

# Curvas de luz de supernovas superluminosas: modelos hidrodinámicos

M. Orellana<sup>1, 2</sup>, M.C. Bersten<sup>3</sup> & O.G. Benvenuto<sup>3, 4</sup>

<sup>1</sup> Sede Andina, UNRN, Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Argentina

<sup>3</sup> Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

<sup>4</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

Contacto / morellana@unrn.edu.ar

**Resumen** / Recientemente se han detectado supernovas superluminosas (SNSLs) que brillan entre 10 y 100 veces más que las supernovas (SNs) normales. El origen físico de su extrema luminosidad permanece especulativo. Una de los mecanismos más populares invocados para explicarlas es el colapso de una estrella masiva para formar un magnetar. La SLSN se ve potenciada por la emisión dipolar de una estrella de neutrones altamente magnetizada, que rota rápidamente. La energía que pierde el magnetar provee el impulso y luminosidad de la SNSL. Estudiamos el efecto de la propagación de la onda de choque que utiliza el frenado del magnetar como mecanismo central. Aquí reproducimos el tratamiento analítico simplificado que se utiliza en la literatura, y lo utilizamos para comparar con los resultados de nuestro código hidrodinámico con tratamiento radiativo. Presentamos un estudio exploratorio sobre cómo el máximo de la de la curva de luz depende de los parámetros del magnetar y cómo estos pueden ser acotados mediante la comparación con las observaciones. A modo de ilustración, aplicamos el método a SN 2011kg.

**Abstract** / Superluminous supernovae (SLSNe) have only recently been detected. The physical origins of their extreme luminosity, a factor 10 to 100 times brighter than normal SNe, remains speculative. One popular mechanism invoked to explain SLSNe is that a magnetar is formed by the collapse of a massive star. The magnetar is a strongly-magnetized, rapidly-rotating neutron star that loses rotational energy via magnetic dipole radiation. That energy provides the extra kick and luminosity for the SLSN. We study the effect of the shock wave propagation through the envelope with the spindown of the magnetar as the central engine. First we reproduce the analytic simplified treatment that is popular in the literature and then compare the results from our radiative hydrodynamic code. The magnetar properties can be constrained through fitting of the observed light curve. As an illustration, we apply this method to SN 2011kg.

*Keywords* / supernovae: general — supernovae: individual: SN 2011kg

## 1. Introducción

Hace apenas una década que se conocen supernovas (SNs) cuya emisión es extrema en el sentido de superar ampliamente la luminosidad de las SNs usuales (Quimby et al., 2007). Gal-Yam (2012) provee una revisión del tema. Resulta sumamente interesante la posibilidad, por ahora especulativa, de que sean indicadoras de distancias, en cuyo caso permitirían explorar regiones más lejanas que las SNs (Quimby et al., 2011; Inserra & Smartt, 2014).

## 2. Supernovas potenciadas por magnetares

La propuesta de pulsares altamente magnetizados como mecanismo para inyectar energía en una SN excepcionalmente brillante se basa en que estos pierden energía rotacional a través de la emisión de radiación dipolar magnética a una tasa particularmente alta cuando acaban de formarse (Woosley, 2010).

Kasen & Bildsten (2010) plantearon en forma simplificada la inyección de energía en la masa eyectada a la cual consideran como una sola cáscara. Ello permite

calcular cómo evoluciona la luminosidad mediante una integral numérica simple:

$$L(t) = L_p \int_0^t \frac{1}{(1 + t'/t_p)^2} \exp\left(\frac{t'^2 - t^2}{2t_d^2}\right) \frac{t' dt'}{t_p^2}, \quad (1)$$

donde  $L_p$  es la energía rotacional inicial por unidad de tiempo,  $t_p$  el tiempo característico de frenado y

$$t_d = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{M_{ej}\kappa}{v_f c}\right)^{1/2} \quad (2)$$

es la escala temporal asociada a la difusión de la radiación en el material eyectado. Aquí  $\kappa$  es el coeficiente de absorción media de Rosseland, y  $M_{ej}$  la masa eyectada. La velocidad que alcanza dicha masa,  $v_f$ , puede estimarse suponiendo que la energía inicialmente inyectada por el magnetar y por la explosión se convierten en energía cinética. Dado que

$$t_p = \frac{3c^3 I P^2}{\pi^2 R^6 B^2} \quad \text{y} \quad L_p = \frac{4\pi^4 R^6 B^2}{3c^3 P^4}, \quad (3)$$

donde  $I \sim 10^{45} \text{ g cm}^2$  es el momento de inercia de la estrella de neutrones,  $R \sim 10 \text{ km}$  su radio\*,  $B$  es el campo

\*Estas propiedades son los valores medios utilizados normalmente; en realidad, existe un rango de valores posibles,

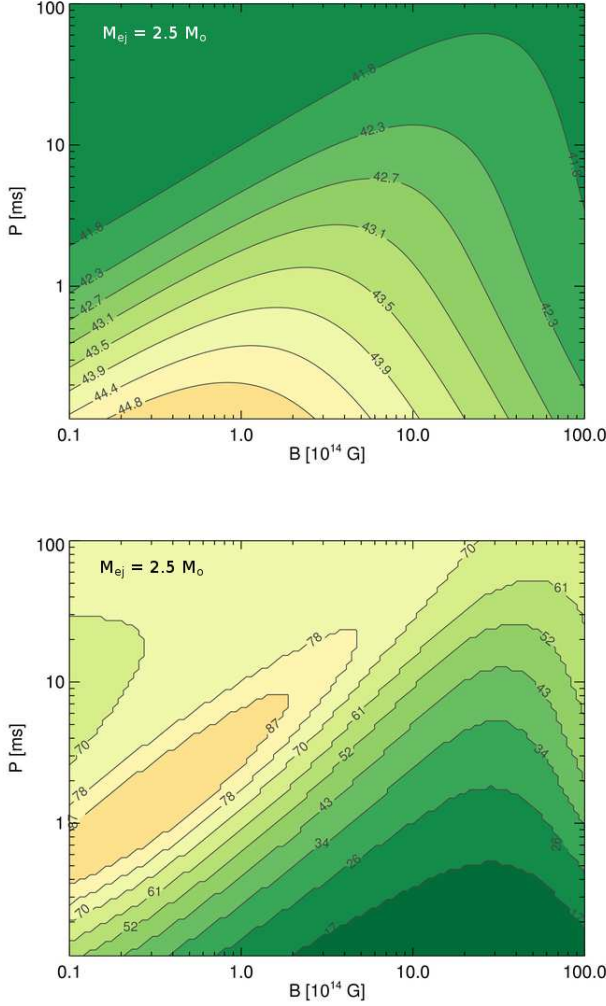


Figura 1: Arriba: contornos de igual nivel de la superficie  $\log(L_{\text{máx}})$  a partir de cálculos semianalíticos. Abajo: Ídem, para  $t_{\text{máx}}$ . Ambas magnitudes han sido calculadas suponiendo  $2\sin^2 i = 1$  y  $\kappa = 0.2 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  por dispersiones electrónicas en un material libre de hidrógeno, similar al que esperamos en SLSNs.

magnético que se supone constante, y  $P$  el período inicial, para alcanzar la potencia necesaria para una SLSN deben considerarse valores de  $B > 10^{13} \text{ G}$  y períodos del orden de milisegundos (Woosley, 2010). El límite que se ha establecido como máxima energía extraíble de un magnetar es de  $10^{53} \text{ erg}$  (Metzger et al., 2015).

En la Ec. (1) también es posible incorporar un término para representar el aporte energético debido al decaimiento de elementos radioactivos, Ni-Co-Fe, que normalmente potencia la curva de luz de una SN días después del máximo. Hemos incorporado ese término adicional para obtener un resultado más realista que el de Kasen & Bildsten (2010). Pueden entonces utilizarse como parámetros principales  $B$  y  $P$  del magnetar. Los valores de  $M_{\text{ej}}$  y de  $\kappa$  también son relevantes. Si el mag-

determinados al suponer una ecuación de estado para la estrella de neutrones.

netar es muy luminoso, la energía liberada por la masa de  $^{56}\text{Ni}$  resulta despreciable.

Una de las cantidades importantes para caracterizar una curva de luz,  $L(t)$ , es su máximo  $L_{\text{máx}} = L(t_{\text{máx}})$ . En la Fig. 1 se muestran contornos de igual valor de  $L_{\text{máx}}$  y  $t_{\text{máx}}$  para una masa eyectada fija de  $2.5 M_{\odot}$ , con un contenido de níquel de  $M(^{56}\text{Ni}) = 0.07 M_{\odot}$ .

### 3. Curvas de luz numéricas

Un magnetar lo suficientemente brillante puede impulsar al material eyectado a velocidades relativistas. El código desarrollado por Bersten et al. (2011) ha sido modificado para incorporar dichos efectos en la propagación de la onda de choque. Como es de esperar, los cálculos de la explosión de una SNSL muestran diferencias con respecto al modelo semianalítico simple. El tratamiento hidrodinámico permite conocer con cierto detalle los cambios que ocurren en la estructura de la estrella que explota (ver Bersten, este volumen). Hemos explorado el caso donde la masa eyectada no contiene hidrógeno y es el resultado de la evolución estelar, calculada por Nomoto & Hashimoto (1988) a partir de una estrella que en la secuencia principal tendría  $\sim 15 M_{\odot}$ .

La energía inyectada por el magnetar se suma a la de la explosión. En la práctica, es depositada en las cercanías del magnetar a partir de unos 10 segundos después que la energía cinética de la explosión (que es la de una SN usual,  $\sim 10^{51} \text{ erg}$ ) y se supone que esa energía es termalizada al ser depositada. Esta última hipótesis es incorporada en los trabajos del área, pero necesita de estudios detallados de los fenómenos que ocurren en la magnetósfera para ser corroborada.

Para una etapa siguiente de contrastación con las observaciones, hemos calculado curvas de luz variando los parámetros. En la Fig. 2 se muestran algunos ejemplos. En el panel izquierdo para  $P$  fijo la energía inyectada por el magnetar crece con el valor de  $B$ . Cuanto mayor sea aquella, mayor es la velocidad que se imparte a la fotosfera, pero a la vez se enfría más rápidamente. El resultado en la curva de luz no es totalmente intuitivo; por ejemplo, resulta para  $B = 10^{16} \text{ G}$  que  $L$  a  $t > 50$  días es menor que para la misma SN sin pulsar.

### 4. Aplicación a una SNSL observada

Inserra et al. (2013) presentaron curvas de luz en bandas fotométricas de la SN descubierta por el *Palomar Transient Factory*, PTF11rks (SN 2011kg), así como la curva bolométrica, que es contrastable con los resultados de nuestro código. Se trata de una SN tipo I-c, con  $z = 0.19$ . El estudio de estos autores arroja, del modelado con un magnetar,  $B = 6.8 \times 10^{14} \text{ G}$  y  $P = 7.5 \text{ ms}$ , para  $M_{\text{ej}} = 2.8 M_{\odot}$ .

A partir de nuestros cálculos, usando una grilla sin refinar de  $B$  y  $P$ , obtenemos el ajuste de la Fig. 3, donde se muestran los resultados del código hidrodinámico y de cálculo semianalítico. Se utiliza como modelo inicial una estrella evolucionada de He de  $4 M_{\odot} = M_{\text{NS}} + M_{\text{ej}}$  en total. Como puede observarse, la curva numérica difiere de los resultados del modelo semianalítico.

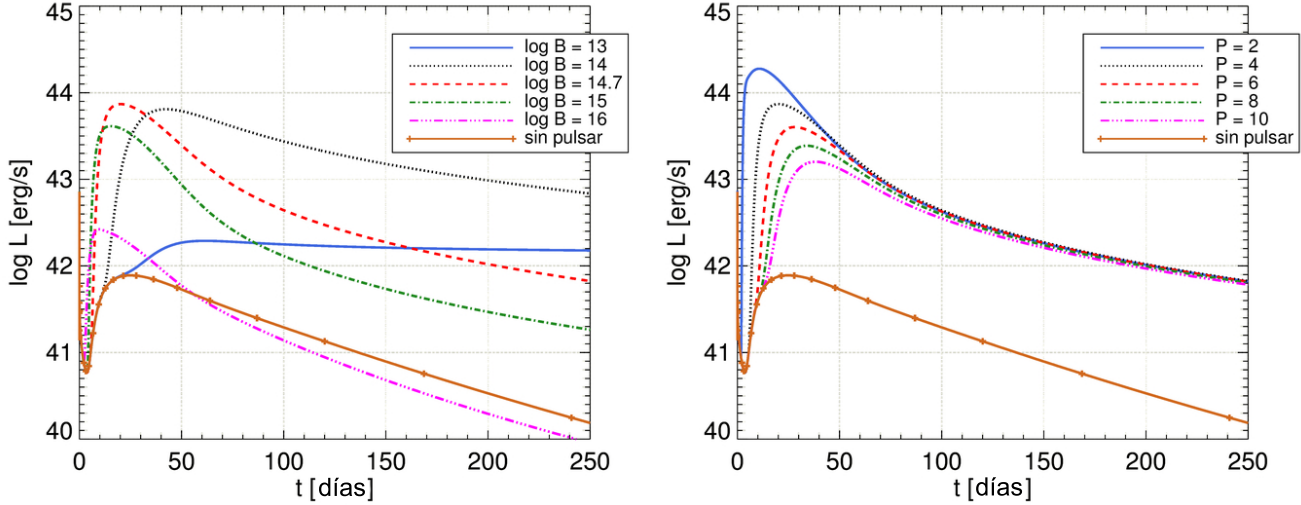


Figura 2: Ejemplos del efecto sobre la curva de luz al cambiar uno de los parámetros del magnetar. Izquierda: período fijo  $P = 4$  ms. El efecto de considerar diferentes valores del campo no es monótono. La leyenda indica  $B$  en gauss. Derecha: campo magnético fijo  $B = 5 \times 10^{14}$  G. La leyenda indica el período en milisegundos. En ambos paneles se muestra también una SN de iguales características pero sin magnetar.

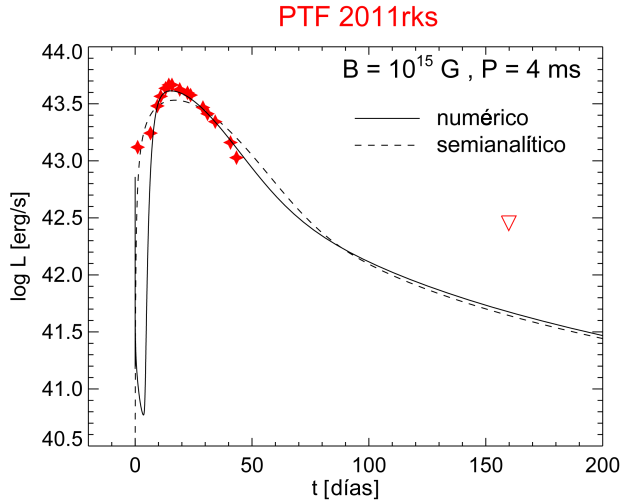


Figura 3: Resultado del mejor ajuste de la curva de luz bolométrica utilizando el código numérico de Bersten et al. (2011) modificado para incluir la inyección de energía del magnetar y efectos relativistas. También se muestra la curva semianalítica para los mismos valores de  $B$  y  $P$ , aunque para un mejor resultado debimos suponer  $\kappa = 0.1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ . El triángulo para  $t = 160$  días es una cota superior.

## 5. Conclusiones

Hemos verificado que los cálculos numéricos detallados reproducen el comportamiento general del modelo semianalítico, en respuesta a los parámetros básicos del magnetar. Son necesarios modelos más refinados para poder dar los parámetros del magnetar con mayor precisión a través del ajuste de la curva de luz. Por ello la combinación de ambos métodos (numérico y semi-analítico) resulta una poderosa herramienta a la hora de acotar los valores de  $B$  y  $P$  dentro de este modelo.

Mostramos para el caso concreto de la SN 2011kg un ajuste razonable a la curva de luz observada. Se planean estudios similares para un conjunto de SNSLs cuyos datos estén disponibles. Los detalles del tratamiento relativista implementado en el código, así como el efecto dinámico de la inclusión del magnetar como fuente central de energía, serán expuestos en otro trabajo.

*Agradecimientos:* Esta investigación fue parcialmente financiada por el proyecto 40B364 de la UNRN. Agradecemos al Kavli-IPMU por su cordial apertura y financiamiento de actividades científicas.

## Referencias

- Bersten M. C., Benvenuto O., Hamuy M., 2011, ApJ, 729, 61
- Gal-Yam A., 2012, Science, 337, 927
- Inserra C., Smartt S. J., 2014, ApJ, 796, 87
- Inserra C., et al., 2013, ApJ, 770, 128
- Kasen D., Bildsten L., 2010, ApJ, 717, 245
- Metzger B. D., et al., 2015, MNRAS, 454, 3311
- Nomoto K., Hashimoto M., 1988, Phys. Rep., 163, 13
- Quimby R., Höflich P., Wheeler J. C., 2007, ApJ, 666, 1083
- Quimby R. M., et al., 2011, Nature, 474, 487
- Woosley S. E., 2010, ApJL, 719, L204