

# Análisis de las muestras de supernova SDSS-II y SNLS usando el módulo emcee de Python

Moreno José, De la Cruz Echeveste Oscar, Gutiérrez Rivera Salma Patricia, Escobedo Malacara Salvador, Cantero Valadez Luis Eduardo

**Abstract**—El presente trabajo, se centra en el análisis de los datos obtenidos por el telescopio óptico SDSS-II (Sloan Digital Sky Survey), localizado en Nuevo México en colaboración con el SNLS (SuperNova Legacy Survey). Los cuales tienen como objetivo detectar supernovas de tipo Ia con un alto corrimiento al rojo con fines de estudios cosmológicos. La importancia en el estudio de estos sistemas binarios es debido a que poseen una luminosidad consistente, por la uniformidad en sus masas y que con el tiempo, pueden desencadenar en un proceso de explosión. Se cree que este fenómeno podría resultar clave para el entendimiento de la energía oscura.

## I. INTRODUCCIÓN

LAS supernovas tipo Ia (SNe Ia) se han convertido en una herramienta excepcional en la cosmología moderna. Debido a su alta luminosidad, se utilizan para imponer restricciones a los parámetros cosmológicos, y hasta ahora proporcionan la única evidencia directa de la existencia de energía oscura (Riess et al. 1998; Perlmutter et al. 1999; Leibundgut 2001); los proyectos como el SDSS-II y el SNLS se utilizan para la detección y estudio de estos eventos de forma directa o indirecta.

SNLS tuvo como objetivo detectar SNe Ia con alto desplazamiento al rojo para estudios cosmológicos; en un programa de cinco años, de 2003 a 2008, SNLS cumplió su objetivo y pudo detectar y medir con precisión varios cientos de SNe Ia con desplazamientos al rojo de 0.2 a 1.0, que se compararon con alrededor de 50 eventos de los experimentos anteriores. Esta gran muestra permitió que la cuestión de la aceleración tardía de la tasa de expansión del universo se refinara con una mejor precisión y una metodología sofisticada. Esto hizo que el SNLS en una serie de publicaciones, tuviera un impacto considerable en la comunidad internacional de cosmología.

Las mediciones de la estructura a gran escala en los mapas SDSS de galaxias, cuásares y gases intergalácticos se han convertido en un pilar central del modelo cosmológico estándar que describe nuestra comprensión de la historia y el futuro del universo. Los datos de SDSS han ayudado a demostrar que el universo está dominado por materia oscura invisible y energía oscura, y que su estructura está fuertemente influida por fluctuaciones cuánticas en el cosmos temprano.

El proyecto denominado JLA (joint light-curve analysis) tiene como objetivo mejorar precisión fotométrica de los estudios obtenidos con el SDSS-II y SNLS, determinar con mayor rigor las incertidumbres en los modelos de curva de luz de las SNe Ia e incluir la muestra espectroscópica completa de SNe Ia del SDSS-II en la formación de la curva de luz y del análisis cosmológico.

## II. MAIN PART

La estimación de la distancia con SNe Ia se basa en la observación empírica de que estos eventos forman una clase homogénea cuya variabilidad restante está razonablemente bien captada por dos parámetros. Un parámetro describe el tiempo de estiramiento de la curva de luz ( $X_1$ ), y el otro describe el color de la supernova en su máximo brillo ( $C$ ). Específicamente, el estimador de distancia utilizado en este análisis asume que las supernovas con color, forma y ambiente galáctico idénticos tienen en promedio la misma luminosidad intrínseca para todos los desplazamientos al rojo. Esta hipótesis se cuantifica mediante un modelo lineal, el cual produce un módulo de distancia:

$$\mu = 5 \log_{10}(d_L/10pc) \quad (1)$$

$$\hat{\mu} = m_B^* - (M_B - \alpha \times X_1 + \beta \times C) \quad (2)$$

donde  $m_B^*$  corresponde a la magnitud máxima observada en la banda B del marco de reposo y  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $M_B$  son parámetros molestos en la estimación de la distancia. Se determinó que tanto la magnitud absoluta  $M_B$  como el parámetro  $\beta$  dependen de las propiedades de la galaxia huésped, aunque el mecanismo no se comprende completamente.

$$25 + 5 \log_{10}(D) \quad (3)$$

## III. METODOLOGÍA

Usando la versión de Python 2 para una distribución libre de Ubuntu se hizo uso del módulo emcee versión 2.2.1 el cual esta basado en algoritmos de tipo Markov chain Monte Carlo los cuales, por medio de una estimación de máxima verosimilitud se lograron obtener los parámetros que describen el modelo para la distancia presentado anteriormente. Además asumiendo una geometría turbulenta de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker se fijó la constante de Hubble.

Para 300 caminadores y 2000 movimientos, además de un smoothing Gaussiano, se obtuvieron las regiones de convergencia que se muestran en la Fig. 1. Los centros de éstas se encuentran en concordancia con los valores obtenidos en adición por el método Nelder-Mead, el cual utilizó un vector inicial  $\vec{\theta}_i = [M_b^i, \Delta M_b^i, \alpha^i, \beta^i, \Omega_m^i]$ , con los valores  $[-19, -0.065, 0.125, 4.5, 0.289]$  respectivamente.

El likelihood utilizado por el método emcee, consta de 4 parámetros a determinar por el modelo y uno asociado a

los datos experimentales. Matemáticamente el logaritmo del likelihood puede ser escrito de la siguiente forma:

$$\ln p(y | x, \sigma, \vec{\theta}) = -\frac{1}{2} \sum_n \left[ \frac{(y_n - \lambda(x_i, \vec{\theta}))^2}{s_n^2} + \ln(2\pi s_n^2) \right] \quad (4)$$

Utilizando el teorema de Bayes de la probabilidad condicional y considerando que se conoce un intervalo en el cual se sabe se encuentran los valores a estimar, se usa un prior plano en conjunto con el likelihood, el cual fue implementado como le sigue:

$$p(\vec{\theta} | x, y, \sigma) \propto p(M_b, \Delta M_b, \alpha, \beta) p(y | x, \sigma, \vec{\theta}) \quad (5)$$

TABLE I  
MEJOR AJUSTE  $\lambda_{CDM}$

$H_o$	$70 km s^{-1} Mpc^{-1}$
$M_b$	$-19.059 \pm 0.02$
$\Delta M_b$	$-0.082 \pm 0.035$
$\alpha$	$0.114 \pm 0.027$
$\beta$	$0.059 \pm 0.012$
$\Omega_m$	$0.376 \pm 0.05$

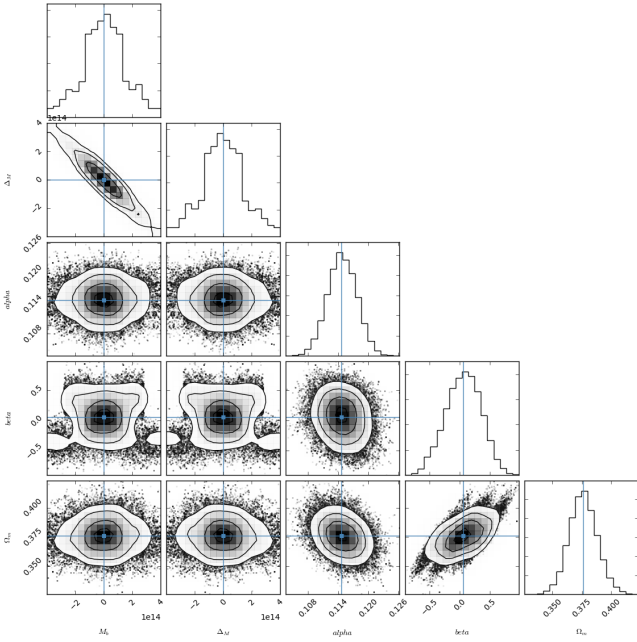


Fig. 1. Los contornos en escala de grises fueron obtenidos por la rutina de emcee, mientras que los valores señalados por los puntos azules se obtuvieron de la optimización del likelihood por medio del método Nelder-Mead

#### IV. RESULTADOS

Por medio del estimador que se muestra en la ecuación (1), y el par de conjuntos de valores, uno obtenido con el método de Nelder-Mead  $\hat{\mu}$  y el último, propuesto como ansatz para  $\mu_{CDM}$ , ambos, son comparados con los datos experimentales a partir del modelo de la ecuación (2).

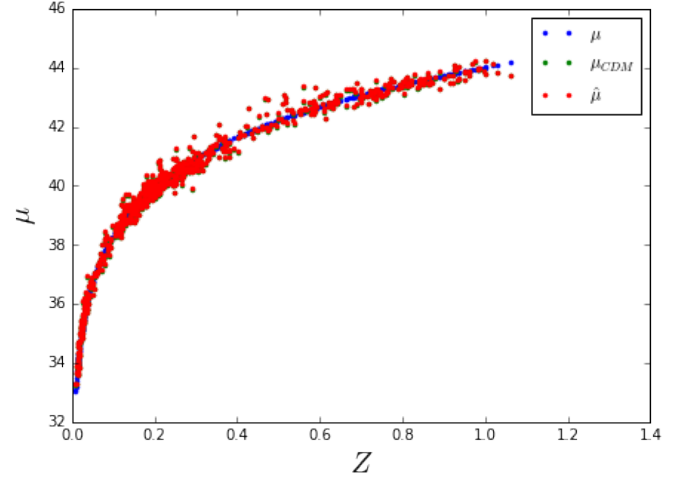


Fig. 2. Grfica  $z$  vs  $\mu$

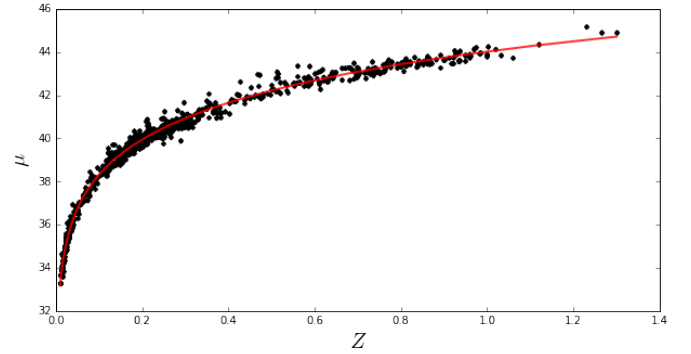


Fig. 3. Valores de  $\mu$  dados por los autores.

#### V. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos que se muestran en la tabla 1 en comparación con los publicados en artículo de M. Beutoule fueron considerablemente similares con excepción del parámetro  $\beta$ . Con estos resultados se logró lo esperado al obtener una primera aproximación del cálculo de los parámetros  $M_b$ ,  $\Delta M_b$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\Omega_m$  implementando el módulo emcee versión 2.2.1. Al comparar los valores de los parámetros obtenidos con este método y los resultados del artículo obtuvimos errores porcentuales de 0.01%, 36.66%, 18.57%, 98.12% y 30.1% para  $M_b$ ,  $\Delta M_b$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\Omega_m$  respectivamente. El valor de  $\beta$  no lo pudimos corregir por lo que se optó por reportarlo y no afectar los demás parámetros estimados. Si se consideran los factores que pudiesen afectar al cálculo en el programa, en principio, se espera una mejor similitud con los resultados del artículo.

#### REFERENCES

- [1] Beutoule et. al. Improved cosmological constraints from a joint analysis of the SDSS-II and SNLS supernova samples. <https://arxiv.org/abs/1401.4064>.