

SUPERNOVAS IA COMO TRAZADORA DE LA ENERGÍA OSCURA
(Parte II)
Ramón Molina¹

Cuando la mente se amplía para abarcar grandes ideas, jamás vuelve a su tamaño original.

Oliver Wendell Holmes

Calibración de las magnitudes a bajo redshift

Las magnitudes obtenidas a partir de la ecuación (2) deben ser calibradas con el fin de obtener valores precisos de las constantes cosmológicas. En este sentido, se requiere tener una muestra de objetos lo más uniforme posible, que sean obtenidos a través de una búsqueda sistemática, tal que sean comparables con la muestra de SN Ia obtenida por Perlmutter et al. (1999) a alto redshift.

Un estudio previo realizado por Hamuy et al. (1995, 1996) descubrió una muestra de 29 SN Ia de Calán/Tololo, en donde a 18 de ellas se les pudo medir fotométricamente en la banda B y V (sistema en reposo) cinco días antes de su máximo brillo y fueron tomada a bajo redshift $z = 0.01$ a 0.10 .

A partir de estas 18 SN Ia encontraron que la distribución de la magnitud absoluta del pico de la curva de luz en la banda B, exhibía una dispersión relativamente ancha del orden de ± 0.26 mag., igualmente, pudieron obtener el punto cero para la muestra (Hamuy et al. 1996). Por otra parte, se había observado

¹ Ramón Molina, Licenciado en Física, graduado en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes (Mérida-Venezuela). Magíster Scientiae en Astronomía y Astrofísica, Universidad de Los Andes (Mérida-Venezuela). Actualmente, realiza estudio de Doctorado en Física en la Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela (Caracas-Venezuela). Es profesor Agregado adscrito al Departamento de Matemática y Física de la Universidad Nacional Experimental del Táchira, además miembro fundador del Laboratorio de Investigación en Física Aplicada y Computacional.

Supernovas IA como trazadora de la energía oscura (Parte II)

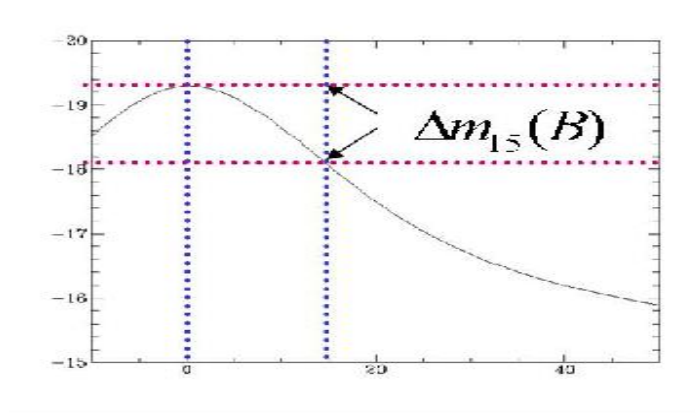
que existían desviaciones en la luminosidad a diferentes máximos de luz, color, ancho de la curva de luz (Phillips 1993, Hamuy et al. 1995, Reiss et al. 1995), del índice de color (U-B) (Branch et al. 1997) y de las relaciones entre las líneas espectrales (Nugent et al. 1995).

De manera que esta relación de dispersión podría ser mejorada a través de una calibración. En tal sentido, se uso la correlación entre la escala de tiempo de la curva de luz y el pico de luminosidad de las SN Ia, de manera que esta correlación podía entenderse en término del ancho de la curva de luz. Por ejemplo, para una SN Ia que presenta una curva de luz con una caída lenta (esto es, mas ancha), le correspondería tener un mayor brillo, todo lo contrario, sucedería si esta curva presenta una caída abrupta.

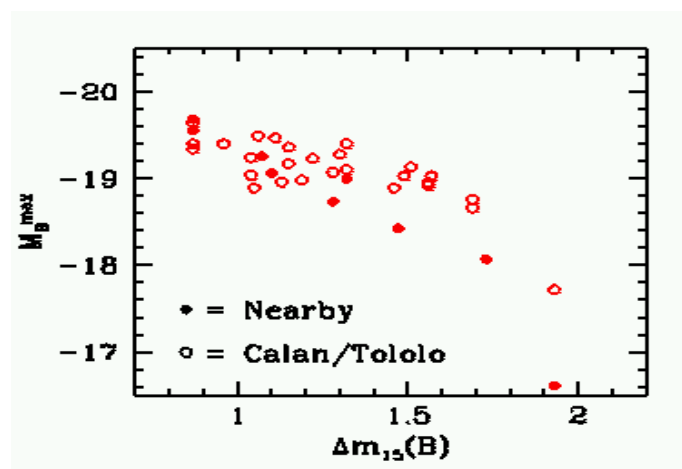
Phillips (1993) propuso una relación lineal entre la tasa de la declinación de la curva de luz que llamó Δm_{15} (que representa el cambio de magnitud durante los primeros 15 días) y, el pico de magnitud absoluta en la banda B. Las flechas presentes en la siguiente figura señalan la relación con la cual se construye dicho parámetro.

En la práctica, no siempre las curvas de luz de las SN Ia son observadas durante 15 días continuos, por lo que los datos fotométricos, deben ser ajustados por interpolación a plantillas de SN Ia (modelada o de SN Ia observadas y promediada) que le permita expandir la tasa de declinación.

Ramón Molina

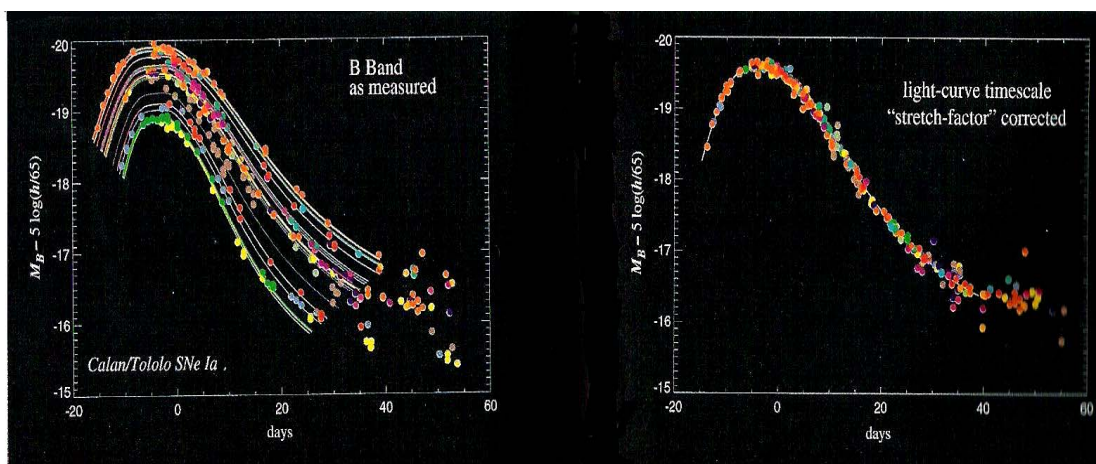


Riess y Col. (1998) utiliza dos métodos para lograr la estandarización de las curvas de luz. El primer método, basado en una aproximación lineal, en donde, el máximo de la luminosidad y la tasa de declinación de la curva de luz son ajustado usando una relación lineal para un conjunto de plantillas de SN Ia escogida sobre un rango de tasa de declinación (esta relación lineal puede ser observada en la figura dada a continuación) y, el segundo método, que describe la forma multicolor de la curva de luz (Multicolor Light Curve Shape) basado en un modelo empírico que describe una relación cuadrática entre el máximo de la luminosidad, la tasa de declinación y el exceso de color. La siguiente figura me indica la relación entre el máximo de luminosidad y la tasa de declinación Δm_{15} .



Supernovas IA como trazadora de la energía oscura (Parte II)

Lo que se plantea con esta corrección, es que todas las curvas de luz sean desplazadas y que alcancen un ancho fijo. Perlmutter et al. (1999), presenta una parametrización del ancho forma de la curva de luz, usando un factor que llamó de alargamiento “s” que amplía o estrecha linealmente la escala de tiempo (del sistema en reposo) dentro de una plantilla promedio para la curva de luz. Este factor, fue propuesto como una alternativa heurística, usando una familia de plantillas de curva de luz. Físicamente, este factor puede reflejar una variación dependiente de la temperatura en opacidad y, por consiguiente, la difusión de la escala de tiempo de la atmósfera de la SN. La corrección a la dispersión de la magnitud absoluta en la B al parametrizar la curva de luz, alcanza un valor de ± 0.17 mag para la muestra de Calán/Tololo. En la figura dada, se muestra a la izquierda un conjunto de curvas a la que se le aplica el método de estandarización de Perlmutter y colaboradores, llegando posteriormente, a que todas alcancen una misma magnitud del máximo y un mismo ancho (figura a la derecha).



Ramón Molina

Además de la parametrización del ancho o forma de la curva de luz, otros observables pueden estar correlacionados con las magnitudes absolutas de las SN. De manera que, se pueden observar correlaciones entre la M_B o el factor Δm_{15} con el índice de color (U-B), también entre la magnitud absoluta y el cociente de las líneas de Ca II H y K a 3800 Å o con el cociente de las líneas de Si II en 5800 Å y 6150 Å. Todo esto, provee un método alternativo para calibrar las luminarias estándares de SN Ia.

También existen correlaciones con las propiedades que presenta la galaxia progenitora, ya que se ha observado que miembros de la familia de SN Ia de baja luminosidad, son encontrados preferiblemente en galaxias esferoidales (Hamuy et al. 1995) o, que las SN Ia más luminosas, se encuentren en galaxias tardías (Branch et al. 1996). Esto es importante, puesto que la calibración dentro de una mezcla de familia de SN Ia, ya sea por la forma de la curva de luz, color o líneas espectrales, sugiere discriminar los distintos tipos dentro de una mezcla de galaxias progenitoras.

Calibración de las magnitudes a alto redshift

Cuando se desea calibrar las magnitudes de SN Ia a alto redshift requiere de un tratamiento distinto a las correcciones a bajo redshift, ya que aparte de ser tomado en cuenta las consideraciones anteriores (descritas en la anterior sección), las magnitudes deben ser descontaminadas de la luz proveniente de la galaxia progenitora, la cual aparece en forma de disco; por otra parte, los fotones que son emitidos y detectado desde el objeto, cambian su longitud de onda.

Para el caso de la descontaminación de la luz de la galaxia progenitora, se requiere de una substracción de las imágenes. El proceso para descontaminar es complicado, y tal vez un algoritmo que conlleve a realizar un proceso de

Supernovas IA como trazadora de la energía oscura (Parte II)

convolución de imágenes, podría extraer el factor de residuo g_{residuo} proveniente de la galaxia.

Para esto, se debe tener en cuenta que los fotones que abandona a la SN en la banda B, llegan a nuestro telescopio aproximadamente en la banda R.

Se usan las distribuciones de flujo de varias SN Ia de bajo redshift (que sean bien observados sobre su curva de luz), tal que le permitan construir una tabla de correcciones que entre cruza ambos filtros $K_{BR}(t)$, como función del tiempo de la curva de luz. Estas correcciones, dan cuenta del desajuste entre los redshifts de la banda B y R, como también, la diferencia entre los puntos ceros definido de los dos sistemas de magnitudes.

El flujo observado para las SN Ia de alto redshift, debe ser corregido por el flujo de las plantillas de las SN Ia de bajo redshift tomando en cuenta la corrección K_{BR} , esto es

$$\Sigma_R(t') = \Sigma_B(t) + K_{BR}(t) \quad (5)$$

donde la dependencia del tiempo observado $t' = t(1+z)$, la cual da cuenta del tiempo de eventos a redshift z .

Los cálculos de las correcciones de $K_{BR}(t)$ son descritos y tabulados con un análisis en error que produce incertidumbre de valores < 0.04 mag, para redshift $z < 0.6$.

Por lo tanto, la data fotométrica para cada SN, es ajustada a la plantilla de la banda R observada, con parámetros libres para el factor de alargamiento, s , la magnitud R en el pico, m_R , el día o la fecha del pico t_{pico} y la constante de flujo aditivo g_{residuo} que da cuenta del residuo de luz de la galaxia progenitora debido al

Ramón Molina

error de Poisson en la imagen final corregida, así podemos obtener la magnitud m_R en la banda R a partir de la siguiente expresión:

$$f(t; m_R, s, t_{\text{pico}}, g_{\text{residuo}}) = 10^{-0.4[m_R - m_{0R} + \Sigma_R (t's - t_{\text{pico}})]} + g_{\text{residuo}} \quad (6)$$

donde m_{0R} es la calibración del punto cero para las observaciones en la banda R y Σ_R observado, es normalizado a cero, en $t = 0$. De esta última ecuación, es posible obtener la magnitud en la banda R, esto es, m_R .

Obtención de las constantes cosmológicas ajustando simultáneamente las magnitudes efectivas con los bajos y altos redshift

Para el trabajo desarrollado por Perlmutter et al. (1997f), las magnitudes de los picos fueron corregidos para la relación entre los anchos de las curvas de luz y la luminosidad de las SN Ia, a través de la expresión

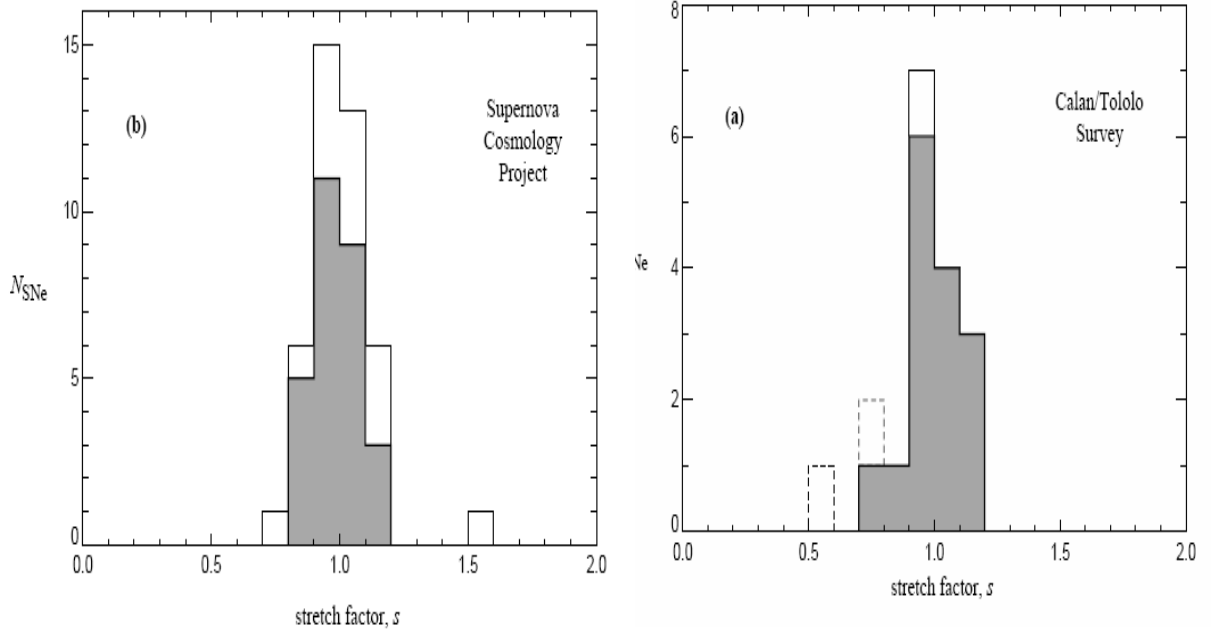
$$m_{B_{\text{corr}}} = m_B + \Delta_{\text{corr}}(s) \quad (7)$$

El término $\Delta_{\text{corr}}(s)$, referente al **factor de alargamiento**, puede expresarse de la siguiente manera

$$\Delta_{\text{corr}}(s) = \alpha (s-1) \quad (8)$$

donde la constante α , se deriva simultáneamente con la determinación de los parámetros cosmológicos. Con esta forma funcional, las magnitudes de los picos de las SN, están todos corregidos tal como ellos aparecerían, si el ancho de la curva de luz de la plantilla promedio de SN Ia tendría un $s = 1$.

Supernovas IA como trazadora de la energía oscura (Parte II)



Por otra parte, **la extinción galáctica A_R** afecta las magnitudes de las SN, por lo que se hace necesario realizar una corrección por este factor, así, se tiene que

$$\mathfrak{R}_R = A_R / E(U-B) \quad (9)$$

donde $E(U - B)$ es el exceso de color. Por lo que se convierten, las magnitudes R a **magnitudes B “efectivas”**, esto es

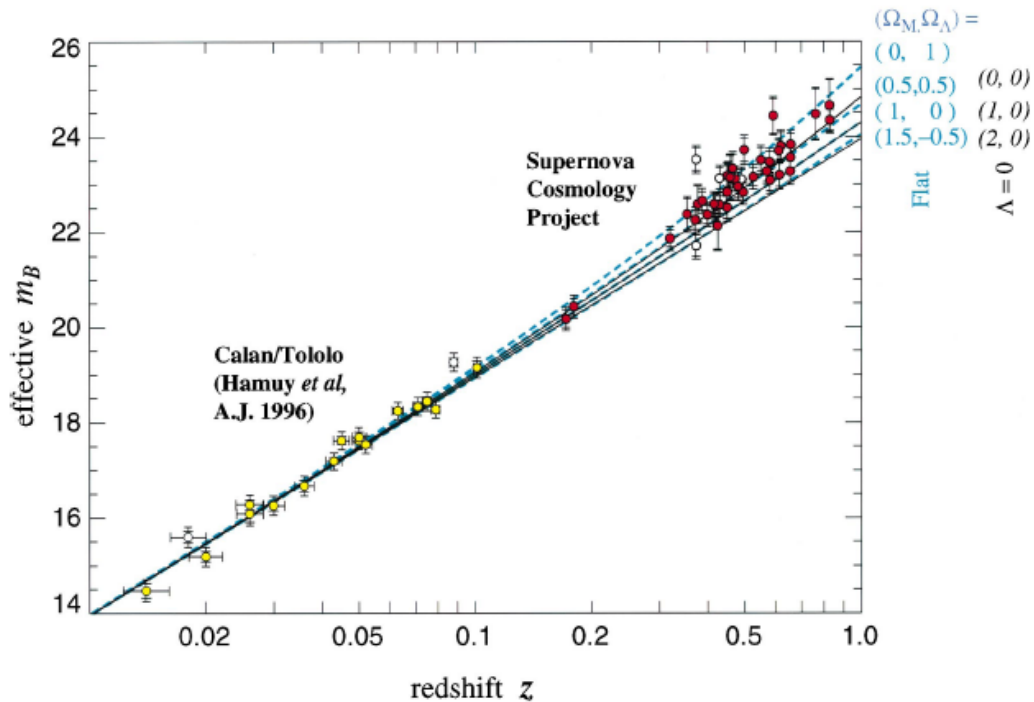
$$m_B = m_R - A_R - K_{BR} \quad (10)$$

por lo que la ecuación (8) se convierte en

$$\begin{aligned} m_{B \text{ efectivas}} &= m_R + \alpha (s-1) - A_R - K_{BR} \\ &= M'_B + 5 \log D_L(z; \Omega_m, \Omega_\Lambda) \end{aligned} \quad (11)$$

Ramón Molina

La constante α y M_B quedan como parámetros libres al hacer el ajuste y determinar las constantes cosmológicas.

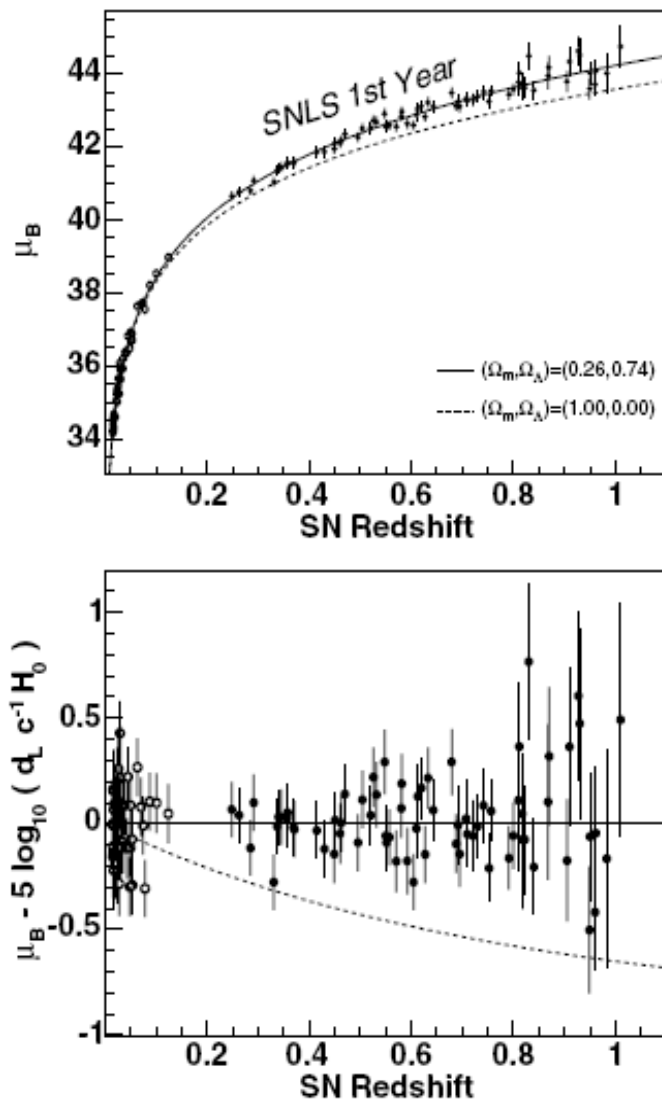


Para realizar el ajuste, se aplica una técnica estadística llamada el **método clásico de frecuencias** que determina el χ^2 . En la figura anterior, se muestran las curvas teóricas para dos modelos cosmológicos; el primero, donde $\Lambda = 0$, el cual muestra líneas sólidas dentro de un rango en densidad de masa de $\Omega_m = 0, 1, 2$. El segundo, representa una alternativa cosmológica plana con una densidad de energía total $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ y, donde el rango del modelo abarca los valores $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0, 1), (0.5, 0.5), (1, 0)$ que se representan por líneas quebradas, la curva $(1.5, -0.5)$ se representa por una línea sólida.

De esta gráfica Perlmutter y colaboradores llegan a concluir que el mejor modelo cosmológico, es aquel, cuyas constantes, la densidad de masa y la densidad de la constante cosmológica alcanzan valores de $\Omega_m = 0.25$ y $\Omega_\Lambda = 0.75$

Supernovas IA como trazadora de la energía oscura (Parte II)

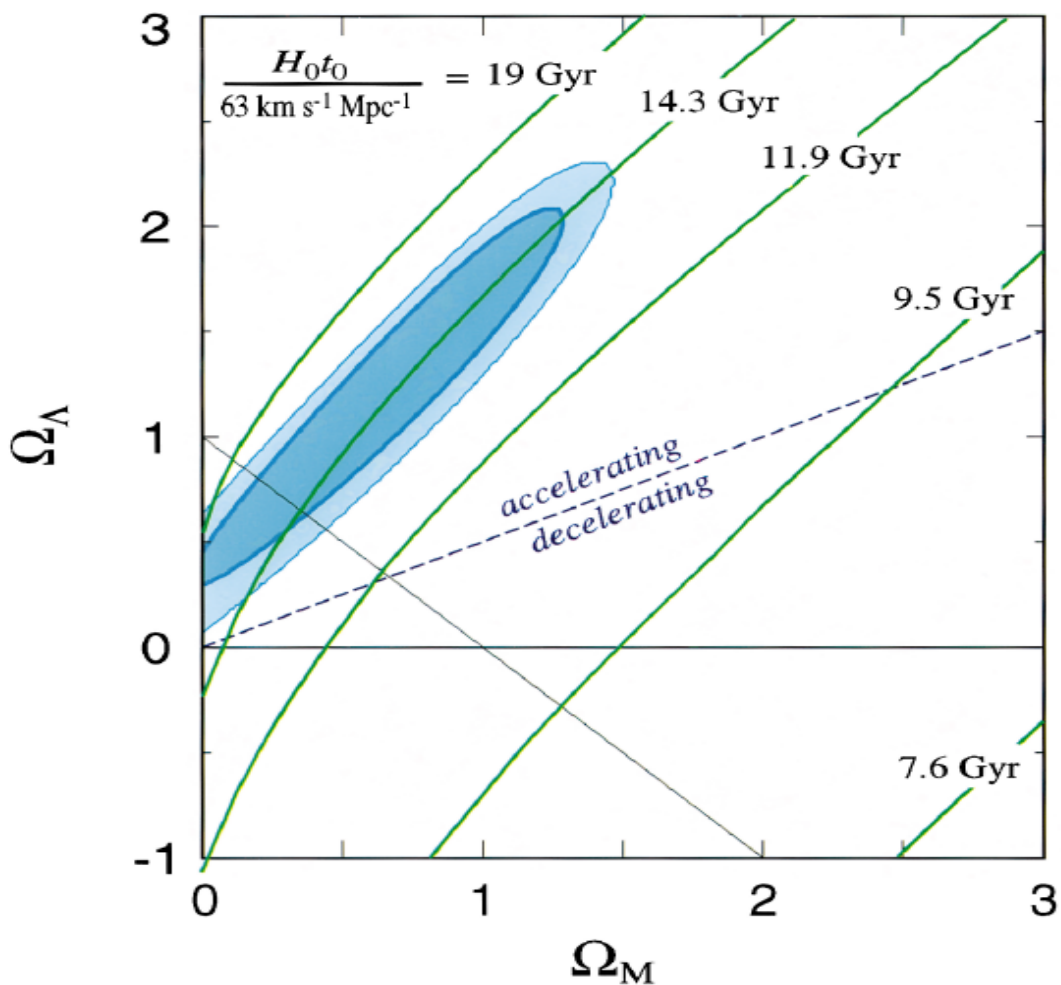
respectivamente, lo cual conlleva a inferir de un universo plano que se acelera indefinidamente.



La grafica anterior (la cual es la figura 4 de Astier et al. 2006), se observa que el mejor ajuste del modelo cosmológico corresponde a un universo plano con una densidad de materia relativamente baja, esto es, $\Omega_m = 0.26$ y $\Omega_\Lambda = 0.74$.

Ramón Molina

Se puede deducir la edad del universo relativa al tiempo de Hubble, H_0^{-1} dentro de las regiones de certidumbre dentro del gráfico Ω_m vs. Ω_Λ . Se observa que estas regiones vienen a ser casi paralelas a las isócronas de edades constantes. Para cualquier valor de la constante de Hubble menor a $70 \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, implica que la edad del universo es mayor a 13 Gaños.



Cuando se integra sobre Ω_m y Ω_Λ , el mejor ajuste de la edad en unidades del tiempo de Hubble es $H_0 t_0 = 0.93 \pm 0.06$, o su equivalente, $t_0 = 14.5 \pm 1.0$ ($0.63 / h$) Gaños. Por otra parte, la edad sería un tanto mayor para el universo plano, esto

Supernovas IA como trazadora de la energía oscura (Parte II)

es, $H_0 t_0 = 0.93 + 0.06 / - 0.07$, o su equivalente, $t_0 = 14.9 + 1.4 / - 1.1$ (0.63 / h) Gaños.

Algunas de las incertidumbres sistemáticas

Algunas incertidumbres sistemáticas que aparecen en la determinación de las constantes Ω_m y Ω_Λ , pueden ser descritas cualitativamente a continuación:

- La extinción extragaláctica A_R , puesto que es muy probable que algunas SN se vean oscurecidas por el polvo de las galaxias progenitoras.
- La incertidumbre en el exceso de color $E(B-V)$, ya que a pesar de que las incertidumbres promedios para SN de bajo y alto redshift son muy similares, existen algunas fuentes extra de incertidumbre para SN de alto redshift, que proviene del sistema en reposo de la banda visual V. Las incertidumbres en la banda B son muy pequeñas.
- El sesgo de Malmquist, la cual se refiere a la tendencia de encontrar aquellos miembros mas luminosos dentro de una distribución a grande distancias (sobre una búsqueda a magnitud límite), esto parecería sesgar los resultados hacia valores mayores de Ω_m y, valores mas bajo de Ω_Λ .
- Las lentes gravitacionales, puesto que la masa del universo no está distribuida de manera homogénea, existe una fuente de potencial que incrementa la dispersión en la magnitud, actuando como una lente que amplifica o disminuye la luz de las SN.
- La evolución de la estrella progenitora (poseen distintas masas, metalicidades) que afectan la curva de luz.

Valores tabulados de las constantes cosmológicas

Ramón Molina

La siguiente tabla nos señala los distintos valores obtenidos de las constantes cosmológicas obtenidas a través de SN Ia por varios autores.

Autores	Muestra utilizada	Constante Ω_m	Constante Ω_Λ	Ecuación de estado w
Riess et al. (1998)	13 SN Ia	0.32 ± 0.10	0.68 ± 0.10	
Perlmutter et al. (1999) P99	47 SN Ia	$0.25 / + 0.08$ $/ - 0.07$	0.75 ± 0.07	-1
Knop et al. (2003)	11 SN Ia + 47 SN-P99	$0.25 / + 0.07$ $/ - 0.06$	$0.75 / + 0.06$ $/ - 0.07$	$-1.05 / + 0.15$ $/ - 0.20$
Tonry et al. (2003)	8 SN Ia + 230 SN Ia	0.28 ± 0.05	0.72 ± 0.05	
Riess et al. (2004)	16 SN Ia + 170 SN Ia	$0.29 / + 0.05$ $/ - 0.03$		$-1.02 / + 0.13$ $/ - 0.19$
Astier et al. (2006)	71 SN Ia	0.263 ± 0.021		-1.023 ± 0.090
Fabris et al. (2006)	71 SN Ia	$0.309 / + 0.082$ $/ - 0.072$		-1
Fabris et al. (2006)	71 SN Ia	$0.526 - 0.535$		

Conclusiones

El resultado principal en el estudio de las constantes cosmológicas a través de SN Ia de bajo y alto redshift, es la convergencia del valor de la densidad de energía total a la unidad, esto es, $\Omega_T \sim 1$, lo cual conlleva a inferir que el universo es plano. Los trabajos mas recientes bajo este tipo de técnica señalan, que se favorece a un universo con una densidad de baja masa $\Omega_m \sim 0.3$ y, que existe una contribución dominante de la constante cosmológica, denominada energía de vacío que gobierna la repulsión cósmica.

Por otra parte, se observa de los trabajos recientes que a medida de que el número de SN Ia aumenta progresivamente, los resultados arrojados concuerdan

Supernovas IA como trazadora de la energía oscura (Parte II)

con los obtenidos por R98 y P99. Una comprobación contundente al modelo cosmológico Λ CDM, sería corroborado por el satélite SNAP (Supernova / Acceleration Probe), el cual se esperaría que midiera miles de SN con $z > 1.7$ y, en donde, se espera que las SN sean caracterizadas con alta precisión.

Referencias Bibliográficas

Hamuy, M. et al. (1995) AJ, 109, 1

Hamuy, M. et al. (1996) AJ, 110, 54

Phillips, M. M. (1993) ApJ, 413, L105

Reiss, A. et al. (1995) ApJ, 473, 88

Branch, D. et al. (1997), in Thermonuclear Supernovae, ed. P. Ruiz-Lapuente, R. Canal & J. Isern (Dordrecht: Kluwer), 715

Nugent, P. et al. (1995) ApJ, 455, L147

Fabris, J. C. et al. (2006) astro-ph/0606171