



# Modelando SN 2016gkg, la supernova argentina

M. Orellana<sup>1,2</sup>, M.C. Bersten<sup>3</sup>, G. Folatelli<sup>3</sup>, F. García<sup>4</sup>, O. Benvenuto<sup>3</sup>, V.A. Buso<sup>5</sup>, J.L. Sánchez<sup>6</sup>

<sup>1</sup> UNRN Sede Andina, Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

<sup>3</sup> Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

<sup>4</sup> Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CICPBA, Argentina

<sup>5</sup> Observatorio Astronómico Busoniano, Argentina

<sup>6</sup> Observatorio Astronómico Geminis Austral, Argentina

Contacto / morellana@unrn.edu.ar

**Resumen** / Víctor Buso, astrónomo aficionado de Rosario, descubrió la que se llamaría SN 2016gkg en la galaxia NGC 613, registrando en forma única datos fotométricos de la llegada de la onda de choque a la superficie de una estrella que se encuentra explotando como supernova (SN). Luego del descubrimiento se realizaron campañas intensivas para monitorearla, lo que permitió clasificarla como de Tipo IIb. En nuestro caso, contamos con datos fotométricos y espectroscópicos que pueden interpretarse en forma diferente a la propuesta por otros autores, y son consistentes con las imágenes preexplosión del telescopio espacial *Hubble*. Establecemos comparaciones con SN 2011dh, una SN similar que ha sido muy estudiada en el contexto de las que se originan en sistemas binarios interactuantes, y presentamos un modelo hidrodinámico que puede dar cuenta del singular cambio de brillo de SN 2016gkg en distintas etapas.

**Abstract** / Víctor Buso, an amateur astronomer from Rosario, discovered what would be called SN 2016gkg in galaxy NGC 613, recording in unique form photometric data of the arrival of the shockwave to the surface of a star when it was exploding as a supernova (SN). After the discovery, intensive campaigns were carried out to monitor it, which allowed classify it as Type IIb. In our case, we have photometric and spectroscopic data that can be interpreted differently than the one proposed by other authors, and are consistent with the pre-explosion images of the *Hubble* space telescope. We establish comparisons with SN 2011dh, a similar SN that has been well studied in the context of those originated in interacting binary systems, and present an hydrodynamic model that can account for the unique change of brightness of SN 2016gkg in different phases.

**Keywords** / stars — supernovae: stars — supernovae: individual (SN 2016gkg)

## 1. Descubrimiento y observaciones

La galaxia NGC 613 ( $z = 0.00492$ ), se encontraba cerca del cenit rosarino el 20 de septiembre de 2016, y fue casualmente elegida para probar una nueva cámara (ZWO ASI1600 MM-C) montada en un telescopio Newtoniano de 406 mm de diámetro (Fig. 1). La cadencia de las observaciones registradas por Víctor Buso esa noche, con 20 segundos de exposición (evitando el brillo del cielo de la ciudad) es difícilmente comparable a la que pueden conseguir las búsquedas sistemáticas, lo que sumado al límite profundo de detección,  $V > 19.4$  mag a  $5\sigma$ , constituye un conjunto de datos sin precedente para el descubrimiento de supernovas. Los detalles de la reducción de los datos observados se describen en Bersten et al. (2018, en prensa).

Las imágenes individuales (filtro *Clear*) han sido procesadas y combinadas en distintas series para obtener valores fotométricos de gran confianza. La pendiente positiva está presente sin importar cómo se combinen dichas imágenes (102 en total). En 25 minutos la SN duplicó su flujo visual. Un ajuste lineal brinda una tasa extremadamente rápida:  $43 \pm 6$  mag  $d^{-1}$ . La extrapolación hacia imágenes anteriores tomadas en la misma noche, cuando no se detectaba aún, es  $V \simeq 24$  mag (se

indica en magnitud absoluta en la Fig. 2). Esto permite restringir el momento de la explosión a muy pocas horas antes de que se descubra la SN.

La teoría predice un pico muy pronunciado en la emisión de una supernova en los primeros minutos a horas, debido a la llegada del frente de choque a la superficie, llamado *shock breakout* (SBO). En esta breve etapa la emisión es mayor en rayos X o UV. Los detalles del SBO permiten acotar algunas características de la estructura estelar del progenitor y su envoltura, y por lo tanto, su historial de pérdida de masa en etapas tardías. La detección fortuita de una SN en esta fase, con un muestreo que permita obtener este tipo de resultados, representa un desafío para la posible sistematización de las observaciones. En Bersten et al. (2018, en prensa) se estima una chance extremadamente baja,  $\leq 10^{-6}$ , para que evento y observador encuentren esta sincronía.

## 2. Curva de luz

La Fig. 2 muestra los datos del descubrimiento y de los primeros 25 días de seguimiento por distintos autores: Kilpatrick et al. (2017), Tartaglia et al. (2017), Arcavi et al. (2017). El seguimiento observacional realmente intensivo de la supernova fue impulsado por la publicación

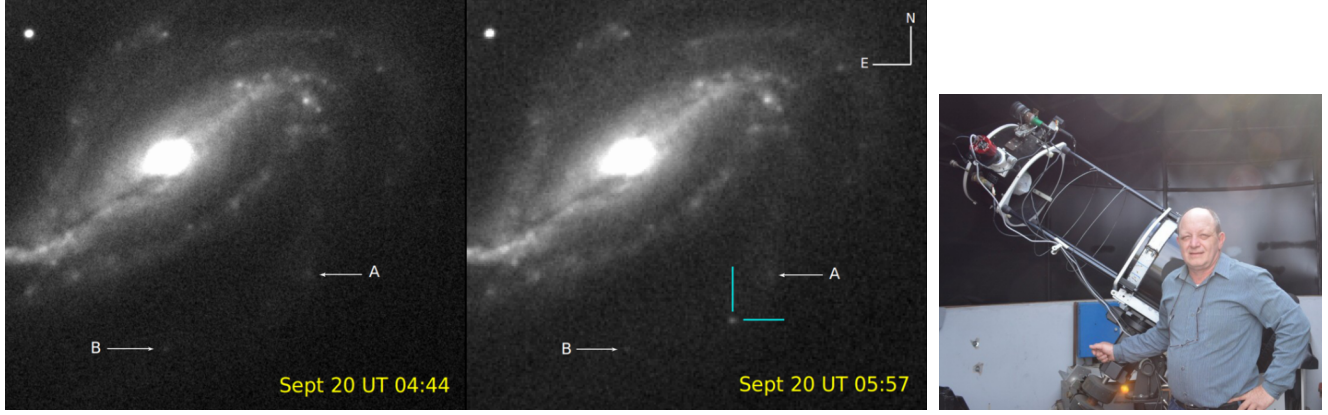


Figura 1: SN2016gkg en NGC 613: la precisión del momento estimado de la explosión es, a lo sumo, de unas 3 horas. El progenitor pudo identificarse en imágenes de archivo del telescopio espacial *Hubble* del 2001. A la derecha, Víctor Buso y su telescopio.

de Otero & Buso (2016). Durante los tres días siguientes a la explosión el desarrollo del máximo de la curva de luz debido al enfriamiento por la expansión es uno de los mejores observados hasta ahora. Piro et al. (2017) ha modelado esta fase sin todos los datos del SBO. El decaimiento del níquel  $^{56}\text{Ni}$  potencia el máximo de la etapa siguiente, que para esta SN ocurrió cerca de 21 días después de la explosión.

En la Fig. 2 también se incluye el resultado de nuestro modelo hidrodinámico. La curva continua corresponde al mejor ajuste, pero en realidad se realizaron numerosas corridas explorando el espacio de parámetros y/o las condiciones iniciales del código documentado en Bersten et al. (2011). Dicho código cuenta, entre otras características, con la capacidad de incorporar el aporte energético del decaimiento del  $^{56}\text{Ni}$ . Como condición inicial se le debe proveer la estructura y composición química de la estrella que explota (progenitor), lo cual es de por sí un problema.

La ubicación del progenitor en el diagrama Hertzsprung–Russell (donde  $L$  y  $T_{\text{eff}}$  se estimaron en base a imágenes preexplosión) es poco consistente con los recorridos evolutivos de estrellas masivas en evolución aislada pues no terminan con un núcleo descubierto, mayormente de He, tan poco masivo. Resulta más apropiado considerar el escenario de evolución binaria (en vez de evolución aislada) para modelar SN 2016gkg, ver también Kilpatrick et al. (2017). Con respecto a los parámetros que definen a dicho sistema binario, cabe mencionar que existe más de una solución posible, pero no hemos buscado todo los rangos porque hay más de un parámetro degenerado.

### 3. Comparaciones

En la Fig. 3 mostramos las supernovas que cuentan con observaciones más tempranas en el óptico (o bandas fotométricas equivalentes, pues la pendiente es en el sistema en reposo). La única que ha mostrado un incremento similar es SN 2006aj que está asociada a una explosión de rayos gama (*GRB*) y probablemente tenga otros mecanismos en juego, y por ello, mayor luminosidad (Cam-

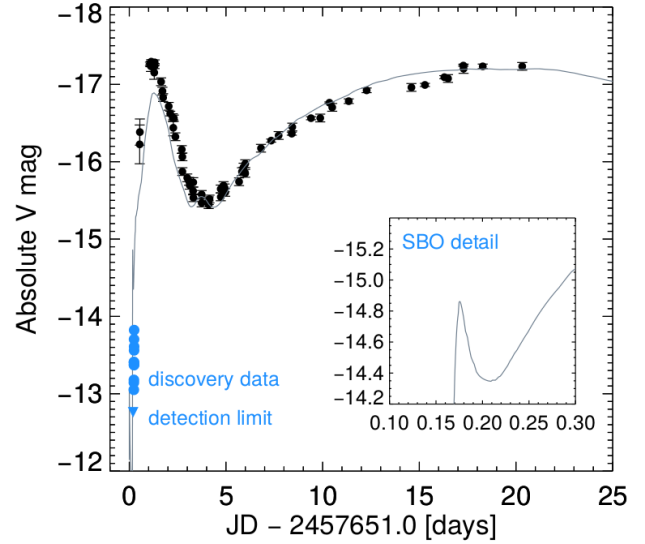


Figura 2: Fotometría de los primeros 25 días de SN2016gkg. El trazo continuo corresponde a nuestro modelo hidrodinámico que mejor ajusta los datos. El recuadro muestra el máximo correspondiente al SBO (*shock breakout*). Interpretamos los datos del descubrimiento (celeste) como la subida previa a este momento, cuando literalmente la estrella estaba explotando.

pana et al., 2006). El error de la pendiente que ajusta los datos de Buso (etiqueta *discovery* en la Fig. 2) es mucho menor.

### 4. Conclusiones

En Bersten et al. (2018, en prensa) reportamos todos los argumentos para interpretar la escalada del brillo observado por V. Buso como evidencia del SBO, como se muestra en la Fig. 2. A través del modelado, se estiman la energía de la explosión ( $E_k \sim 1.2 \times 10^{51}$  erg), masa eyectada ( $\sim 3.4 M_{\odot}$ ), y masa de níquel ( $M_{\text{Ni}} \sim 0.085 M_{\odot}$ ). Se encontró además que para  $t < 1$  día el ajuste mejora con la inclusión de material circunstelar

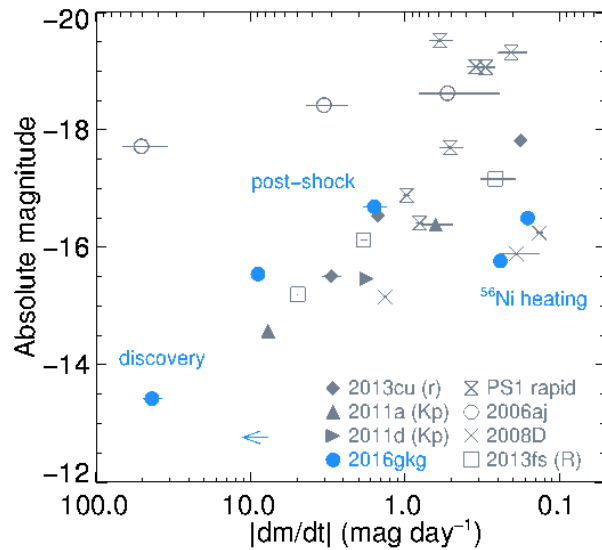


Figura 3: Tasa de crecimiento en magnitudes por día para las supernovas que han sido descubiertas en forma temprana. Es notoria la posición del descubrimiento de SN 2016gkg en comparación con las demás. Se incluyen datos de Drout et al. (2014), Modjaz et al. (2009), Rubin & Gal-Yam (2017), Gal-Yam et al. (2014), Yaron et al. (2017) y el gráfico se basa en el que presentaron Tanaka et al. (2016) pero en este caso se llevó al filtro V o el más próximo disponible.

extendido rico en hidrógeno. De acuerdo a nuestros resultados, el radio estelar y la masa involucrada en dicha envoltura se encuentra en el rango de valores típicos de las supernovas de tipo IIb. En particular, la estrella progenitora de SN 2016gkg es sólo ligeramente más masiva y extendida que la del caso más estudiado, SN 2011dh Benvenuto et al. (2013) que se interpreta como resultado de evolución binaria.

*Agradecimientos:* V. B. agradece a sus padres, Julio e Hilda, su señora Viviana Biciré e hija, Camila Iris; y a su amigo, A. Kleiman. J. S. agradece la asistencia de F. Rodríguez. V. B. y J. S. desean agradecer a R. Pizzi y F. Bustos. Esta investigación es parcialmente financiada por el PI40B531 de la Universidad Nacional de Río Negro, el PICT-2015-3083 y PIP 11220150100746CO.

## Referencias

- Arcavi I., et al., 2017, ApJL, 837, L2  
 Benvenuto O. G., Bersten M. C., Nomoto K., 2013, ApJ, 762, 74  
 Bersten M. C., Benvenuto O., Hamuy M., 2011, ApJ, 729, 61  
 Campana S., et al., 2006, Nature, 442, 1008  
 Drout M. R., et al., 2014, ApJ, 794, 23  
 Gal-Yam A., et al., 2014, Nature, 509, 471  
 Kilpatrick C. D., et al., 2017, MNRAS, 465, 4650  
 Modjaz M., et al., 2009, ApJ, 702, 226  
 Otero S., Buso V., 2016, Transient Name Server Discovery Report, 695  
 Piro A. L., et al., 2017, ApJ, 846, 94  
 Rubin A., Gal-Yam A., 2017, ApJ, 848, 8  
 Tanaka M., et al., 2016, ApJ, 819, 5  
 Tartaglia L., et al., 2017, ApJL, 836, L12  
 Yaron O., et al., 2017, Nature Physics, 13, 510