



Magnetares como fuentes para potenciar supernovas peculiares

M. Orellana^{1,2} y M. C. Bersten^{2,3}

¹ *Universidad Nacional de Río Negro, Argentina*

² *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina*

³ *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

Contacto / morellana@unrn.edu.ar

Resumen / Hemos incorporado el efecto de la inyección de energía sostenida por un magnetar en las simulaciones hidrodinámicas de supernovas (SNe) de Bersten et al. (2011). La variación de las propiedades de la eyecta y del magnetar introducen cambios en la curva de luz (tiempo de aumento, luminosidad máxima, ancho). Mostramos los rasgos más importantes de las morfologías encontradas para las curvas de luz de una población sintética de SNe con y sin hidrógeno. Como parte del trabajo en curso, buscamos los parámetros que expliquen los datos observacionales de SN2018cow que es una SN brillante ($L_{\max} > 10^{44}$ erg/s) que a diferencia del general de las SNe superluminosas, fue muy cercana (60 Mpc). Ha llamado la atención dada la rápida evolución de su curva de luz. Ha sido objeto de numerosas campañas multifrecuencia y de debatidas ideas teóricas para explicarla. La propuesta de un magnetar no es nueva en este caso, pero sí el cálculo hidrodinámico, como mejora a propuestas más simplificadoras que se presentan en la literatura.

Abstract / We have incorporated the effect of the energy injection sustained by a magnetar into the hydrodynamic simulations of supernovae (SNe) by Bersten et al. (2011). The variation of the properties of the ejecta and the magnetar introduce changes in the light curve (rising timescale, maximum luminosity, width). We show the most important features of the morphologies found for the light curves of a synthetic population of SNe with and without hydrogen. As part of the work in progress, we are looking for the parameters to explain the observational data of SN2018cow which is a bright SN ($L_{\max} > 10^{44}$ erg/s) that, unlike the general case for superluminous SNe, was located very close (60 Mpc). It has drawn attention given the rapid evolution of its light curve. It has been the subject of many multi-frequency campaigns and several theoretical frames were debated in order to explain it. The idea of a magnetar is not new in this case, but hydrodynamic calculus is, as an improvement to more simplifying proposals presented in the literature.

Keywords / stars — supernovae: stars — supernovae: individual (SN 2018cow)

1. Introducción

En las últimas décadas los nuevos descubrimientos han ido poblando el espacio de parámetros de brillo y escala de tiempo de los eventos transitorios (Gal-Yam, 2019), algunos autores hablan de un zoológico de éstos (Inserra, 2019). Ciertos fenómenos extremos, clasificados como peculiares, desafían a los modelos clásicos y merecen estudios detallados (Milisavljevic & Margutti, 2018). Algunas supernovas superluminosas (SLSNe); supernovas 10 a 100 veces más brillantes que una SN común, son parte de este grupo (ver también Moriya et al., 2018).

Siendo de interés el poder explicar SLSNe como en Bersten et al. (2016), venimos trabajando en la exploración del escenario de inyección sostenida de energía provista por un magnetar que ya se ha formado por el colapso gravitacional de la estrella progenitora. Cuando el material eyectado ya se ha expandido, el magnetar como fuente extra de energía lo impulsa, llegando en ciertos casos hasta velocidades no despreciables con respecto a la de la luz. Por ello fue necesario, la inclusión de efectos relativistas al código hidrodinámico descripto

en Bersten et al. (2011). Los detalles de las correcciones implementadas, particularmente en la ecuación radiativa, se encuentran detallados en Orellana et al. (2018) junto con ejemplos del efecto dinámico y sobre la curva de luz (CL) resultante.

2. Estudios sistemáticos

La variación de las propiedades del material eyectado y del magnetar introducen cambios en la CL (tiempo de aumento, luminosidad máxima, ancho). En Orellana et al. (2018) estudiamos con mayor detalle el caso de las progenitoras ricas en hidrógeno, que tenía muy pocos antecedentes en la literatura. Presentamos resultados de nuestra exploración sistemática del espacio de parámetros físicos que mejor describen al magnetar (E_{rot}, t_p), que representan la energía rotacional inicial del magnetar y la escala de tiempo de frenado, respectivamente. Las distintas morfologías de CLs encontradas incluyen la predicción de supernovas de tipo *plateau* superluminosas. Maffione et al. (2019) investigaron luego, en base a esta muestra, la existencia de alguna correlación entre cantidades posiblemente observables

que caractericen las CLs y los parámetros del magnetar.

En la Fig. 1 se muestran las curvas de luz resultantes para estrellas progenitoras con y sin hidrógeno. Como la variación de los parámetros del magnetar no produce una respuesta sobre la CL en una única dirección, no se pretende una identificación individual, sino ilustrar el conjunto y diversidad de las CLs resultantes de la exploración de todo el rango de valores físicamente posibles: $E_{\text{rot}} \sim 10^{51-53}$ erg, $t_p \sim 0.03 - 30$ d. Cuando la estrella que explota no tiene H, no se desarrolla la etapa plateau.

Además de los parámetros mencionados, un factor determinante en la evolución de la CL es la tasa a la cual se produce la inyección de energía del magnetar. Este es un mecanismo central del modelo (deposición en las capas internas). De acuerdo a un modelo físico simple en el que la eyección se considera una sola capa (Shapiro & Teukolsky, 1983), la luminosidad inyectada es:

$$L(t) = \frac{E_{\text{rot}}}{t_p} \left(1 + \frac{t}{t_p}\right)^{-b}, \quad \text{con } b = \frac{n+1}{n-1}, \quad (1)$$

donde n es el índice de frenado del magnetar. Esto es, siendo Ω la velocidad angular de la estrella de neutrones, $\dot{\Omega} = -k\Omega^n$. Un valor canónico usualmente aceptado es $n = 3$ debido a emisión dipolar en vacío. Pero debe notarse que, en pulsares observados $1 < n < 2.8$ implicando $b > 2$ (Gaensler & Slane, 2006), y que los avances en la teoría de vientos de pulsares indican que su emisión no ocurre en vacío (por ejemplo, Arons, 2002); aunque cabe aclarar que no se han observado los detalles de emisión en etapas de formación reciente.

3. AT2018cow, más conocida como SN2018cow

El reporte de ATLAS* de la detección y primeros 18 días del inusual evento AT2018cow (Prentice et al., 2018) llamó la atención por su rápida evolución (crecimiento > 5 mag en ≤ 3 días); emisión óptica dominada por el azul y luminosidad máxima de $L_{\text{peak}} \sim 4 \times 10^{44}$ erg/s (Perley et al., 2019). Sucedió en uno de los brazos espirales de una galaxia a una distancia $d \simeq 61$ Mpc; lo que implica $z \simeq 0.014$. En comparación, lo usual ha sido $z \geq 0.1$ Villar et al. (2018) y se ha encontrado una tasa de SLSNe muy baja para $z < 0.5$ (Gal-Yam, 2019, y referencias). Por eso AT2018cow fue llamativa y mereció campañas de observación multifrecuencia (Margutti et al., 2019, entre otros) y búsqueda de ondas gravitacionales. La velocidad espectroscópica del material expulsado: $v \sim 0.13c$, es sub-relativista (Ho et al., 2019). La detección en rayos X parece indicar la acción de un mecanismo central (Rivera Sandoval et al., 2018). Observaciones de la caída posterior del brillo hacen descartar que haya sido potenciado por decaimiento de material radiactivo, mientras que Perley et al. (2019) proponen que se trata del primer evento de disrupción

* Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System

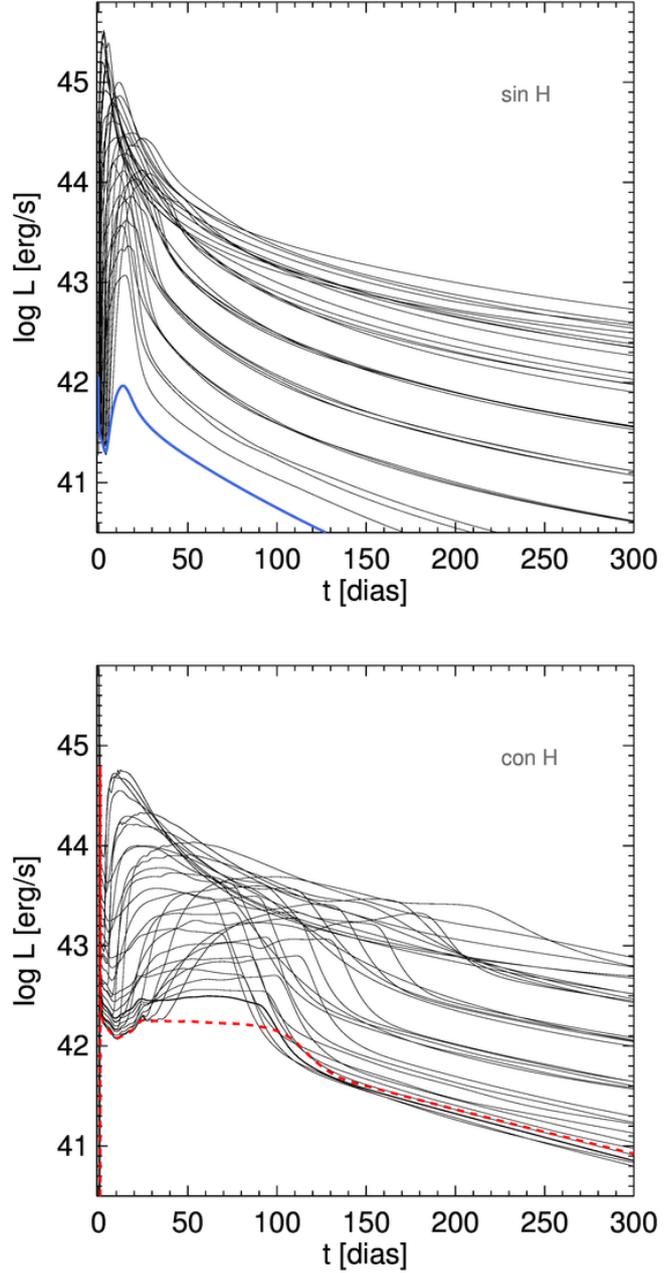


Figura 1: Curvas de luz para el magnetar canónico ($b = 2$), obtenidas para un progenitor de $M_{\text{ZAMS}} = 12 M_{\odot}$ (arriba) y $M_{\text{ZAMS}} = 15 M_{\odot}$ (abajo) provistos por Nomoto & Hashimoto (1988). En el panel superior, al momento de explotar la estrella tiene $\sim 3 M_{\odot}$, es pobre o deficiente en hidrógeno, y tiene helio en sus capas externas. En cambio, en el panel inferior el progenitor tiene $\sim 8 M_{\odot}$ y aún conserva parte del H. En ambos paneles, la curva de color corresponde al caso sin magnetar.

de una estrella por fuerza de marea (*Tidal Disruption Event*, TDE) observado en torno a un agujero negro de masa intermedia. Otras propuestas incluyen la fusión de dos enanas blancas (Lyutikov & Toonen, 2019), o una configuración particular de un *jet* en un escenario de envoltura común (Soker et al., 2019). Mientras que Fox

& Smith (2019) encontraron evidencia de una interacción con material circumestelar, mediante la detección de líneas de He.

4. SN2018cow – resultados preliminares

Buscamos un modelo que explique la CL óptica de SN2018cow. La idea de un magnetar no es nueva en este caso. Aplicando el modelo semianalítico simplificado de Kasen & Bildsten (2010), y asumiendo otras cantidades como la energía de la explosión y la opacidad del material, Prentice et al. (2018) ajustan un modelo de magnetar para los datos de los primeros 20 días, e infieren que la masa eyectada es realmente baja (más parecida al valor de una kilonova) $0.1\text{--}0.4 M_{\odot}$.

En trabajos anteriores hemos justificado la idea de realizar modelos hidrodinámicos como mejora a este tipo de modelos simplistas Orellana et al. (2016). En base a resultados como los de la Fig. 1, sumados a una exploración independiente del parámetro b , proponemos que para explicar la abrupta pendiente con la cual decrece el brillo de SN2018cow después del máximo, debe adoptarse un valor $b > 2$, junto con un progenitor sin H.

En la Fig. 2 presentamos los datos de Prentice et al. (2018), Perley et al. (2019) y de Ugarte Postigo (2018) cuyas barras de error muy pequeñas para apreciarse en este gráfico. Se incorpora un ajuste que, si bien no pretende ser un modelo detallado, consideramos que es razonable para la caída posterior al máximo. El modelo elegido tiene un magnetar con parámetros $t_p = 3$ d, $E_{\text{rot}} = 10^{52}$ erg y $b \simeq 4$ (o índice de frenado $n \sim 1.66$). Se incorporó un tiempo de la explosión $t_{\text{exp}} = 15$ d. La masa de ^{56}Ni del modelo es $0.03 M_{\odot}$ y asumimos que está presente debido a la nucleosíntesis hasta una fracción 0.8 de la extensión radial de masa. La energía de la explosión se ha fijado en un valor de $E_{\text{term}} = 1$ foe.

La información disponible es tan compleja en el caso de SN2018cow que probablemente y como lo indica la literatura, aún existe una degeneración de parámetros e importante abanico de especulaciones en cuanto al escenario que explica toda la información disponible sobre SN2018cow. Hemos presentado un modelo que ajusta el decaimiento de la CL en base a un magnetar ligeramente apartado del caso estándar, pero aún queda por estudiar si es compatible con los datos en otras bandas del espectro. Asimismo pretendemos explorar la posibilidad de reducir t_{exp} que es un desfase que no parece compatible con los datos. Nos proponemos analizar también, a futuro, otras posibles alternativas para explicar este fascinante evento.

Agradecimientos: Investigación parcialmente financiada por el P12018-40B696 de la UNRN, y el PICT 2017-3133.

Referencias

Arons J., 2002, P.O. Slane, B.M. Gaensler (Eds.), *Neutron Stars in Supernova Remnants*, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 271, 71
Bersten M.C., Benvenuto O., Hamuy M., 2011, *ApJ*, 729, 61

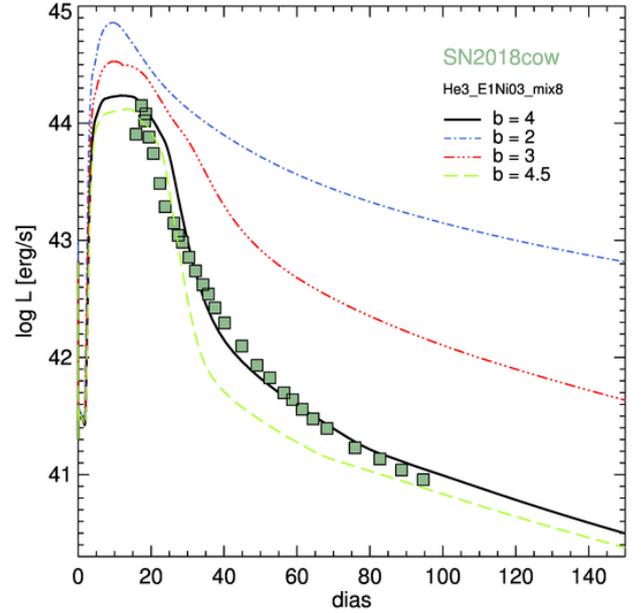


Figura 2: Datos de la emisión en óptico, junto al modelo preliminar. Para ajustar la rápida caída de la CL se introduce un valor $b = 4$ para la inyección de energía (curva negra). Las otras curvas sirven para visualizar el efecto de este parámetro.

Bersten M.C., et al., 2016, *ApJL*, 817, L8
de Ugarte Postigo A., 2018, AT2018cow A fast luminous relativistic transient, <http://nidiafest.fcaglp.unlp.edu.ar/>. [Folder: Presentations_web; accedido el 05-02-2020]
Fox O.D., Smith N., 2019, *MNRAS*, 488, 3772
Gaensler B.M., Slane P.O., 2006, *ARA&A*, 44, 17
Gal-Yam A., 2019, *ARA&A*, 57, 305
Ho A.Y.Q., et al., 2019, *ApJ*, 871, 73
Inserra C., 2019, *Nature Astronomy*, 3, 697
Kasen D., Bildsten L., 2010, *ApJ*, 717, 245
Lyutikov M., Toonen S., 2019, *MNRAS*, 487, 5618
Maffione N.P., Orellana M., Bersten M.C., 2019, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 61, 69
Margutti R., et al., 2019, *ApJ*, 872, 18
Milisavljevic D., Margutti R., 2018, *SSRv*, 214, 68
Moriya T.J., Sorokina E.I., Chevalier R.A., 2018, *SSRv*, 214, 59
Nomoto K., Hashimoto M., 1988, *Physics Reports*, 163, 13
Orellana M., Bersten M.C., Benvenuto O.G., 2016, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 58, 108
Orellana M., Bersten M.C., Moriya T.J., 2018, *A&A*, 619, A145
Perley D.A., et al., 2019, *MNRAS*, 484, 1031
Prentice S.J., et al., 2018, *ApJL*, 865, L3
Rivera Sandoval L.E., et al., 2018, *MNRAS*, 480, L146
Shapiro S., Teukolsky S., 1983, *Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects*, Wiley
Soker N., Grichener A., Gilkis A., 2019, *MNRAS*, 484, 4972
Villar V.A., Nicholl M., Berger E., 2018, *The Astrophysical Journal*, 869, 166