

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

Nada es demasiado bello para ser cierto, siempre y cuando sea consecuente con las leyes de la naturaleza.

Michael Faraday

Introducción

Desde que Edwin Hubble en 1923 presentó evidencia de que las galaxias se estaban separando después del evento conocido como la gran explosión (Bing Bang), los cosmólogos se habían intrigado por conocer dos magnitudes fundamentales como lo son: la velocidad de expansión del Universo y, a su vez, la velocidad con que dicha expansión se va frenando.

Los intentos por medir ambas magnitudes, partiendo desde diferentes observables distribuidos a distintas escalas cósmicas, conllevaron a incertidumbres en la determinación de la constante de Hubble H_0 (reflejando variaciones en las distancias cosmológicas), quedando abierta la posibilidad de estimar la densidad de materia, tal que, le permitiera encontrar el parámetro de desaceleración y, por ende, señalar la probable geometría (abierta, cerrada o plana) del Universo.

Seis décadas después, Perlmutter y colaboradores sugieren aplicar una nueva técnica, que le permitiría calcular las distancias basándose en la luz proveniente de

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 I)

las supernovas (SN). Estudios tempranos habían sugerido la idea de que las SN podrían ser usadas como “luminarias estándares” para medidas cosmológicas. Sin embargo, las observaciones para las distintas clases de SN, condujeron a concluir, que sus brillos no eran iguales para todas ellas, en consecuencia, se llegarían a afectar seriamente las medidas de las distancias cosmológicas. En tal sentido, Perlmutter y colaboradores pensaron en usar un tipo de SN, que tuviera un patrón definido de su espectro tal que las hicieran identificables; de manera que fueron escogidas para tal fin, las supernovas tipo Ia (SN Ia).

Según Tammann (1979) y Colgate (1979), si se lograra establecer una escala en distancia o, en su defecto, una escala en magnitud para las SN Ia a bajo redshift (z)², estas podrían ser usadas para medir H_0 , mientras que, para SN Ia de alto redshift, las mismas podrían ser utilizadas en la determinación del parámetro de desaceleración.

De acuerdo a Branch (1998), en la década de los 80 la constante H_0 llega a ser medida, utilizando para esto, una subclase homogénea de SN Ia previamente identificada. Por otra parte, fueron frustrados para la época, los intentos por medir el parámetro de desaceleración, principalmente, por falta de medidas de SN Ia de alto redshift.

El Proyecto Cosmológico Supernova (PCS) creado en 1998 y liderizado por Perlmutter y colaboradores, plantearon resolver dicho problema. La meta principal de este proyecto, estaba dirigido a la determinación de los parámetros cosmológicos del Universo usando la relación magnitud – redshift, que serían obtenido directamente de medidas fotométricas y espectroscópicas de las SN Ia.

² Corrimiento hacia el rojo

Ramón Molina

Goobar y Perlmutter (1995) muestran la posibilidad de separar la contribución de la densidad de masa Ω_m y, la constante cosmológica Λ , asociada a un cambio en la tasa de expansión, usando para ello SN Ia dentro de un rango de redshift. A través de técnicas de instrumentación, análisis y estrategias de observación, fue posible lograr un estudio sistemático de un conjunto de SN Ia con alto redshift, de manera que, para el comienzo del año 98, ya se había logrado descubrir mas de 75 SN Ia con redshift que variaban desde $z = 0.18 - 0.86$.

Una presentación del análisis de la técnica, la posible identificación de errores sistemáticos y estadísticos y, los primeros resultados basados en siete SN Ia con redshift $z \sim 0.4$ fueron dados por Perlmutter y et. al. (1997e). Estos primeros resultados, conllevan a una región de certidumbre que sugiere un Universo plano, con $\Lambda = 0$, pero con grandes incertidumbres.

Perlmutter y et. al. (1998b) añade una SN Ia a la muestra con $z \sim 0.83$ de observaciones hechas con el Telescopio Espacial Hubble y el Telescopio Keck de 10 m, lo cual provee, la primera demostración de que el método logra separar las contribuciones de Ω_m y Λ , respectivamente.

Este análisis ofrece evidencias preliminares para un Universo, con una densidad de baja masa y, con un ajuste cuyo mejor valor es,

$$\Omega_m = 0.2 \pm 0.4,$$

asumiendo $\Lambda = 0$.#

#

Un trabajo independiente realizado por Garnavish y et. al. (1998a), basado en tres SN Ia con $z \sim 0.5$ # y, una con $z = 0.97$, también sugiere una densidad de baja masa, con su mejor ajuste de

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

$$\Omega_m = -0.1 \pm 0.5,$$

para $\Lambda = 0$.

Perlmutter y et. al. (1997f), presenta un análisis preliminar de 33 SN Ia de alto redshift, señalando que obtiene una región de certidumbre donde señala un Universo que se acelera. Reiss y et. al. (1998) basado en 10 SN Ia de alto redshift que le fueron agregado a la muestra de Garnavish et al. (1998a) llegan a la misma conclusión.

Perlmutter y et. al. (1999) usando un catalogo que contenía ~ 50 SN Ia con bajo y alto redshift, revelaron que el parámetro de desaceleración es negativo, afirmando con esto, que el Universo se acelera. Un mes más tarde, Reiss y colaboradores expusieron sus resultados llegando a converger a la misma respuesta. A los resultados de ambos grupos, con dos proyectos observacionales diferentes, les fueron reconocidos como el mayor descubrimiento de año por la revista Science. En la actualidad, más de 300 SN Ia han sido identificadas (alcanzando $z \sim 2$) y, se mantiene como conclusión de que el parámetro de desaceleración, sigue siendo negativo (Tonry y et. al. 2003). Desde entonces, se ha presentado una extensa discusión acerca de la calidad de los datos medidos, lo cual ha conducido a la restricción de la muestra a tan sólo 150 SN Ia, y que es llamada “gold simple” (Riess 2004). Una fuente de datos más reciente, conlleva a la llamada “legacy sample” que contiene cerca de 80 SN Ia con una alta calidad en las medidas (Astier y et. al. 2006). Por lo tanto, una determinación precisa de los parámetros cosmológicos, los parámetros de Hubble, etc., necesariamente requiere de una fuerte escogencia en la selección de la muestra. Además, ya es un hecho, que gran parte de la comunidad de cosmólogos acepten la aceleración presente del Universo.

Ramón Molina

Cuando se combinan medidas indirectas de la anisotropía del fondo de microonda cósmico, con la estructura a gran escala y datos de SN Ia, un modelo cosmológico estándar, señala que el Universo es casi plano $\Omega \sim 1$, con un parámetro de densidad de materia (presión efectiva cero) del orden de $\Omega_m \sim 0.3$ (Tegmark et al. 2004). Se piensa que un fluido exótico, con presión negativa, llena el Universo, generando un efecto repulsivo y que ha sido llamado “energía oscura“, la cual tiene un parámetro de densidad de $\Omega_\Lambda \sim 0.7$. Este fluido exótico conlleva a una expansión acelerada, manteniendo al mismo tiempo una distribución lo bastante suave.

El primer candidato a representar a esta energía oscura es la constante cosmológica Λ , introducida por Albert Einstein en las ecuaciones de la Relatividad General, la cual hace frente a varios problemas bien conocidos. Más recientemente, otros candidatos han sido estudiados en la literatura como lo son: la quintaesencia (quintessence), la esencia-k (k-essence), el gas Chaplygin, entre otros. Para una revisión de estas propuestas se debe revisar a Sahni (2004).

Hannestad y Mortsell (2004), Alam et al. (2004), Allen y et. al. (2004) sostienen la existencia de un campo fantasma (esto es, un campo con una gran presión negativa tal que toda condición de energía, sea violada) que conlleva al mejor ajuste de los datos observacionales. Un campo fantasma, implica una singularidad en un tiempo futuro propio y finito, que ha sido llamado el “big rip“, en donde la curvatura y la densidad diverge. Sin embargo, mas detalles teóricos y análisis observacionales deben ser hechos para verificar este escenario.

La mayoría de los estudios hechos hasta ahora, conlleva a la suposición de una simple relación entre la presión y la densidad expresada en una representación hidrodinámica que viene dada por

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

$$p = \omega \rho^\alpha$$

La quintaesencia, como los otros candidatos a la energía oscura, señala que ω varía con el redshift y , no es una constante. Los campos fantasmas podrían ser representados por $\alpha = 1$, $\omega < -1$. En consecuencia, debido a la alta naturaleza especulativa de la componente de la energía oscura, varias posibilidades han sido consideradas en la literatura, desde un punto de vista fundamental o fenomenológico.

El interés que representa esta monografía, es llevar a cabo una revisión de artículos referidos al tema cosmológico que abarque los últimos siete años, sobre todo, en la determinación de las constantes cosmológicas.

Supernovas tipo Ia como “luminaria estándares”

Las SN son vastas explosiones en la que estalla una estrella completa. Aparece como una “nueva estrella” cerca de la galaxia de la que son miembros y, son extremadamente brillantes, rivalizando, por unos pocos días, con la emisión de la luz combinada de todo el resto de las estrellas en la galaxia.



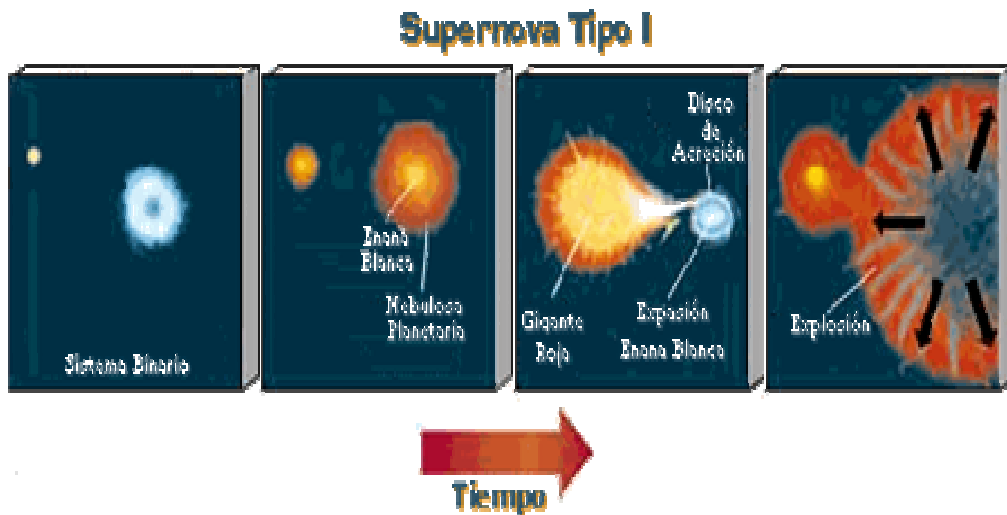
Las SN se clasifican en dos tipos diferentes por sus distintas historias evolutivas. Las SN tipo I resultan de la transferencia de masa dentro de un sistema

Ramón Molina

binario que consiste de una estrella enana blanca y una estrella gigante en evolución. Por otra parte, las SN tipo II son, en general, estrellas masivas que implosionan como consecuencia del colapso gravitacional cuando se vence la presión interna de dichas estrellas.

Los astrónomos por alguna razón han creído que la intensidad del pico de luz de una SN, es siempre aproximada, de manera equivalente a una magnitud absoluta sensible al azul $M_B = -19.6$ mag. Así, si observamos una SN tipo Ia en una galaxia distante y se le mide la intensidad de su pico de luz, se puede usar la ley inversa del cuadrado para deducir su distancia y, por tanto, inferir la distancia de su galaxia progenitora.

La siguiente figura muestra un esquema evolutivo con el tiempo de la formación de una SN del tipo I.

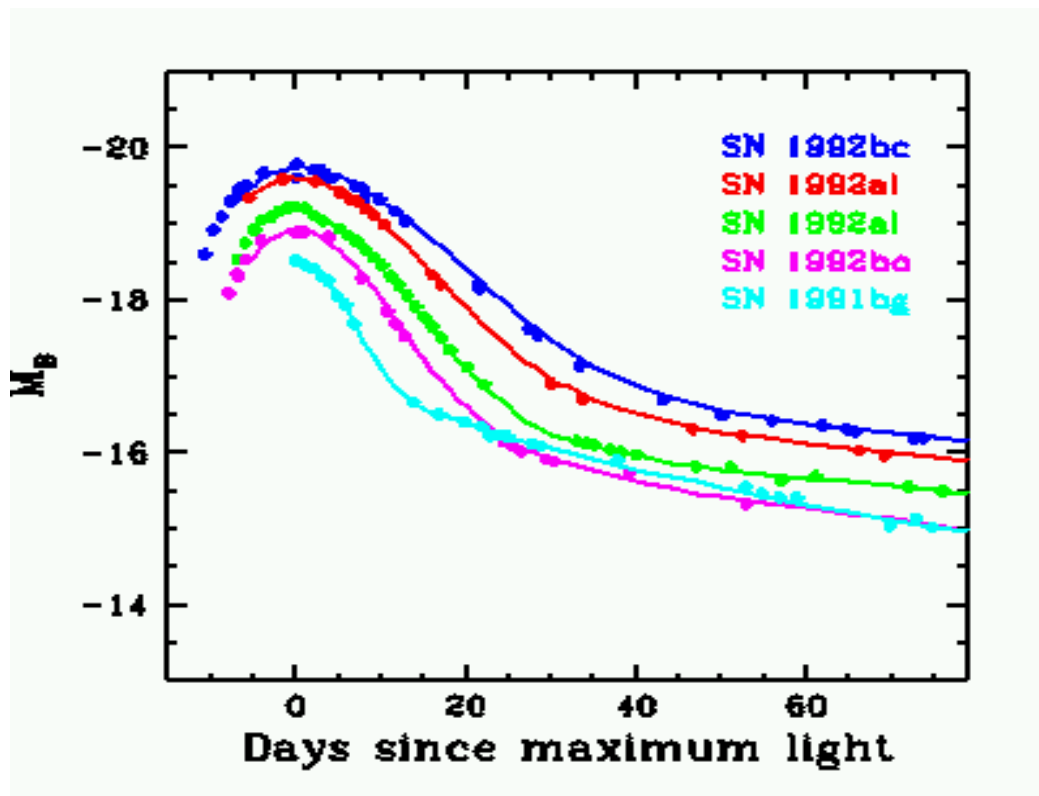


Debido a que las SN Ia son muy brillantes, es posible verlas a grande distancias ~ 1000 Mpc (Mega parsec, donde $1\text{pc} = 3.084 \times 10^{16}$ m), la cual es una fracción significativa del radio del universo conocido.

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

Sin embargo, la curva de luz para cada SN Ia individualmente, no tiene el mismo brillo intrínseco o en pocas palabras, no presenta un comportamiento de luminarias estándares, tal como se ve en la siguiente figura. En ese sentido, se hace necesaria una estandarización de las curvas de luz tanto para fuentes de bajo y alto redshifts.

En esta figura se representan a diferentes curvas de luz de SN Ia de bajo redshift que provienen de la fuente de Calán/Tololo y, que fueron ubicadas a una distancia de 10 pc.



Por otra parte, en la determinación del redshift para las SN Ia descubiertas, se utilizaron para ello, las líneas estrechas de la galaxia progenitora, mas bien, que de las anchas líneas provenientes de las SN.

Ramón Molina

Determinación de las constantes cosmológicas Ω_m y Ω_Λ a partir de la relación magnitud – redshift

Dentro de los modelos cosmológicos de Fridmann-Lemeitre, la magnitud bolométrica aparente $m(z)$, de una luminaria estándar (la cual posee una magnitud absoluta bolométrica M) a un redshift dado, es una función de las constantes cosmológicas; densidad de energía $\Omega_\Lambda = \Lambda / (3 H_0^2)$ y, la densidad de masa Ω_m , esto es

$$m(z) = M + 5 \log d_L(z; \Omega_m, \Omega_\Lambda, H_0) + 25, \quad (1)$$

La ecuación (1) puede escribirse de nuevo al cambiarse la distancia de la luminosidad d_L , por una parte de la expresión de la distancia de la luminosidad $D_L = d_L H_0$, en donde H_0 , es la constante de Hubble en unidades de $\text{Km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$.

Así, quedando

$$m(z) - M' = 5 \log D_L(z, \Omega_m, \Omega_\Lambda) \quad (2)$$

En donde, M' es el intercepto de la línea de Hubble conocida como la magnitud del “**punto cero**” y que tiene un valor

$$M' = M - \log H_0 + 25 \quad (3)$$

El punto cero puede ser medido de la magnitud aparente y el redshift, para objetos estándares de bajo redshift.

A partir de la ecuación (3), si se tiene un conjunto de magnitudes aparentes y de medidas de redshift para luminarias con alto redshift y, por otra parte, si se tiene un conjunto similar de medidas de estándares de bajo redshift que me permita determinar M' , entonces, podemos encontrar los mejores ajustes de Ω_m y Ω_Λ .

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

Un procedimiento similar para determinar ambas constantes cosmológicas, podría ser válido, si se ajustan simultáneamente las medidas de magnitudes efectivas previamente corregidas y de redshift para estándares de bajo y alto redshift, manteniendo como parámetro libre a M' , el cual, es también derivado a través del ajuste.

La función distancia de la luminosidad $d_L(z; \Omega_m, \Omega_\Lambda, H_0)$, se expresa como:

$$d_L(z; \Omega_m, \Omega_\Lambda, H_0) = \frac{c(1+z_0)}{H_0 \sqrt{|k|}} \Psi(\sqrt{|k|} \int_0^z \left[(1+z')^2 (1 + \Omega_m z') - z' (2+z') \Omega_\Lambda \right]^{-1/2} dz') \quad (4)$$

Aquí, la función para $\Omega_m + \Omega_\Lambda > 1$, $\psi(x)$ se define como $\sin(x)$ y $k = 1 - \Omega_m - \Omega_\Lambda$; para $\Omega_m + \Omega_\Lambda < 1$, $\psi(x)$ se define como $\sinh(x)$ y k ; y para $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$, $\psi(x) = x$ y $k = 1$.

Las calibraciones que se realizan para las SN Ia a bajo y alto redshift, los diferentes valores de las constantes cosmológicas, la edad del universo y algunas incertidumbres presentes en la obtención de las constante Ω_m, Ω_Λ se hará llegar en una próxima entrega.

Referencias Bibliográficas

Tammann, G. A. (1979), in ESA/ESO Workshop in Astronomical Uses of the Space Telescope, ed. F. Macchetto, F. Pacini and M. Tarenghi (Geneva: ESO), 329

Ramón Molina

- Colgate, S. (1979) *ApJ*, 232, 404
- Branch, D. (1998) *ARA&A*, 36, 17
- Goobar, A. y Perlmutter, S. (1995) *ApJ*, 450, 14
- Perlmutter, S. y et. al. (1997e) *ApJ*, 483, 567
- Perlmutter, S. y et. al. (1998b) *Nature*, 391, 51; erratum 392, 311
- Garnavish, P. y et. al. (1998a) *ApJ*, 493, L53
- Reiss, A. y et. al. (1998) *AJ*, 116, 1009
- Perlmutter, S. et al. (1997f) *BAAS*, 29, 1351
- Perlmutter, S. y et. al. (1999) *ApJ*, 517, 565
- Tonry, J. L. (2003) *ApJ*, 594, 1
- Riess, A. G. (2004) *ApJ*, 607, 665
- Astier, P. y et. al. (2006) *A&A*, 447, 31
- Tegmark, M. (2004) *ApJ*, 606, 702
- Sahni, V. (2004) Dark matter and dark energy, astro-ph/0403324
- Hannestad, S. y Mortsell, E. (2004) *JCAP*, 0409, 001
- Alam, U., Sahni, V. Saini, T. D. y Starobinsky, A. A. (2004) *MNRAS*, 354, 275