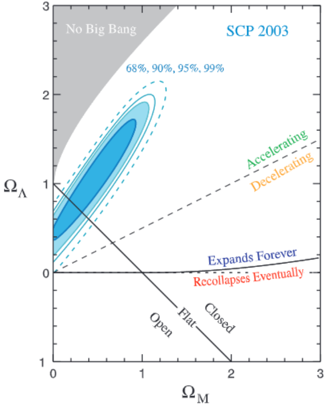
Expanden la gráfica de Hubble para redshifts mas altos



Más supernovas!

Con el tiempo se fueron corroborando los resultados con nuevas supernovas. Por ejemplo el artículo de Knop et al. 2003.





Conclusiones

Logramos medir distancias y de yapa sabemos de que esta hecho el universo!

Bibliografía

1. Weinberg, S. (2008). Cosmology. OUP Oxford.
2. Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. Proceedings of the national academy of sciences, 15(3), 168-173.
3. Goobar, A., Perlmutter, S. (1995). Feasibility of measuring the cosmological constant Lambda and mass density Omega using type Ia supernovae. arXiv preprint astro-ph/9505022.
4. Branch, D., Miller, D. L. (1993). Type IA supernovae as standard candles. The Astrophysical Journal, 405, L5-L8.
5. Perlmutter, S., Gabi, S., Goldhaber, G., Goobar, A., Groom, D. E., Hook, I. M., ... Supernova Cosmology Project. (1997). Measurements* of the Cosmological Parameters and from the First Seven Supernovae at z 0.35. The astrophysical journal, 483(2), 565.
6. Knop, R. A., Aldering, G., Amanullah, R., Astier, P., Blanc, G., Burns, M. S., ... Supernova Cosmology Project. (2003). New constraints on M, , and w from an independent set of 11 high-redshift supernovae observed with the Hubble Space Telescope. The Astrophysical Journal, 598(1), 102.

¡Muchas Gracias!

¿Preguntas?