

Curvas de luz de supernovas con el telescopio HSH

A. Mendez Llorca^{1,2}, G. Folatelli^{1,2}, L. Martínez^{2,3}, K. Ertini^{1,2} & L. Ferrari^{1,2}

¹ *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

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

³ *Universidad Nacional de Río Negro, Argentina*

Received: 09 February 2024 / Accepted: 24 May 2024

©The Authors 2024

Resumen / El estudio de las curvas de luz de supernovas (SNs) es fundamental para poder comprender las propiedades de las estrellas progenitoras y estimar distancias cosmológicas. En este trabajo presentamos los datos obtenidos en la primera campaña de observación hecha por el grupo SOS (Simulaciones y Observaciones de Supernovas) utilizando el telescopio de 60 cm Helen Sawyer Hogg (HSH) del Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) en el año 2021. Los principales objetivos de esta campaña fueron: I) determinar la viabilidad de utilizar este telescopio para el seguimiento de SNs, II) adquirir fotometría de objetos transitorios dentro de las primeras horas/días luego de su descubrimiento, III) obtener curvas de luz multi-banda de SNs seleccionadas. En las 37 noches consecutivas que duró la campaña, se observaron 70 objetos transitorios, siendo 27 de estos confirmados como SNs. El grupo SOS realizó tres anuncios sobre la confirmación del descubrimiento temprano para 5 de las SNs. La diferencia de tiempo media entre el descubrimiento y nuestra primera observación fue de 31 horas. A las tres SNs Tipo Ia con mayor cobertura temporal de la muestra se les estimaron sus distancias hacia su galaxia anfitriona, el enrojecimiento producido por su galaxia y el parámetro de decaimiento del brillo Δm_{15} . Las distancias de luminosidad obtenidas tienen incertezas típicas de $\sim 10\%$. Los resultados muestran un buen acuerdo con las distancias determinadas mediante un modelo cosmológico de expansión.

Abstract / The study of supernova (SN) light curves is crucial to understand the properties of the progenitor stars and to estimate cosmological distances. In this work we present the data obtained in the first observation campaign performed by the SOS (Supernova Observations and Simulations) group using the 60 cm Helen Sawyer Hogg (HSH) telescope at CASLEO in 2021. The main goals of this campaign were: I) to determine the feasibility of using this telescope for SNe follow-up, II) to acquire photometry of transients within hours/days from discovery, and III) to obtain multi-band light curves of selected SNe. During 37 consecutive nights, 70 transients were observed, 27 of them confirmed as SNe. The SOS group made three announcements with the early discovery confirmation of 5 SNe. The average delay between the discovery and our first observation was 31 hours. For the three Type Ia SNe with the best coverage within our sample, we estimated the distances to their host galaxy, the reddening of the host and the decline rate parameter Δm_{15} . The obtained luminosity distances have typical uncertainties of $\sim 10\%$. The results are in good agreement with the distances determined by a cosmological expansion model.

Keywords / supernovae: general — supernovae: individual (SN 2021vtq, SN 2021wjb, SN 2021xju) — galaxies: distances and redshifts

1. Introducción

Las supernovas (SNs) son eventos explosivos que suceden al final de la vida evolutiva de ciertos tipos de estrellas. El estudio de las curvas de luz durante los momentos iniciales de las SNs tiene gran valor para poder inferir ciertos parámetros de la estructura externa de los progenitores, tales como su radio y perfil de densidad (Bersten et al., 2012). Dado que las SNs se producen de forma inesperada y son muy complicadas de prever, los datos fotométricos tempranos eran difíciles de obtener con las tecnologías de antaño. En la actualidad, los relevamientos se encuentran a la vanguardia para detectar y descubrir cientos de nuevos objetos transitorios cada noche (Chambers et al., 2016; Tartaglia et al., 2018; Masci et al., 2019, por mencionar algunos). Estos descubrimientos tempranos motivan campañas de seguimiento exhaustivo de SNs desde etapas muy tempranas.

Es por ello que por parte del grupo SOS* (Simulaciones y Observaciones de Supernovas) del Instituto de Astrofísica de La Plata, se propuso llevar a cabo una de estas campañas en el año 2021 para recolectar curvas de luz tempranas de SNs haciendo uso del telescopio Helen Sawyer Hogg (HSH) en CASLEO.

Luego de una breve descripción de los alcances de la campaña de observación (Sección 2), en este trabajo nos centraremos en el análisis de tres SNs Tipo Ia (SNs Ia) con las que determinaremos distancias (Sección 3). Este tipo de SNs está ampliamente estudiado y es conocido por ser un "faro estándar" para la estimación de distancias extragalácticas. Esto se debe a que se trata de la explosión de una enana blanca en condiciones relativamente uniformes en todos los casos. Es por eso que muestran curvas de luz homogéneas y alcanzan

*<https://sos.fcaglp.unlp.edu.ar/>

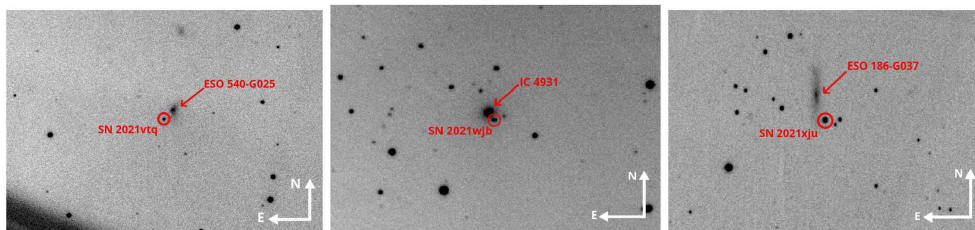


Fig. 1. Imágenes en banda R obtenidas por el grupo SOS de la campaña de observación del 2021 con el telescopio HSH donde se muestran las SNs Ia (circulo rojo) analizadas en este trabajo y sus galaxias anfitrionas (flechas). *Panel izquierdo:* SN 2021vtq. *Panel central:* SN 2021wjb. *Panel derecho:* SN 2021xju.

Tabla 1. Magnitud límite alcanzada en la campaña de observación en cada banda para diferentes intervalos de FWHM.

FWHM [arcsec]	2 a 3.5	3.5 a 4.5	4.5
m_B [mag]	17.5 ± 0.32	17.06 ± 0.53	16.68 ± 0.43
m_V [mag]	17.19 ± 0.42	16.77 ± 0.55	16.3 ± 0.4
m_R [mag]	17.55 ± 0.61	17.07 ± 0.58	16.45 ± 0.81
m_I [mag]	16.83 ± 0.39	16.47 ± 0.39	15.91 ± 0.5

luminosidades similares. En detalle, existe una relación empírica entre el ancho de las curvas de luz y el máximo de luminosidad. Las SNs Ia más luminosas tienen curvas de luz más anchas y las más débiles presentan curvas de luz más angostas. Phillips (1993) estableció el parámetro $\Delta m_{15}(B)$, la diferencia en magnitud en la banda B entre el máximo y los 15 días posteriores, para cuantificar la relación. Este método lo aplicaremos a nuestras tres SNs Ia y así obtendremos las distancias a sus galaxias anfitrionas.

2. Campaña y observaciones

La campaña de observación del grupo SOS tuvo una duración de 37 noches consecutivas asignadas previamente entre los meses de agosto y septiembre de 2021. Se llevó a cabo utilizando el telescopio de 60 cm HSH de CASLEO. Las imágenes fueron obtenidas en los filtros $BVRI$. Debido a problemas con el seguimiento del telescopio, fue necesario tomar imágenes individuales para luego combinarlas y generar la imagen final. Para cada época se tomaron 20 imágenes individuales y los tiempos de exposición de cada una fueron de: 60 s para las bandas VRI y 90 s para B , llegando a un total de 1 200 s y 1 800 s, respectivamente.

Los objetos a observar fueron seleccionados mediante las alertas diarias de ALERCE** (Förster et al., 2021) y TNS (*Transient Name Server*)***. Las primeras noches se priorizaron eventos nuevos para armar las listas de seguimiento. Cada día se agregaban nuevos objetos y se realizaba el seguimiento de los anteriores. En caso de que algún objeto fuese muy débil, mayor a 18 mag, o se confirmaba espectroscópicamente que no era SN, se dejaba de hacer su seguimiento. A partir del décimo día de la campaña el 80 % del tiempo se dedicó al seguimiento de las SNs que cumplían las condiciones mencionadas y

**<https://alerce.science/services/sn-hunter/>

***<https://www.wis-tns.org/>

el resto del tiempo a nuevos eventos con la posibilidad de agragarlos a la lista de seguimiento. Se observaron un total de 70 objetos transitorios, de los cuales 27 (39 %) fueron catalogados como SNs, siendo 17 Tipo Ia, 2 Tipo Ib/c, 2 Tipo Ic y 6 Tipo II. El intervalo de tiempo medio entre el descubrimiento y nuestra primera observación fue de 31 horas, por lo que se pudo recolectar datos muy tempranos de los objetos. Gracias a esto pudimos publicar tres anuncios con la confirmación del descubrimiento de cinco SNs (Ertini et al., 2021; Martínez et al., 2021; Pessi et al., 2021). La calidad de imagen, medida como el ancho a mitad de altura (*full width half maximum*, FWHM) de los objetos puntuales fluctuó entre 2.2 y 7 arcsec, con un valor promedio de 3.3 arcsec. Estos altos valores se deben a la sumatoria de factores como *seeing*, problemas de seguimiento y foco.

2.1. Procesado de imágenes y fotometría

Todas las imágenes individuales obtenidas en la campaña fueron reducidas usando IRAF (Tody, 1986). La solución astrométrica se realizó con *Astrometry.net* (Lang et al., 2010). Luego, todas las imágenes fueron combinadas para generar la imagen final. Estos procesos fueron llevados a cabo mediante códigos desarrollados por los miembros del grupo SOS.

La fotometría de las imágenes se hizo con el programa AUTOPHOT (*Automated Photometry Of Transients*; Brennan & Fraser, 2022), el cual está diseñado en PYTHON. El método utilizado fue de fotometría diferencial de PSF (*point spread function*). Solamente para la SN 2021wjb, que se encontraba muy contaminada por su galaxia anfitriona, fue necesario recurrir al método de sustracción de galaxia. Para restar la contribución de la galaxia se tomaron imágenes plantilla de *Skymapper* (Onken et al., 2019) en las bandas gri , siendo las mejores disponibles para esta galaxia. Aunque las bandas a restar no fueron las mismas que las de nuestras imágenes, se pudieron recuperar muchas épocas donde el análisis fotométrico no era capaz de realizarse y también incrementar la precisión de las magnitudes ya calculadas.

Mediante estos datos fue posible determinar la magnitud límite alcanzada en la campaña, es decir, la magnitud para una relación señal-ruido de 5; y se la separó en tres intervalos respecto del FWHM (ver Tabla 1). El objetivo, que está en proceso, es crear una calculadora de tiempo de integración para el telescopio HSH.

Tabla 2. Características de las SNs Ia analizadas.

SN	2021vtq	2021wjb	2021xju
R.A.	$0^h47^m38^s.94$	$20^h0^m49^s.92$	$20^h22^m30^s.96$
Dec.	$-20^\circ31'24''.46$	$-38^\circ34'38''.03$	$-53^\circ16'44''.15$
$E(B - V)_{MW}$ [mag]	0.016	0.063	0.043
Época de descubrimiento [JD]	2459438.91	2459444.59	2459457.68
Primera observación [JD]	2459440.25	2459450.03	2459458.1
Galaxia anfitriona	ESO 540-G025	IC 4931	ESO 186-G037
Redshit Heliocéntrico	0.02089 ± 0.00015	0.02004 ± 0.00002	0.01558 ± 0.00015
Redshift CMB	0.01988 ± 0.00015	0.01948 ± 0.00004	0.01514 ± 0.0015

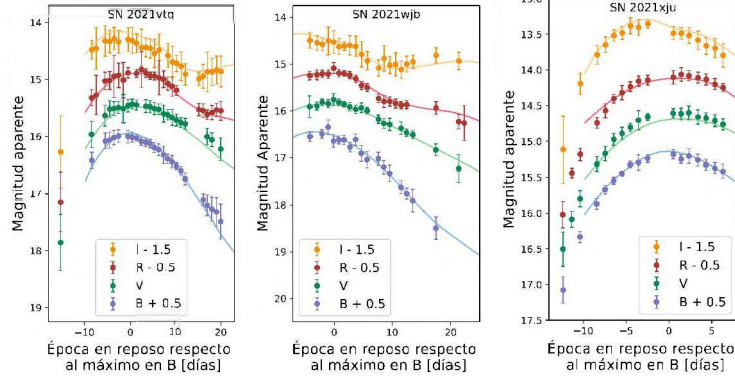


Fig. 2. Curvas de luz de las SNs Ia analizadas: SN 2021vtq (*panel izquierdo*), SN 2021wjb (*panel central*) y SN 2021xju (*panel derecho*). Se muestran las magnitudes estimadas para cada SN calculadas con AUTOPHOT (puntos) y los ajustes de curvas de luz patrón de SNOOPY (líneas sólidas) para las bandas *BVRI*.

3. Resultados

Este trabajo hace énfasis en las tres SNs Ia con la mayor cobertura temporal de la campaña: SN 2021vtq, SN 2021wjb y SN 2021xju (Fig. 1). En la Tabla 2 se presentan datos de las mismas. Los valores de enrojecimiento de la Vía Láctea ($E(B - V)_{MW}$; Schlafly & Finkbeiner, 2011) y los *redshift* fueron extraídos de *NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)* ****. En la Fig. 2 se presentan las curvas de luz multi-banda de estas SNs, que se corresponden a las típicas curvas de luz de las SNs Ia. Para el eje temporal utilizamos la época en reposo respecto del máximo en la banda *B* para hacer comparaciones de SNs Ia a distintos *redshifts*. Para las tres SNs tenemos datos de los máximos en todas las bandas. De la SN 2021vtq y la SN 2021xju obtuvimos datos muy tempranos, más de 10 días antes del máximo, con intervalos de tiempo desde la detección hasta nuestra primera observación de 1.3 y 0.4 días, respectivamente.

Para la estimación de las distancias usamos el programa SNOOPY (Burns et al., 2011), el cual ajusta curvas de luz patrón de SNs Ia a los datos fotométricos. Los parámetros que deriva el programa son: Δm_{15} , la época del máximo en la banda *B*, el enrojecimiento de la galaxia anfitriona ($E(B - V)_{host}$), y el módulo de distancia (μ). En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos y, además, la distancia de luminosidad (D_L), la distancia en base a un modelo cosmológico de expansión (D_z) y una distancia calculada por el método de Tully-Fisher (D_{T-F}). D_L fue estimada con el módulo de distancia. D_z fue inferida con el uso de una calcu-

ladora online † aplicando la ley de Hubble, tomando $H_0 = 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ y el *redshift* respecto del CMB con un error de 0.001 por efectos dinámicos de las galaxias. Los errores corresponden a los errores estadísticos de los datos y errores sistemáticos del programa, respectivamente. En todos los valores calculados el error que domina es el sistemático, y entendemos que se debe a transformaciones fotométricas que realiza el programa para llevar las bandas *BVRI* a las bandas predeterminadas *BVgrI* que utiliza. La SN 2021xju es la que mayor error sistemático presenta, debiéndose a la poca cantidad de datos pasado el máximo. Para que estos errores disminuyan sería necesario obtener las magnitudes en las bandas que usa el programa y tener una mayor cobertura temporal postmáximo, ya que el programa toma plantillas que están entre -10 a 80 días respecto del máximo en la banda *B*.

Las distancias calculadas con el método de las curvas de luz se encuentran en buen acuerdo con las inferidas mediante un modelo cosmológico. Las diferencias entre éstas se encuentran por debajo del 13%. Además, para la SN 2021wjb tenemos para comparar una distancia de Tully-Fisher a su galaxia (Dale et al., 1999), que también está en concordancia.

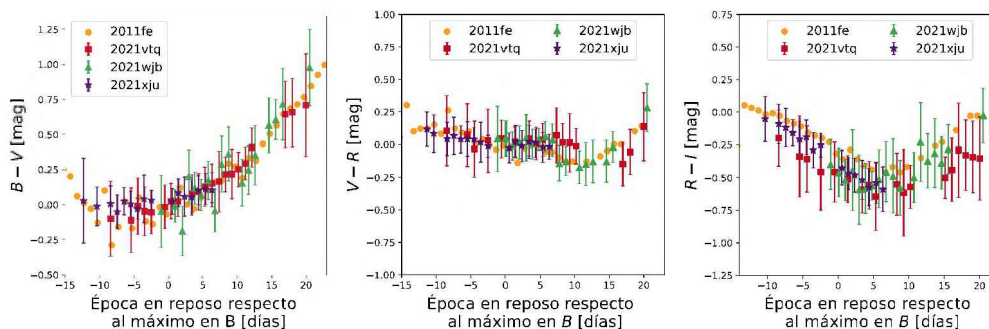
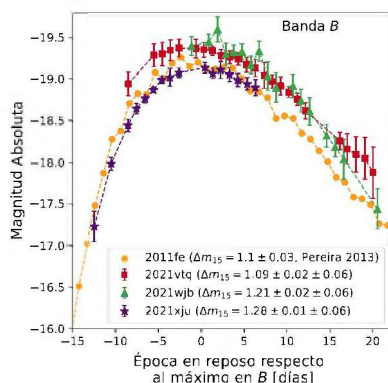
La SN 2021wjb es la que presentó un valor más alto de $E(B - V)_{host}$ de las tres SNs, posiblemente se deba a que también es la que se encuentra más embebida en su galaxia anfitriona de las SNs estudiadas. En cambio, la SN 2021xju presenta un valor negativo, pero se encuentra debajo de su incerteza, siendo compatible con

****<http://ned.ipac.caltech.edu/>

†<https://astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>

Tabla 3. Parámetros de las SNs derivados por SNOOPY y distancias mediante diferentes métodos.

SN	2021vtq	2021wjb	2021xju
Δm_{15} [mag]	$1.093 \pm 0.02 \pm 0.06$	$1.207 \pm 0.02 \pm 0.06$	$1.282 \pm 0.01 \pm 0.06$
t_{\max} [JD]	$245955.83 \pm 0.161 \pm 0.34$	$2459451.15 \pm 0.336 \pm 0.34$	$2459470.683 \pm 0.162 \pm 0.34$
$E(B - V)_{\text{host}}$ [mag]	$0.037 \pm 0.014 \pm 0.06$	$0.119 \pm 0.016 \pm 0.06$	$-0.023 \pm 0.01 \pm 0.06$
μ	$34.650 \pm 0.016 \pm 0.124$	$34.712 \pm 0.026 \pm 0.143$	$33.724 \pm 0.017 \pm 0.313$
D_L [Mpc]	$85.11 \pm 0.63 \pm 4.86$	$87.58 \pm 1.05 \pm 5.77$	$55.56 \pm 0.43 \pm 8.01$
D_z [Mpc]	84.1 ± 4.2	82.4 ± 4.2	63.8 ± 4.2
D_{T-F} [Mpc]	-	81.1 ± 5.2	-


Fig. 3. Curvas de color de las SNs Ia estudiadas y la SN 2011fe, corregidas por la extinción galáctica y de la galaxia anfitriona. *Panel izquierdo:* Color $B - V$. *Panel central:* Color $V - R$. *Panel derecho:* Color $R - I$.

Fig. 4. Curvas de luz absoluta en la banda B de las SNs Ia corregidas por extinción galáctica y de la galaxia huésped.

un valor nulo de enrojecimiento y para el trabajo se lo tomó como cero.

En la Fig. 3 se muestran las curvas de color de las tres SNs corregidas por extinción de la Vía Láctea y de la galaxia anfitriona. Para comparar se agregó a la SN 2011fe, una SN Ia típica que fue muy estudiada y tiene datos de gran calidad ya que explotó en la galaxia M101 (~ 6.6 Mpc). En los tres colores observamos que nuestras tres SNs siguen los mismos comportamientos que la SN 2011fe. Asimismo, disponemos de colores en las etapas tempranas de estas SNs que suelen ser escasos.

En relación al parámetro Δm_{15} , la SN 2021vtq debería ser más luminosa que las otras dos SNs y tener la curva de luz más ancha. En la Fig. 4 se presentan las curvas de luz absolutas y se ven reflejados los aspectos mencionados. Sin embargo, observamos que la luminosidad de la SN 2021vtq y la SN 2021wjb son casi iguales. Entendemos que esto se debe a que el método tiene su

grado de dispersión y la estimación de las distancias y extinciones también presentan incertezas.

4. Trabajo a futuro

Los datos de las SNs restantes continúan siendo analizados y sigue en desarrollo la calculadora de tiempo de exposición para el telescopio HSH.

Aunque la campaña fue exitosa, todavía no se pudo volver a repetir por la gran cantidad de tiempo que conlleva. Sin embargo, se planea realizar campañas más cortas utilizando el HSH y siguiendo el mismo enfoque.

Referencias

- Bersten M.C., et al., 2012, ApJ, 757, 31
 Brennan S.J., Fraser M., 2022, A&A, 667, A62
 Burns C.R., et al., 2011, AJ, 141, 19
 Chambers K.C., et al., 2016, The pan-starrs1 surveys
 Dale D.A., et al., 1999, AJ, 118, 1489
 Ertini K., et al., 2021, Transient Name Server AstroNote, 225, 1
 Förster F., et al., 2021, AJ, 161, 242
 Lang D., et al., 2010, The Astronomical Journal, 139, 1782–1800
 Martinez L., et al., 2021, Transient Name Server AstroNote, 237, 1
 Masci F.J., et al., 2019, PASP, 131, 018003
 Onken C.A., et al., 2019, PASA, 36, e033
 Pessi P., et al., 2021, Transient Name Server AstroNote, 226, 1
 Phillips M.M., 1993, ApJL, 413, L105
 Schlafly E.F., Finkbeiner D.P., 2011, ApJ, 737, 103
 Tartaglia L., et al., 2018, ApJ, 853, 62
 Tody D., 1986, *Instrumentation in astronomy VI*, vol. 627, 733