

Curvas de luz tempranas de supernovas ricas en hidrógeno

B.N. Englert Urrutia¹, M.C. Bersten^{1,2} & L.S. Cidale^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

² Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

Contacto / ebrenda@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / Observaciones de supernovas ricas en hidrógeno (SNs II) muestran que sus curvas de luz (CLs) tempranas evolucionan más lentamente que lo que predicen los modelos teóricos. Una solución para dicha discrepancia es considerar la existencia de un material circunestelar (CSM por sus siglas en inglés), el cual sería eyectado por la estrella progenitora años antes de la explosión. Para estudiar su efecto en la morfología de las CLs tempranas, caracterizamos al CSM mediante tres parámetros: la extensión radial, la tasa de pérdida de masa y la pendiente del perfil de densidad externo. Por último, consideramos un conjunto de SNs posiblemente afectado por un CSM (SN 1999em, SN 2004et, SN 2005cs, SN2012aw y SN 2012ec) y derivamos las propiedades del mismo, necesarias para explicar las observaciones.

Abstract / Observations of hydrogen-rich supernovae (SNe II) show that their early light curves (LCs) evolve slower than the models predictions. One possible solution to this discrepancy is to consider the existence of some circumstellar material (CSM), probably ejected by the progenitor star years before the explosion. To analyze its effect on the morphology of early LCs, we characterize the CSM with three parameters: the radial extension, the mass loss rate and the slope of the external density profile. Finally, we consider a sample of well-observed SNe possibly affected by CSM (SN 1999em, SN 2004et, SN 2005cs, SN2012aw and SN 2012ec), and derive the CSM properties necessary to explain the observations.

Keywords / supernovae: general — stars: massive — circumstellar matter

1. Introducción

De los distintos tipos de supernovas (SNs) que se conocen en la naturaleza, las más comunes son las de colapso gravitatorio ricas en hidrógeno (SNs II). Estos objetos muestran en sus espectros líneas de hidrógeno con perfiles P-Cygni bien definidos, y algunos presentan en sus curvas de luz (CLs) una fase de luminosidad aproximadamente constante, aunque la pendiente de dicha fase depende del objeto. Se piensa que sus progenitores son estrellas supergigantes rojas con un rango de masas iniciales entre 8 y 25 M_{\odot} , y con tasas de pérdida de masa observadas de $\sim 10^{-6} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$. Si bien las estrellas masivas sufren grandes pérdidas de masa debido a fuertes vientos estelares, es necesario que los progenitores de las SNs II retengan una considerable envoltura de hidrógeno antes de la explosión, para poder reproducir sus CLs.

En las últimas décadas se han hecho muchos esfuerzos por tratar de observar SNs lo antes posible luego de la explosión, dado que estos datos pueden revelar importante información de la estructura de la estrella progenitora. Lo que se ha observado es que las CLs tempranas muestran una importante discrepancia entre los modelos teóricos y las observaciones, por lo que se han propuesto diferentes explicaciones. Una posibilidad es suponer la presencia de un CSM cercano al progenitor (Moriya et al., 2011; Morozova et al., 2017; Yaron et al., 2017, entre otros). Dicho material podría haber sido eyectado por el progenitor mediante vientos un tiempo antes de la explosión. El objetivo de este trabajo es entonces considerar la existencia de este posible

CSM y analizar los efectos de su presencia sobre la CL temprana de SNs II.

2. Método

2.1. Código hidrodinámico

Usamos un código hidrodinámico unidimensional (Bersten et al., 2011), el cual simula explosiones estelares partiendo de estructuras en equilibrio hidrostático, suponiendo simetría esférica de un gas autogravitante y considerando la aproximación de difusión para describir el transporte radiativo. En particular, el código permite calcular CLs bolométricas y velocidades fotosféricas bajo distintas condiciones físicas, tales como la masa y el radio del progenitor, o la energía de la explosión.

2.2. Material circunestelar

Para considerar la presencia de un CSM cercano al progenitor, modificamos el perfil de densidad más externo de la estrella según la parametrización

$$\rho_{\text{CSM}}(r) = \frac{\dot{M}}{4\pi v_{\text{viento}}(r)} r^{-2}, \quad (1)$$

la cual se deriva de la conservación de la masa. Suponemos además la ley beta de velocidades, como en Moriya et al. (2017),

$$v_{\text{viento}}(r) = v_0 + (v_{\infty} - v_0) \left(1 - \frac{R}{r}\right)^{\beta}, \quad (2)$$

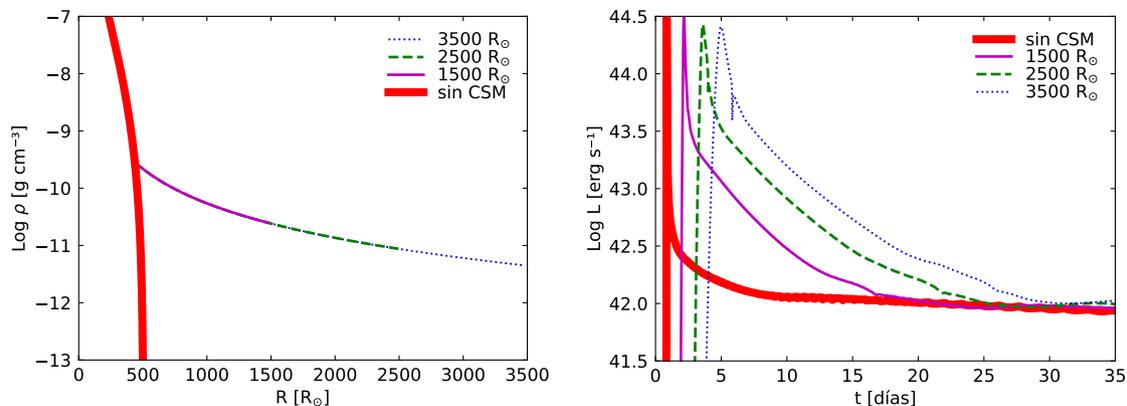


Figura 1: Izquierda: Parte más externa del perfil de densidad de una estrella de $500 R_{\odot}$ antes de la explosión, en función de la coordenada radial. Sin CSM (línea sólida ancha) y modelos donde se adjunta un material con diferentes R_{CSM} : $1500 R_{\odot}$, $2500 R_{\odot}$ y $3500 R_{\odot}$. Derecha: CLs bolométricas correspondientes a los casos con y sin CSM.

para poder analizar modelos de viento estacionario con velocidad constante ($\beta = 0$) y acelerado ($\beta > 0$). Por simplicidad, dejamos fijos los valores de las velocidades inicial ($v_0 = 10 \text{ m s}^{-1}$) y terminal ($v_{\infty} = 10 \text{ km s}^{-1}$) del viento.

Como siguiente paso, caracterizamos al CSM mediante tres parámetros:

- su extensión radial (R_{CSM}),
- la tasa de pérdida de masa (\dot{M}),
- la pendiente del perfil (β).

En este trabajo presentamos solo el efecto de considerar diferentes R_{CSM} , dejando fijos a los parámetros \dot{M} y β , para una estrella progenitora de $15 M_{\odot}$ y $500 R_{\odot}$ previo a la explosión. Además, para la energía de la explosión usamos un valor típico de 1×10^{51} erg. En la Fig. 1 se muestran los perfiles de densidad (izquierda) y sus respectivas CLs bolométricas (derecha) de modelos con y sin CSM. Concluimos para este caso en que solo variamos R_{CSM} que, a medida que aumenta la extensión del material, el máximo de la CL se hace levemente más débil pero considerablemente más ancho, y por ende la caída de la luminosidad se vuelve cada vez más lenta. Luego, se retrasa sustancialmente el comienzo de la fase de recombinación del hidrógeno. Es importante notar que, a tiempos posteriores ($\gtrsim 25$ días después de la explosión) la presencia de CSM deja de afectar a las CLs. Debido a esto, solo graficamos las CLs hasta aproximadamente el comienzo de esa fase.

Un efecto similar se encuentra si variamos tanto \dot{M} como β , dejando al resto de los parámetros fijos.

3. Modelos con CSM

3.1. SN 1999em

Como primer paso, presentamos el análisis realizado para la SN 1999em. Este objeto es una SN II prototipo que ha sido muy estudiada en la literatura. La Fig. 2 muestra la comparación entre las observaciones de este objeto (puntos rojos) y un modelo sin CSM (línea punteada), calculado para un progenitor de $19 M_{\odot}$ y $800 R_{\odot}$, y una energía de explosión de 1.25×10^{51} erg. Si bien a partir

de los ~ 20 días después de la explosión hay un buen ajuste entre la CL bolométrica (derecha) y las observaciones, se puede apreciar una importante discrepancia a tiempos más tempranos, la cual intentamos explicar con la inclusión de un CSM.

Luego, utilizando las mismas propiedades para el progenitor, es decir $19 M_{\odot}$ y $800 R_{\odot}$ y una energía de explosión igual 1.25×10^{51} erg, exploramos diferentes propiedades del CSM para intentar reproducir las observaciones tempranas. Encontramos un posible conjunto de soluciones (ver Fig. 2) que ajustan tanto a las CLs bolométricas (izquierda) como a las velocidades fotosféricas (derecha) en simultáneo. Para cada modelo derivamos los parámetros del CSM, como se detalla en la Tabla 1. En particular, prestamos especial atención a las tasas de pérdida de masa: para el caso de velocidad constante ($\beta = 0$) se obtiene $\dot{M} \sim 10^{-2} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$, valor mucho mayor a lo que se observa; mientras que para casos de viento acelerado ($\beta \geq 4$) ese valor se reduce a $\dot{M} \sim 10^{-4} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$. Para $0 < \beta < 4$ no encontramos soluciones.

Respecto a las velocidades fotosféricas, tanto los modelos con y sin CSM reproducen razonablemente bien a las observaciones (ver Fig. 2). En este caso, sería necesario tener espectros aún más tempranos para poder diferenciar entre modelos con y sin CSM.

3.2. Conjunto de SNs

Además de la SN 1999em, analizamos otras cuatro SNs II: SN 2004et, SN 2005cs, SN 2012aw y SN 2012ec, estudiadas en detall en Martínez & Bersten (2019). En dicho trabajo se encontraron los parámetros físicos (M , R , E y $M_{\text{Ni}^{56}}$) que reproducen las CLs y las velocidades fotosféricas para la mayor parte de la evolución. Sin embargo, se pueden ver importantes discrepancias en las CLs tempranas de los modelos y de las observaciones debido a que no se consideró la presencia de un CSM. Todos estos objetos tienen la particularidad de contar con una buena cobertura tanto fotométrica como espectroscópica, además de identificación y confirmación de progenitor.

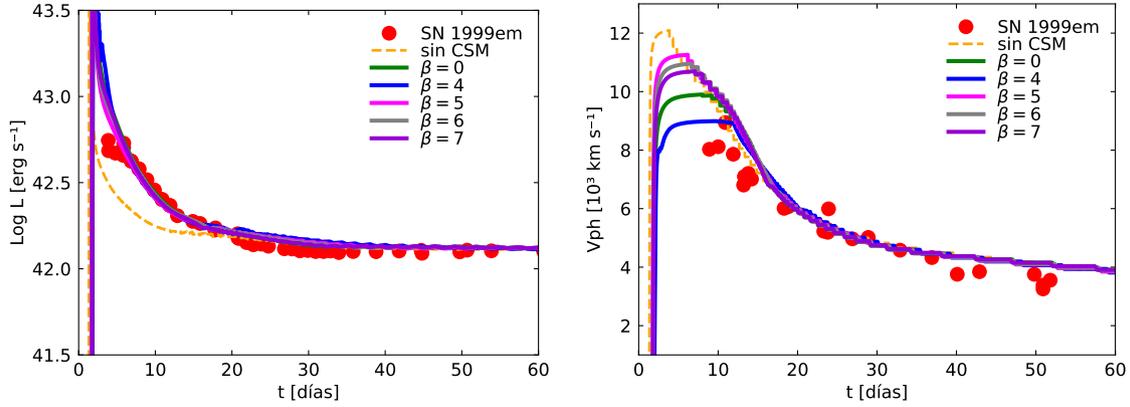


Figura 2: Comparación entre CLs bolométricas (izquierda) y velocidades fotosféricas (derecha) con las observaciones de la SN 1999em (puntos rojos). Se muestran modelos sin CSM (línea punteada) y con CSM para diferentes valores de β (líneas sólidas). Tanto las observaciones de la SN 1999em como el modelo sin CSM son presentados en Bersten et al. (2011).

Tabla 1: Parámetros del CSM obtenidos para las soluciones halladas de la SN 1999em.

R_{CSM} [R_{\odot}]	\dot{M} [$M_{\odot} \text{ a}^{-1}$]	β	M_{CSM} [M_{\odot}]
1100	8.5×10^{-2}	0	0.081
2000	7.0×10^{-4}	4	0.227
1100	2.5×10^{-4}	5	0.125
1100	1.5×10^{-4}	6	0.101
1100	1.0×10^{-4}	7	0.081

Para cada una de estas SNs realizamos un análisis similar al de la SN 1999em, encontrando en cada caso un conjunto de soluciones que reproducen bien las observaciones tempranas. Por razones de espacio, dichos modelos no son presentados. Sin embargo, en la Fig. 3 se muestran los valores de β y \dot{M} obtenidos para estos cuatro objetos e incluimos además a la SN 1999em. De la figura vemos que:

- si el viento tiene velocidad constante ($\beta = 0$), hallamos altas tasas de pérdida de masa ($\dot{M} \sim 10^{-1} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$) para las cinco SNs;
- si el viento es acelerado, obtenemos soluciones con $\beta \geq 4$, cuyas tasas de pérdida de masa se reducen al rango de $10^{-5} M_{\odot} \text{ a}^{-1} \leq \dot{M} \leq 10^{-3} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$. Estos últimos valores son más cercanos a los valores observados.

4. Conclusiones

Debido a la existencia de SNs II cuyas CLs tempranas no pueden ser explicadas mediante modelos teóricos típicos, incorporamos la presencia de un CSM. Caracterizamos al CSM mediante 3 parámetros: R_{CSM} , \dot{M} y β .

Analizamos un conjunto de cinco SNs II que pudiesen estar afectadas por un CSM, y obtuvimos buenos ajustes tanto para las CLs tempranas como para las velocidades fotosféricas. Sin embargo, altas tasas de pérdida de masa ($\sim 10^{-1} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$) se derivan para todos los objetos si suponemos que el viento tiene velocidad

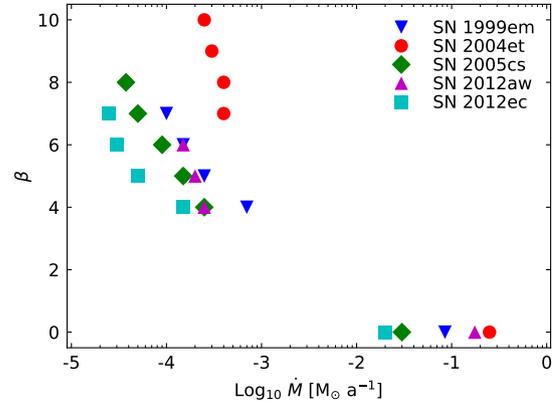


Figura 3: Parámetros β y \dot{M} obtenidos de las posibles soluciones de este conjunto de SNs.

constante de 10 km s^{-1} , velocidad típica para las supergigantes rojas. En cambio, si se considera un viento acelerado, estos valores se reducen considerablemente ($10^{-5} M_{\odot} \text{ a}^{-1} \leq \dot{M} \leq 10^{-3} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$). Si bien estas tasas de pérdida de masa calculadas siguen sobrestimando los valores observados ($\sim 10^{-6} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$), las diferencias podrían deberse a la posibilidad de que las tasas de pérdida de masa observadas no correspondan con los valores de los vientos justo antes de la explosión.

Agradecimientos: B.E. agradece el apoyo financiero de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (Préstamo BID, PICT 2016/1971). Además, agradecemos a Laureano Martínez por los modelos iniciales de las SNs.

Referencias

- Bersten M.C., Benvenuto O., Hamuy M., 2011, ApJ, 729, 61
 Martínez L., Bersten M.C., 2019, A&A, 629, A124
 Moriya T., et al., 2011, MNRAS, 415, 199
 Moriya T.J., et al., 2017, MNRAS, 469, L108
 Morozova V., Piro A.L., Valenti S., 2017, ApJ, 838, 28
 Yaron O., et al., 2017, Nat. Phys., 13, 510