

Efectos de la distribución del níquel sobre la curva de luz de supernovas con dos máximos

Mariana Orellana^{1,2} Melina Bersten^{3,4}

¹ Universidad Nacional de Río Negro. Sede Andina, Mitre 630 (8400) Bariloche, Argentina ² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)
³ Instituto de Astrofísica de La Plata (IALP-CONICET/UNLP) ⁴ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

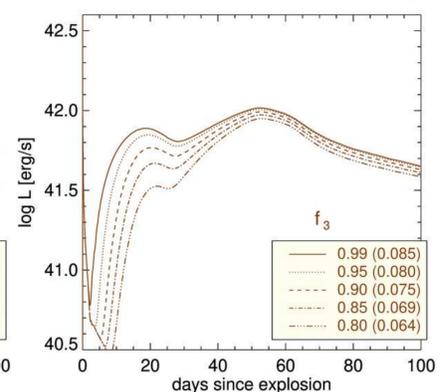
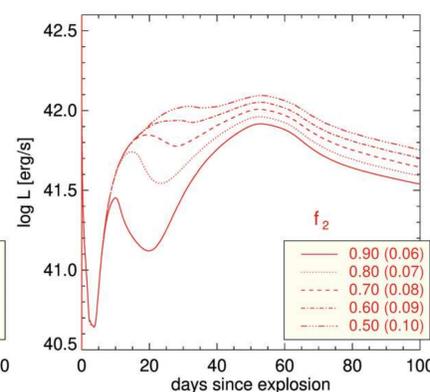
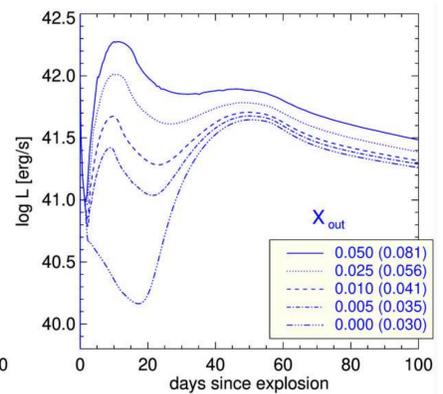
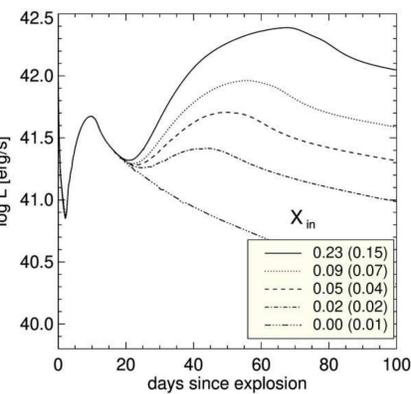
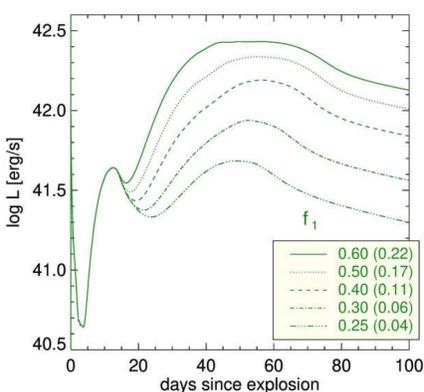
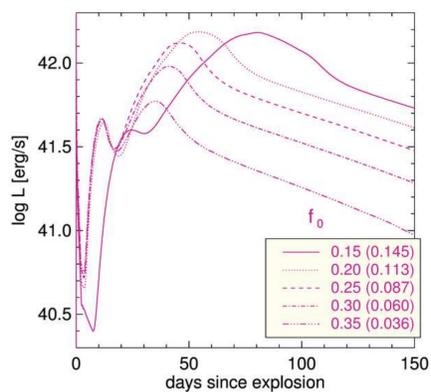
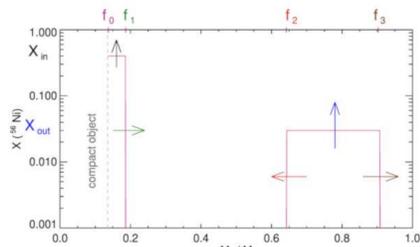
Los avances en las estrategias de observación de los relevamientos ópticos modernos están remodelando el panorama de la astronomía transitoria, lo que nos permite identificar y estudiar las primeras etapas en la evolución de las supernovas (SNs). Dicha fase provee la más valiosa información sobre la estrella que explota. Nos interesamos en las SNs que han presentado una curva de luz (CL) con dos máximos claramente definidos en la evolución de la luminosidad bolométrica.

Se encuentra en la literatura que la morfología observada en ambos picos es bastante diversa, así como la razones físicas que podrían causarla. Una posibilidad que se propuso originalmente para explicar la forma de la CL de doble pico de SN2005bf, es asumir una doble distribución del níquel radioactivo, ⁵⁶Ni, en la estructura pre-SN. En este estudio presentamos un análisis sistemático de los efectos sobre la CL de la variación en el perfil de níquel. Para ello hemos propuesto una distribución inicial de dicho elemento con una forma paramétrica simple que establece su ubicación en dos capas separadas y analizamos el comportamiento ante la variación de cada uno de los parámetros aplicando el código hidrodinámico presentado en Bersten et al. (2011). Nos concentramos en estrellas que ya han perdido la envoltura rica en hidrógeno. Presentamos el ajuste de CLs sintéticas a un conjunto selecto de objetos para los cuales este modelo puede ser aplicado y discutimos en qué casos la morfología de la CL parece menos compatible con este escenario.

Espacio de parámetros del perfil de ⁵⁶Ni

La abundancia X está graficada por separado, mostrando la distribución en dos cajas, y donde $f = M_r/M$ es la coordenada masa normalizada.

En los siguientes paneles se varía solamente el parámetro indicado, para ponderar su efecto sobre la curva de luz. La cantidad entre paréntesis es la masa total de ⁵⁶Ni. Se consideran también fijos $M_{\text{preSN}} = 11 M_{\odot}$ de una estrella evolucionada con el código MESA, y $E_{\text{exp}} = 2 \times 10^{51}$ erg.



Ajustes a SN observadas

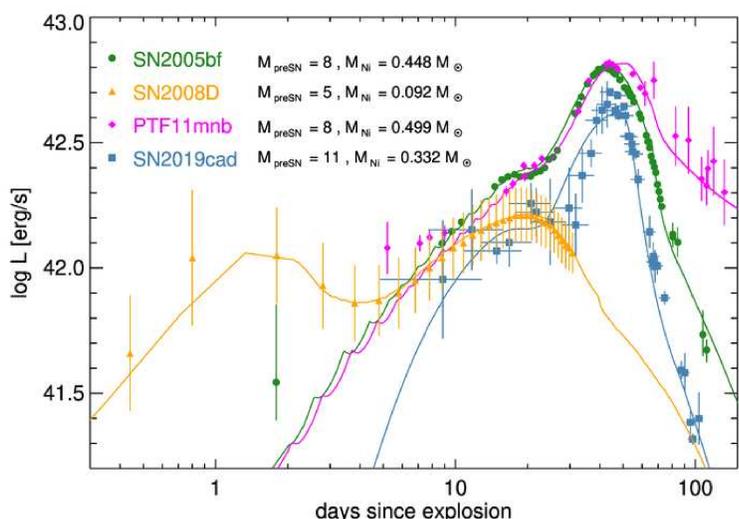
Luego de estudiar en la literatura las supernovas con dos máximos en L_{bol} , consideramos como un aporte novedoso ajustar nuevamente las que han tenido ya la propuesta de doble distribución de ⁵⁶Ni pero hacerlo manteniendo una misma descripción matemática del perfil $X(f)$ presentado arriba.

Parámetros que mejor ajustan

Parámetro	SN2005bf	PTF11mnb	SN2019cad	SN2008D
M_{ej}	$6.1 M_{\odot}$	$6.1 M_{\odot}$	$9.55 M_{\odot}$	$3.3 M_{\odot}$
M_{preSN}	$8 M_{\odot}$	$8 M_{\odot}$	$11 M_{\odot}$	$5 M_{\odot}$
E_{exp}	1.7×10^{51} erg	1.5×10^{51} erg	4×10^{51} erg	10^{51} erg
κ_{γ} (cm ² /g)	0.03 $t \leq 65$ d 0.0018 $t > 65$ d	0.03 fijo	0.03 $t \leq 45$ d 0.001 $t > 45$ d	0.03 $t \leq 40$ d 0.015 $t > 40$ d
f_0, f_1	0.2, 0.247	0.2, 0.259	0.13, 0.154	0.36, 0.93
f_2, f_3	0.524, 0.99	0.563, 1	0.646, 0.947	0.995, 1
$X_{\text{in}}, X_{\text{out}}$	0.952, 0.029	0.960, 0.029	0.99, 0.015	0.026, 0.71
$M(^{56}\text{Ni})_{\text{in, out}}$	0.352, 0.096 M_{\odot}	0.395, 0.104 M_{\odot}	0.283, 0.049 M_{\odot}	0.074, 0.018 M_{\odot}

^a La masa de ⁵⁶Ni se calcula a posteriori, no es un parámetro inicial.

Mostramos la escala temporal en forma logarítmica para resaltar las escalas de tiempo en juego. Puede notarse que el segundo máximo en la CL de SN2008D es contemporáneo con el primero de las otras supernovas estudiadas. Esto hace pensar en un conjunto de parámetros más extremos, como el que encontramos (ver detalles en la tabla).



Justificación y métodos

La presencia de flujos de salida involucrados en la explosión puede inducir la nucleosíntesis de elementos radiactivos en capas externas de la estrella progenitora antes de que llegue el frente de choque de la SN. Una propuesta en esta línea es la de un chorro directamente ahogado en el interior estelar (Duffell & Ho, 2020), y otra es un *jet* que haya llegado a salir y desencadenado un *gamma-ray burst* pero este no se observó, tal vez no tuvo la orientación apropiada (Izzo et al. 2020).

Especulamos que la síntesis local o el transporte hacia afuera de material mezclado con elementos radiactivos es más eficiente que las inestabilidades hidrodinámicas generalmente invocadas para la mezcla, lo que justifica la hipótesis de una capa externa rica en níquel y separada de la interna. Aunque no abordamos los detalles de cómo redistribuir el ⁵⁶Ni casi esféricamente; hicimos uso de un código LTE radiativo-hidrodinámico unidimensional (Bersten et al. 2011) para realizar nuestra exploración numérica y calcular las CLs bolométricas (Orellana & Bersten 2022).

Formas de la CL que pueden explicarse a través de esta idea

Nuestro modelo de la distribución de níquel para SNs con doble pico implica una caída luego del primer máximo menos empinada que la que se observa en muchos casos. Cuando los datos iniciales presentan una pendiente negativa abrupta, la explicación más compatible es la del enfriamiento luego de que la onda de choque interactúa con material circumestelar o una envoltura extendida. Sin embargo, cuando la pendiente inicial observada es creciente antes de los dos máximos, otras propuestas tienen más inconvenientes en explicar la forma de la CL, a menos que invoquen una combinación de fuentes de energía. En supernovas con CL similar a la de SN2005bf, este modelo funciona muy bien e incluye una masa de ⁵⁶Ni en la capa externa menor a la interna.

Referencias:

- Bersten, M. C., et al. 2011, ApJ, 729, 61
- Duffell, P. C. & Ho, A. Y. Q. 2020, ApJ, 900, 193
- Izzo, L., Auchettl, K., Hjorth, J., et al. 2020, A&A, 639
- Orellana, M. & Bersten, M. 2022, A&A, enviado.

Datos modelados:

- Folatelli, G., Contreras, C., et al. 2006, ApJ, 641, 1039.
- Gutiérrez, C., et al. 2021, MNRAS, 504, 4907
- Modjaz, M., Li, W., Butler, N., et al. 2009, ApJ, 702, 226
- Taddia, F., et al. 2018, A&A, 609, A106.

Agradecimientos:

Proyectos UNRN PI2020 40B885 y PICT-2020-SERIEA-01141.

✉ morellana@unrn.edu.ar

