

SN 2023ixf: aprendiendo de una supernova cercana

M. Orellana^{1,2}, M.P. Piccirilli^{2,3}, M.C. Bersten^{3,4}, G. Folatelli^{3,4}, T. Regna^{3,4}, L.M. Román Aguilar^{3,4}, K. Ertini^{3,4}, A. Méndez^{3,4} & L. Ferrari^{3,4}

¹ Laboratorio de Investigación Científica en Astronomía, UNRN, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

³ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

⁴ Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

Received: 20 December 2024 / Accepted: 04 April 2025

©The Authors 2024

Resumen / Las curvas de luz teóricas de las supernovas han demostrado ser sensibles a la física de la estrella que explota, su historial de pérdida de masa tardía, la energía de la explosión y otros factores bien establecidos, aunque restringir los parámetros es a menudo una tarea desafiante. Hemos utilizado simulaciones hidrodinámicas 1D para estudiar un rico conjunto de datos que recopila valores fotométricos de una de las supernovas de tipo II más cercanas descubiertas en las últimas décadas: SN 2023ixf en Messier 101. Debido a su proximidad, ha atraído la atención de toda la comunidad y ha desencadenado extensas observaciones por parte de astrónomos profesionales y aficionados por igual. Recientemente publicamos el cálculo de la luminosidad bolométrica en dos pasos separados. Primero se presentó el modelado de los 19 días iniciales utilizando la curva de luz temprana y datos de las velocidades de expansión. La interacción entre el material eyectado y el material circunestelar es crucial en estas fases tempranas. Luego incorporamos un total de 100 días de observaciones fotométricas públicas y el modelo aún reprodujo la forma general de la curva de luz. La incorporación de la nueva información nos permitió inferir la cantidad de material radiactivo. Aquí resumimos nuestros principales resultados sobre esta supernova y proporcionamos un contexto más general al comparar nuestros resultados con otros estudios.

Abstract / Theoretical supernovae light curves have shown to be sensitive to the physics of the exploding star, its late mass loss history, explosion energetics, and other well established facts, though, constraining parameters is an often challenging endeavor. We have used 1D hydrodynamical simulations to study a rich data set that collects photometric data of one of the nearest Type II supernovae discovered in recent decades: SN 2023ixf in Messier 101. Due to its proximity, it has attracted the attention of the entire community and it triggered extensive observations by professional and amateur astronomers alike. Recently we published the calculation of the bolometric luminosity in two separated steps: a model for the first 19 days was depicted using the early light curve and data of the expansion velocities. The interaction between the ejecta and circumstellar material is crucial at these early phases. We then incorporated a total of 100 days of public photometric observations and the model did still reproduce the overall shape of the light curve. The including of new information allowed us to infer the radioactive yield. Here we summarize our main results on this supernova and provide a more general context by comparing our results with other studies.

Keywords / Supernovae: general — circumstellar matter — supernovae: individual (SN 2023ixf)

1. Introducción

Debido a su proximidad ~ 6.9 Mpc, la supernova SN 2023ixf ha atraído la atención de toda la comunidad. Su alta declinación norte facilitó que muchos interesados ubicados en ese hemisferio, con equipos diversos, la detecten y compartan sus registros. Los datos brindados, como detallamos en la Sección 2 nos permitieron calcular buena parte de la curva de luz (CL) bolométrica que recientemente publicamos. Este estudio incluyó el modelado en dos etapas, una primera cuando disponíamos de menos información, y luego un segundo estudio abarcando los datos disponibles en ese momento, unos 100 días en total.

La cantidad de información que una SN tan cercana provee es enorme, registrándose a la fecha unos ~ 60 artículos entre los que se detallan datos en distintas longitudes de onda (desde infrarrojo Yamanaka et al. 2023,

radio Matsuoka 2024; Iwata et al. 2024, rayos X Nayana et al. 2024, e incluso no detecciones de neutrinos Nakahata & Super-Kamiokande Collaboration 2023; Thwaites et al. 2023 y cotas a la búsqueda de ondas gravitacionales The LIGO Scientific Collaboration et al. 2024). En fechas muy tempranas la SN mostró líneas de emisión angostas debidas a elementos altamente ionizados (rasgos espectrales llamados de tipo *flash*) que se asocian a la recombinación del CSM (*Circum Stellar Matter*) ionizado por el destello de ruptura de choque Khazov et al. (2016). Su detección llevó a la pronta interpretación de que SN 2023ixf fue una supernova con interacción entre el material eyectado y el circunestelar. Sin embargo, distintos estudios apuntan a valores muy disímiles para las propiedades del CSM. Panjkov et al. (2024) recopila valores publicados de la tasa de pérdida de masa entre ($10^{-5} \lesssim \dot{M} \lesssim 1 M_{\odot} \text{ a}^{-1}$). Otros estudios

incluyendo imágenes pre-explosión y variabilidad de la estrella supergigante roja (*Red Super Giant*, RSG) progenitora que se han publicado, estiman para la masa inicial de la estrella $M_{ZAMS} \sim 10 - 24 M_{\odot}$ (ver referencias en Martínez et al. 2024). Además, la forma de la distribución espectral en infrarrojo de la RSG indica la presencia de polvo en el CSM (Xiang et al., 2024), el cual, según otro estudio, puede haber tenido una distribución asimétrica Li et al. (2024).

2. Datos públicos y su tratamiento

La Asociación Americana de Observadores de Estrellas Variables (AAVSO, por sus siglas en inglés) es una organización internacional sin fines de lucro que nuclea a observadores de estrellas variables situados en cualquier lugar del mundo (Kloppenborg, 2023). Los colaboradores son capacitados y observan con diversidad de equipos siguiendo ciertos lineamientos y reportando mediciones fotométricas en distintas bandas estandarizadas (Johnson, Cousins, Sloan, etc.). Los datos son sometidos tanto a análisis de autoconsistencia como a una verificación global en el contexto de otros reportes de un mismo objeto, para luego quedar disponibles y accesibles de manera pública.

La observación de SN 2023ixf comenzó muy tempranamente y se sostuvo de manera continua. El conjunto de datos provisto por AAVSO tiene características singulares en su formato dada la heterogeneidad del origen de los mismos: se cuenta con múltiples entradas por observador, por banda y por día. Además, teniendo en cuenta la dinámica constante de los datos, es necesario un procesamiento *ad-hoc* para extraer la información que resulta de utilidad en la estimación de la curva bolométrica.

Como primera medida, identificamos observaciones discordantes, por ejemplo, que muestren una discrepancia evidente, tengan características errantes o se aparten considerablemente (*outliers*). Esta selección es posible debido a un sistema de códigos individuales mediante los cuales AAVSO identifica a cada observador. Asumimos dificultades en la observación o fallas en la calibración del instrumento, procediendo a descartar todas las observaciones de una banda afectada para ese observador. En cuanto a la confiabilidad y calidad de los datos, podemos mencionar que se descartaron $\sim 0.5\%$ del total de datos procesados para obtener la Fig. 1; esto es, usamos 13679 datos, siendo 13749 los datos totales en todas las bandas.

Una vez corroborada la congruencia de los datos, seleccionamos las bandas de interés para calcular la magnitud bolométrica de la SN. Obtenemos múltiples entradas (una por cada observador y por cada observación) por día juliano. Las magnitudes reportadas se promedian para cada banda utilizando un grillado de un día juliano de duración.

La Fig. 1 muestra los resultados del procesamiento de estos datos, graficando su promedio y error estadístico a un σ para los filtros B, V, R e I. Una característica de los datos AAVSO es su crecimiento constante. El gráfico muestra datos hasta 400 días después de la explosión y se indica el corte alrededor de los 100 días,

momento en el que realizamos el ajuste hidrodinámico con los datos disponibles hasta la fecha (Bersten et al., 2024).

La información de velocidades fotosféricas que utilizamos en nuestros estudios, resulta del análisis de espectros públicos de WISEREP* Yaron & Gal-Yam (2012). Al respecto, pueden verse detalles en Bersten et al. (2024).

3. Modelado hidrodinámico

La herramienta principal utilizada para los estudios es el código hidrodinámico 1D detallado en Bersten et al. (2011).

En cuanto al análisis de los primeros ~ 20 días de evolución de la curva de luz bolométrica, $L_{bol}(t_{obs})$ se obtuvo a través de la integración del flujo observado que cubre las bandas ultravioleta, óptica e infrarroja cercana, y extrapolaciones de cuerpo negro para el flujo no observado. En Martínez et al. (2024) presentamos un análisis de la evolución de la curva de luz bolométrica con los valores de $L_{bol}(t_{obs})$ que mostramos en la Fig. 2, fechas en las que se registró el aumento repentino hasta la luminosidad y temperatura máximas, seguidas por una caída posterior también muy rápida. La forma exacta del máximo discrepa con la presentada por Zimmerman et al. (2024). Esto puede deberse al modo en que se extrapolaron los flujos hacia el rango ultravioleta. Los resultados, en Martínez et al. (2024) fueron publicados en forma contemporánea al artículo de Zimmerman et al. (2024), en la Fig. 2 los reunimos para facilitar su comparación. En esta escala, se destaca que nuestros modelos no logran reproducir la subida de la CL durante los primeros 3 días desde la explosión. Las fases tan tempranas son difícilmente captadas con buena cadencia en otras SNs.

El ajuste que favorecimos con los primeros datos incorpora un viento acelerado por la presión de radiación con parámetro $\beta \sim 5$ (Kudritzki et al., 1989). La tasa de pérdida de masa es $\dot{M} \sim 3 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$ confinado en una distancia ($\sim 8 \times 10^{14} \text{ cm}$). Ese valor de \dot{M} es alto en comparación a lo medido en RSGs. Hiramatsu et al. (2023) es otra referencia en cuanto al ajuste de la CL en las primeras épocas y a diferencia de nuestro trabajo, considera distintas variaciones temporales de \dot{M} , las que pueden justificarse como episodios eruptivos de pérdida de masa de la progenitora en sus etapas finales.

Cuando incorporamos un total de 100 días al estudio logramos un compromiso ligeramente diferente de los parámetros para que el modelo reproduzca la forma general de la CL. La incorporación de más datos y restricciones dadas por las velocidades fotosféricas nos permitieron inferir la cantidad y distribución interna del material radiactivo, ^{56}Ni . Cabe además aclarar que en este segundo estudio es más confiable el resultado de la cota a la maya eyectada que en las fases anteriores, en las cuales era más relevante el CSM.

Para el modelo preferido en Bersten et al. (2024) nos enfocamos en fases de la CL, posteriores a ~ 20 d, en las

*Weizmann Interactive Supernova Data Repository <https://wiserep.weizmann.ac.il>

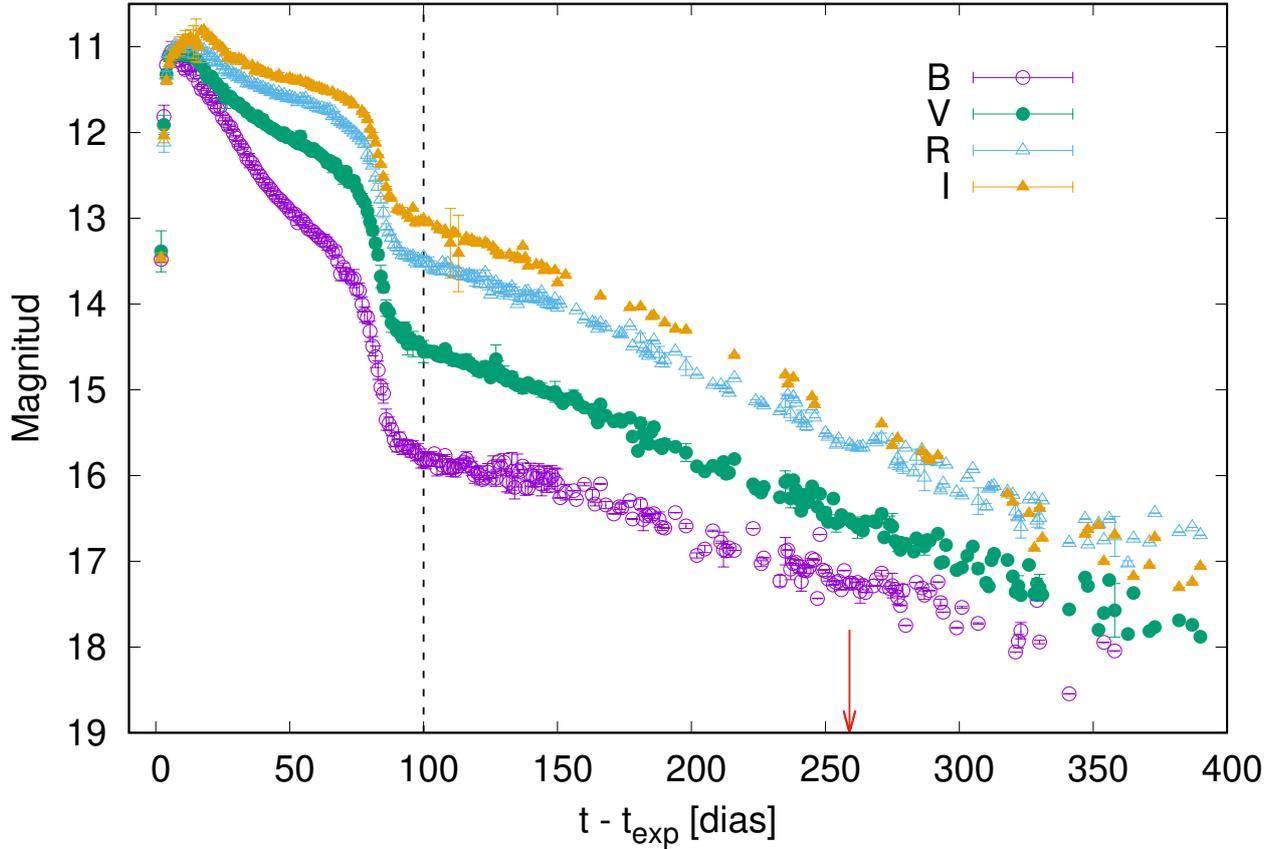


Fig. 1. Valores de magnitudes promedio por día Juliano para las observaciones AAVSO de la SN 2023ixf. Las barras corresponden a errores estadísticos. Se muestran las bandas B,V,R e I de Johnson hasta el día 400 luego de la explosión. La línea punteada vertical indica el corte de los datos utilizados para el ajuste hidrodinámico. En rojo, la flecha señala el momento en que fue tomado un espectro, en etapa nebular.

que el efecto del CSM ya no es dominante, y por velocidad de cómputo se consideró un CSM de velocidad constante ($\beta = 0$). Calculamos una grilla variando energías de la explosión, masa de ^{56}Ni y las condiciones iniciales, esto es progenitores de distinta masa ZAMS (*Zero Age Main Sequence*), evolucionados con el código MESA (Paxton et al., 2019). Asumiendo que la mezcla del níquel es casi completa en el material eyectado, encontramos que los modelos que mejor podían reproducir los 100 días de la CL tienen $M \lesssim 15 M_{\odot}$, $E_{\text{exp}} = 1.2 \times 10^{51}$ erg, $M^{56}\text{Ni} = 0.05 M_{\odot}$. En la Fig. 3 incorporamos el modelo con $M = 12 M_{\odot}$, mientras que en Bersten et al. (2024) se publicó junto con otras para la comparación del efecto que tiene utilizar un valor de masa mayor.

4. Trabajo posterior

A 259 días desde la explosión, se tomó un espectro de SN 2023ixf con el espectrógrafo multiobjeto del Telescopio Gemini Norte (ver detalles en Ferrari et al. 2024), fecha que se indica para referencia en la Fig. 1 con una flecha roja**. En esta época tardía el material eyectado

**Para más detalle, Ferrari et al. presentaron una charla y artículo separado en esta misma 66 Reunión Anual de la

ya no es ópticamente grueso, la SN ha entrado en su fase nebular y el tratamiento radiativo que hace el código (Sección 3) ya no es robusto. A partir del espectro mencionado se obtuvo el cociente de flujos de líneas de $[\text{Ca II}]/[\text{O I}]$, y se comparó con modelos de espectros nebulares, el cual favorece una masa del progenitor de $M_{\text{ZAMS}} < 15 M_{\odot}$, en concordancia con Bersten et al. (2024).

5. Discusión

A partir de la enorme cantidad de datos recabados sobre una de las SNs más cercanas de las últimas décadas, que cuenta con seguimiento intensivo desde épocas tempranas, son muchas las investigaciones desarrolladas y por ende, los trabajos publicados. Los mismos proponen valores para las propiedades de la estrella progenitora de SN 2023ixf y el material en su entorno. En nuestro caso, hemos propuesto la primer estimación de la masa de la estrella progenitora en base a modelos hidrodinámicos.

La evolución temporal inicial de la CL proporciona información sobre la propagación del choque, incluida la

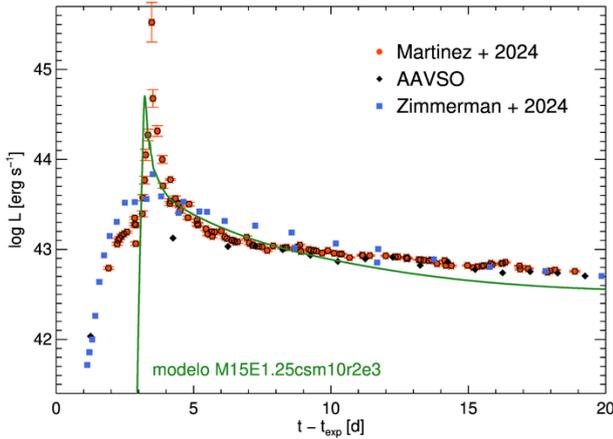


Fig. 2. Valores bolométricos obtenidos por Martinez et al. (2024) junto a los de Zimmerman et al. (2024). Incorporamos también una curva que obtuvimos como parte de la exploración de parámetros para SN 2023ixf. El modelo inicial tiene CSM, que retarda el tiempo del máximo de la CL aunque no acompaña el comportamiento de los datos de los primeros días.

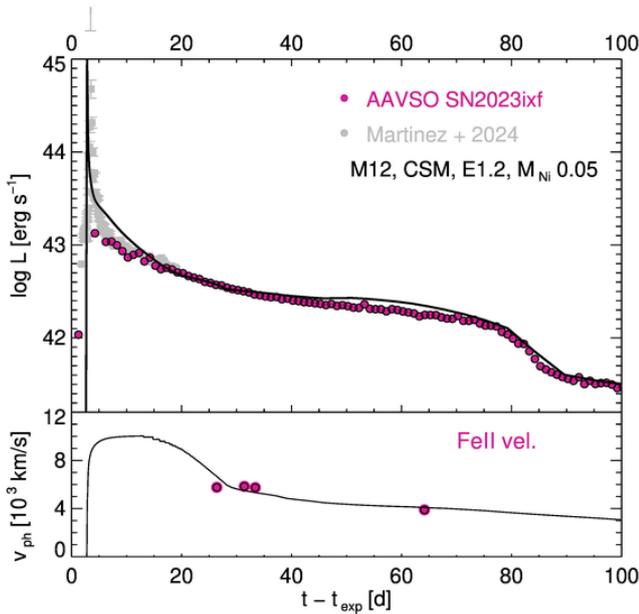


Fig. 3. Curva de luz bolométrica de SN 2023ixf donde se ha incorporado la interacción con CSM de velocidad constante. En este caso el modelo se enfoca en explicar los datos de L_{bol} entre 20 y 100 días desde la explosión, así como ser consistente con las velocidades fotosféricas medidas por espectroscopía, correspondientes a la línea Fe II $\lambda 5169$.

asimetría de la explosión y el entorno en las inmediaciones (Li et al., 2024). Nuestro código no está preparado para apartarse de la simetría esférica; sin embargo dió

rápida respuesta a la estimación de la cantidad de material radiactivo y de la masa del progenitor una vez observada la CL hasta épocas en las cuales influye su efecto (unos 100 días en este caso), y nos permitió dar sustento a la existencia de un posible CSM acelerado, en base a información temprana (Martinez et al., 2024).

La interpretación de la emisión fuera del visual (Nayana et al., 2024) apoya independientemente la presencia de un CSM denso. Cabe esperar que se logre un consenso mayor sobre las propiedades del mismo.

El análisis de distintas propuestas en la literatura sugiere una degeneración en los parámetros de la supernova y de la pérdida de masa que sufrió la progenitora en etapas finales. Hsu et al. (2024) intentan comprender si esa degeneración tiene un origen físico o si, por el contrario, surge de las metodologías adoptadas, que se suman a los aspectos menos conocidos de la evolución estelar.

Sin dudas queda mucho por comprender de esta SN cercana, tanto para aprovechar al máximo la información existente como para definir qué mejoras serían necesarias en los aspectos observacionales y teóricos para responder a las preguntas que queden abiertas.

Agradecimientos: Las investigaciones fueron parcialmente solventadas por el PI UNRN 40B1039.

Referencias

- Bersten M.C., Benvenuto O., Hamuy M., 2011, *ApJ*, 729, 61
 Bersten M.C., et al., 2024, *A&A*, 681, L18
 Ferrari L., et al., 2024, *A&A*, 687, L20
 Hiramatsu D., et al., 2023, *ApJL*, 955, L8
 Hsu B., et al., 2024, arXiv e-prints, arXiv:2408.07874
 Iwata Y., et al., 2024, arXiv e-prints, arXiv:2411.07542
 Khazov D., et al., 2016, *ApJ*, 818, 3
 Kloppenborg B., 2023, <https://www.aavso.org>
 Kudritzki R.P., et al., 1989, *A&A*, 219, 205
 Li G., et al., 2024, *Nature*, 627, 754
 Martinez L., et al., 2024, *A&A*, 683, A154
 Matsuoka T., 2024, H.W. Lee, S.J. Chang, K.C. Leung (Eds.), *The Twelfth Pacific Rim Conference on Stellar Astrophysics, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 536, 65
 Nakahata M., Super-Kamiokande Collaboration, 2023, *The Astronomer's Telegram*, 16070, 1
 Nayana A.J., et al., 2024, arXiv e-prints, arXiv:2411.02647
 Panjkov S., et al., 2024, *PASA*, 41, e059
 Paxton B., et al., 2019, *ApJS*, 243, 10
 The LIGO Scientific Collaboration, et al., 2024, arXiv e-prints, arXiv:2410.16565
 Thwaites J., et al., 2023, *The Astronomer's Telegram*, 16043, 1
 Xiang D., et al., 2024, *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*, 67, 219514
 Yamanaka M., Fujii M., Nagayama T., 2023, *PASJ*, 75, L27
 Yaron O., Gal-Yam A., 2012, *PASP*, 124, 668
 Zimmerman E.A., et al., 2024, *Nature*, 627, 759