



# Masa del progenitor de la SN 2018aoq: compatibilidad entre modelo hidrodinámico y detecciones directas

L. Martínez<sup>1,2</sup> & M. Bersten<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

<sup>2</sup> *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

*Contacto* / laureano@carina.fcaglp.unlp.edu.ar

**Resumen** / Las propiedades físicas de las estrellas progenitoras de supernovas (SNs) pueden ser determinadas de diversas maneras. Entre ellas se encuentran el modelado hidrodinámico de sus curvas de luz y espectros, y la detección y análisis de la estrella progenitora en imágenes previas a la explosión. Sin embargo, algunos trabajos muestran una clara discrepancia entre las masas obtenidas por estos dos métodos, siendo la masa estimada por simulaciones hidrodinámicas usualmente mayor. En este trabajo analizamos el caso de la SN 2018aoq. A partir de imágenes de archivo del *Telescopio Espacial Hubble* se identificó a una estrella supergigante roja con una masa en la secuencia principal de edad cero estimada en  $10 M_{\odot}$  como posible progenitora del evento. Utilizando el modelado hidrodinámico de la curva de luz y velocidades fotosféricas pudimos determinar en forma independiente la masa de la estrella, entre otros parámetros físicos. Encontramos que ambas masas son compatibles dando un sustento adicional a nuestro método de estimación de parámetros.

**Abstract** / The physical properties of supernovae can be estimated using several methods, as the hydrodynamical modelling of their light curves and spectra, and the detection and analysis of the progenitor star in pre-explosion images. Previous studies showed a discrepancy in the progenitor masses inferred by both methods. A former study of the SN 2018aoq based on the analysis of pre-explosion data from the *Hubble Space Telescope* have inferred a red supergiant progenitor with a zero-age main sequence mass of  $10 M_{\odot}$ . We obtain the progenitor mass, among other physical properties, through hydrodynamic simulations of its light curve and photospheric velocity. Our mass estimation is compatible with the one derived from direct detections of the progenitor, providing additional support to our method.

*Keywords* / stars: general — supernovae: individual (SN 2018aoq) — stars: evolution

## 1. Introducción

Gran parte de las estrellas que nacen con más de 8 veces la masa del Sol terminan su evolución en una violenta explosión conocida como supernova (SN) de colapso nuclear. Estos eventos son clasificados observacionalmente según sus características espectrales (Filippenko, 1997): las SNs de tipo II (SNs II) presentan fuertes perfiles P-Cygni en sus líneas de hidrógeno; SNs de tipo Ib no presentan hidrógeno sino que están dominadas por líneas de helio; y SNs de tipo Ic, que no muestran rasgos definidos de ninguno de estos dos elementos.

Actualmente se sabe que las SNs II provienen de estrellas supergigantes rojas con una extensa envoltura rica en hidrógeno. Esto ha sido mostrado por simulaciones hidrodinámicas (Falk & Arnett, 1977) y confirmado por la detección directa de la estrella progenitora en imágenes preexplosión (Van Dyk et al., 2012, entre otros).

A pesar que las SNs II son el tipo de SN más común en la naturaleza (Li et al., 2011) nuestro conocimiento de las propiedades físicas de estos objetos no es del todo satisfactorio. Más aún, existen importantes discrepancias en la literatura en cuanto a las masas de sus estrellas progenitoras dependiendo de los diferentes métodos utilizados para su estimación. Las imágenes de archivo proveen la oportunidad de detectar la estrella progeni-

tora en imágenes previas a la explosión. La luminosidad y la temperatura efectiva de dicha estrella puede obtenerse de la distribución espectral de energía o usando correcciones bolométricas para convertir magnitudes a luminosidades (ver Van Dyk et al., 2012; Davies & Beasor, 2018, entre otros). Una vez que la estrella es localizada en un diagrama Hertzsprung-Russell, la masa de la estrella en la secuencia principal es estimada comparando con trayectorias evolutivas. Adquirir imágenes varios años luego de la explosión, una vez que la SN sea suficientemente débil, es el próximo paso para confirmar la identificación de la progenitora a través de su desaparición. A pesar de ser el método más inmediato para determinar el tipo de estrella que produce cada SN, este método sólo puede ser aplicado cuando existen imágenes preexplosión y con SNs cercanas debido a la falta de resolución para fuentes más distantes.

Las simulaciones hidrodinámicas de las curvas de luz (CL) también pueden ser usadas para caracterizar las propiedades de las SNs. Las CL son extremadamente sensibles a las propiedades físicas de las estrellas progenitoras (masas y radios), así como también a las propiedades de la explosión (energía liberada, cantidad de material radiactivo sintetizado y su distribución en la envoltura). Uno de los problemas con este método, es que las masas estimadas usando simulaciones hidrodinámi-

cas son usualmente más grandes que aquellas determinadas usando fotometría preexplosión (Utrobin & Chugai, 2008, entre otros). Sin embargo, Martínez & Bersten (2019) presentan modelos hidrodinámicos para seis objetos con confirmación de la estrella progenitora y encuentran que, en la mayoría de los casos, las masas estimadas por ambos métodos son compatibles. Además, concluyen que esta discrepancia puede deberse a que en algunos casos estrellas con distintas propiedades físicas pueden producir propiedades fotométricas similares, es decir que el problema está degenerado.

Es por eso que en este trabajo desarrollamos un procedimiento estadístico para ajustar simultáneamente la CL y la velocidad fotosférica de las SNs, y determinar las zonas de degeneración en el espacio de parámetros. En particular, hemos empleado este método para derivar las propiedades de la estrella progenitora de la SN 2018aoq.

## 2. SN 2018aoq

La SN 2018aoq fue descubierta el 1 de abril de 2018 en la galaxia NGC 4151 por el Lick Observatory Supernova Search (LOSS). Existen imágenes de archivo del sitio de la SN tomadas con el instrumento *Wide Field Camera 3* (WFC3), a bordo del *Hubble Space Telescope* (HST), aproximadamente 2 años antes de la explosión. A partir de estas observaciones, O’Neill et al. (2019) detectaron una fuente en el sitio de la SN en cuatro bandas. A través de ajustes a la distribución espectral de energía de la estrella candidata a progenitora encontraron que era un estrella supergigante roja. Usando modelos de evolución simple y binaria, ellos concluyen que el escenario más favorecido es el de la explosión de una estrella con una masa inicial de  $10 \pm 2 M_{\odot}$ .

Con el objetivo de evaluar la naturaleza de la estrella progenitora y compararla con lo obtenido usando fotometría preexplosión, nos proponemos hacer un modelado detallado de las observaciones disponibles. Para eso necesitamos calcular la CL bolométrica de la SN con el conjunto de datos ópticos presentados en O’Neill et al. (2019) ya que el código hidrodinámico que utilizamos produce luminosidades bolométricas (ver Sec. 3.). Usamos la correlación entre la corrección bolométrica y el color inferida en Bersten & Hamuy (2009) que nos permite calcular luminosidades bolométricas usando sólo dos bandas del óptico. Además, la velocidad fotosférica puede ser estimada a través de la línea de Fe II ( $\lambda 5169 \text{ \AA}$ ), ya que esta línea se forma en las regiones internas de la SN y es un buen indicador de la velocidad de la fotosfera.

## 3. Modelos hidrodinámicos

Contamos con un código hidrodinámico lagrangiano unidimensional que simula la explosión de la SN y permite calcular CL bolométricas y velocidades de expansión (Bersten et al., 2011). Estos modelos se calculan integrando numéricamente las ecuaciones de la hidrodinámica suponiendo simetría esférica para un gas autogravitante.

La explosión es simulada a partir de la formación de una onda de choque que se propaga desde el centro de la estrella hasta su superficie al inyectar una cierta cantidad de energía ( $\sim 10^{51}$  erg) cerca del centro de la misma.

Como condición inicial es necesaria una estructura en equilibrio hidrostático que simule las condiciones de la estrella antes de explotar. Utilizamos el código público de evolución estelar MESA (Paxton et al., 2011) para producir estrellas supergigantes rojas con metalicidad solar. Cada uno de los modelos estelares es evolucionado desde la presecuencia principal hasta el colapso del núcleo.

Los parámetros libres de nuestro modelo son: la masa inicial ( $M_{ZAMS}$ ), la energía de la explosión ( $E$ ), la cantidad de material radiactivo sintetizado en la explosión ( $M_{Ni}$ ) y su grado de mezcla en las capas más externas de la envoltura. Como utilizamos modelos de evolución estelar, partiendo de  $M_{ZAMS}$  se obtienen la masa y el radio de la progenitora previos a la explosión ( $M_{presn}$ ,  $R$ ).

Para determinar las propiedades de la estrella progenitora y de la explosión a través del modelado de la CL, comparamos diferentes modelos con las observaciones. Para tal propósito, hemos calculado una grilla de modelos hidrodinámicos en todo el espacio de parámetros. Cubrimos el rango de masas de  $10 - 25 M_{\odot}$  en intervalos de  $1 M_{\odot}$  (ver Sec. 3.), energías de explosión entre 0.3 y 1.4 foe ( $1 \text{ foe} \equiv 10^{51}$  erg) en pasos de 0.1 foe, y  $M_{Ni}$  en el rango de  $0.01 - 0.07 M_{\odot}$  en intervalos de  $0.01 M_{\odot}$ . Además, para representar el efecto del  $^{56}\text{Ni}$  en el material eyectado, consideramos tres grados de mezcla para cada modelo detallado anteriormente: hasta 20%, 50% y 80% de la masa final. Es importante mencionar que existe una degeneración en el espacio  $M_{ZAMS} - E$  en el sentido que diferentes conjuntos de parámetros producen CL similares. Esta degeneración puede ser parcialmente reducida modelando las CL junto con la evolución de la velocidad fotosférica. Buscamos el modelo óptimo minimizando  $\chi^2$  de una manera similar a la calculada en Morozova et al. (2018), con la diferencia que en nuestro trabajo buscamos el mejor ajuste de CL y velocidades de expansión simultáneamente. De esta manera se pueden analizar las regiones de confianza de cada observable para cada conjunto de parámetros.

## 4. Resultados

En la Fig. 1 se muestran los resultados obtenidos luego de la comparación entre cada modelo en nuestra grilla y las observaciones de la SN 2018aoq. Mientras que existe un área en el espacio  $M_{ZAMS} - E$  donde la velocidad fotosférica está bien representada, cuando se analiza la CL bolométrica, la región de confianza se encuentra en la región correspondiente a estrellas menos masivas y bajas energías de explosión. En la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos pero ahora considerando ambos observables (CL y velocidades fotosféricas), dado que el modelo óptimo debe reproducirlos simultáneamente. El modelo óptimo es presentado en la Fig. 3 junto a las observaciones. Ambos observables son bien reproducidos por nuestro modelo óptimo.

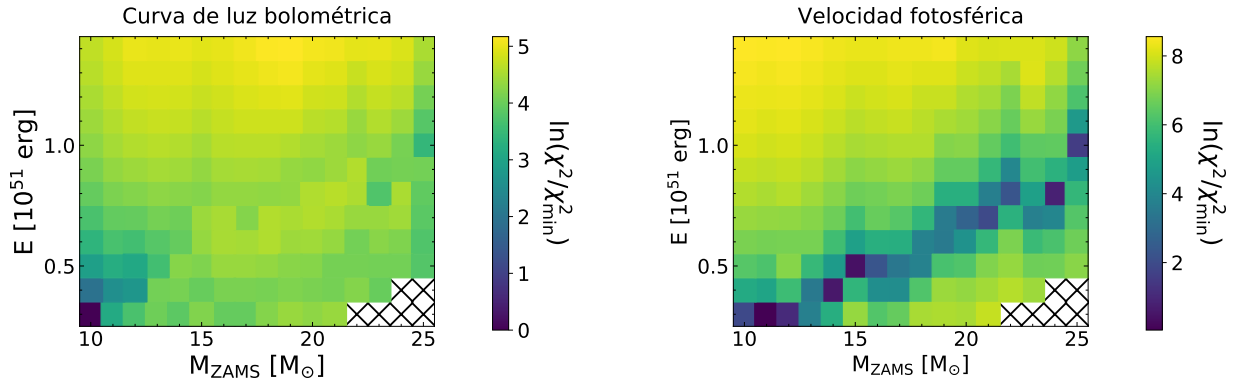


Figura 1: Logaritmo natural del cociente entre  $\chi^2$  y  $\chi_{min}^2$  para cada modelo en el espacio de parámetros  $M_{ZAMS} - E$  cuando se comparan con la CL bolométrica (panel izquierdo) y la velocidad fotosférica (panel derecho). Los  $\chi^2$  graficados corresponden a los valores de  $M_{Ni}$  y su distribución empleados en el modelo óptimo. Las cruces representan modelos que no han sido calculados por dificultades numéricas.

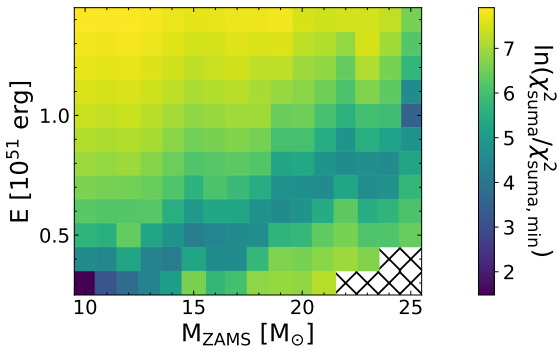


Figura 2: Igual que la Fig. 1 pero en este caso se comparan la CL bolométrica y la velocidad fotosférica simultáneamente.

Como resultado derivamos:  $M_{presn} = 9.5 M_{\odot}$ ,  $R = 460 R_{\odot}$ ,  $E = 0.3 \times 10^{51}$  erg,  $M_{Ni} = 0.01 M_{\odot}$ . Además encontramos que es necesaria una distribución del níquel bastante extendida (hasta  $7.6 M_{\odot}$  de la estructura final de la estrella) para reproducir la CL.

## 5. Conclusiones

Hemos calculado una grilla de modelos hidrodinámicos usando estrellas progenitoras provenientes de cálculos de evolución estelar para poder determinar las propiedades físicas de SNs II. El modelado de la CL puede proveer estas cantidades, aunque algunas veces, no hay una única solución al problema. Por lo tanto, para estudiar las zonas de degeneración, utilizamos un método estadístico basado en la minimización de  $\chi^2$  a la CL bolométrica y las velocidades de expansión simultáneamente. Aplicamos este método a la SN 2018aoq, para la cual el análisis de imágenes previas a la explosión han inferido una estrella supergigante roja como progenitora, con una masa en la secuencia principal de  $\sim 10 M_{\odot}$ . En este trabajo estimamos que la masa inicial de la progenitora es de  $10 M_{\odot}$ . Esto está en muy buen acuerdo con las observaciones preexplosión del *HST*.

La grilla y el método estadístico serán utilizados para analizar una gran base de datos de SNs II.

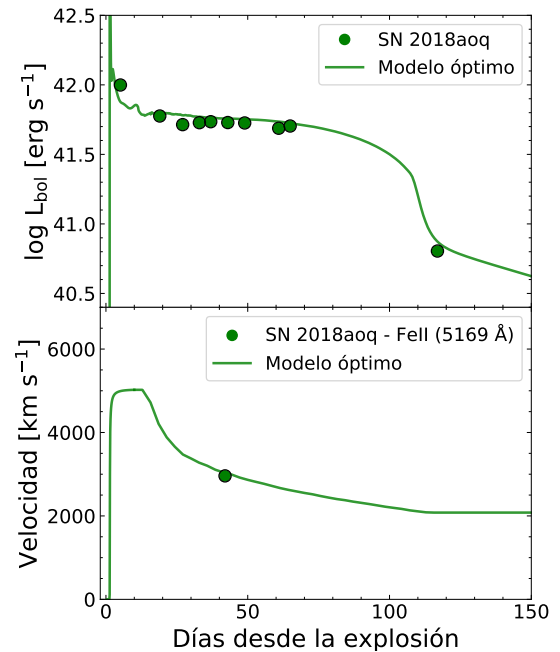


Figura 3: Comparación entre el modelo óptimo y las observaciones de la SN 2018aoq. *Arriba*: Curva de luz bolométrica. *Abajo*: Velocidad fotosférica.

## Referencias

- Bersten M.C., Benvenuto O., Hamuy M., 2011, ApJ, 729, 61
- Bersten M.C., Hamuy M., 2009, ApJ, 701, 200
- Davies B., Beasar E.R., 2018, MNRAS, 474, 2116
- Falk S.W., Arnett W.D., 1977, ApJS, 33, 515
- Filippenko A.V., 1997, ARA&A, 35, 309
- Li W., et al., 2011, MNRAS, 412, 1441
- Martínez L., Bersten M.C., 2019, A&A, 629, A124
- Morozova V., Piro A.L., Valenti S., 2018, ApJ, 858, 15
- O'Neill D., et al., 2019, A&A, 622, L1
- Paxton B., et al., 2011, ApJS, 192, 3
- Utrobin V.P., Chugai N.N., 2008, A&A, 491, 507
- Van Dyk S.D., et al., 2012, AJ, 143, 19