



# Espectroscopía nebular de la supernova 2016gkg

L. Ferrari<sup>1</sup> & G. Folatelli<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

<sup>2</sup> *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

Contacto / luciaferrari4@gmail.com

**Resumen** / Se presenta un análisis espectroscópico de la supernova de tipo IIb SN 2016gkg, a partir de observaciones obtenidas con el telescopio Gemini Sur en agosto de 2017, aproximadamente un año después de la explosión, momento en que la supernova se encontraba en su fase nebular. Los espectros nebulares de supernovas muestran de manera directa la emisión proveniente de las zonas cercanas al antiguo núcleo estelar, por lo que su estudio es de gran interés astrofísico, dado que brinda información acerca de la estructura de la estrella progenitora y sobre el mecanismo de explosión. Se realiza una estimación de la masa del progenitor en base a intensidades relativas de líneas de emisión y se analizan posibles asimetrías a partir de los corrimientos Doppler de las mismas. Además, se hace una comparación con espectros de supernovas del mismo tipo obtenidos en fases similares.

**Abstract** / The spectroscopic analysis of the type IIb supernova 2016gkg is presented. These results are based on observations obtained with the Gemini South telescope on August 2017, approximately one year after the explosion, when the supernova was in its nebular phase. The nebular spectrum directly shows the emission coming from the areas near the former stellar nucleus, which makes its study of great astrophysical interest, providing information about the structure of the progenitor star and its explosion mechanism. In particular, an estimate of the progenitor mass is made based on relative intensities of the emission lines and we analyze possible asymmetries from their Doppler shifts. In addition, we compare the spectrum with two other supernovae spectra, of the same type and observed at similar phases.

*Keywords* / supernovae: general — supernovae: individual (2016gkg)

## 1. Introducción

El presente trabajo se enmarca en el estudio de las supernovas y de sus respectivos progenitores. Un tema sin resolver en este área es cuáles son los progenitores de cada tipo de supernova y cómo es su mecanismo de explosión. En este estudio se aborda este tema a partir de observaciones de la supernova 2016gkg obtenidas con el telescopio Gemini Sur, en la etapa en la que la misma se encontraba en lo que se conoce como fase nebular (ver Sección 3.).

La SN 2016gkg, de tipo IIb, fue descubierta por el astrónomo aficionado Víctor Buso el 20 de septiembre de 2016 mediante observaciones hechas en Rosario, Argentina. Se encuentra en la galaxia espiral NGC 613, a 26.4 Mpc de distancia (Nasonova et al., 2011). Esta supernova se destacó por su temprana detección, lo que permitió tener una cobertura sin precedentes de la curva de luz durante las primeras horas después de la explosión. Estos datos llevaron a la contrastación con modelos de evolución estelar y simulaciones hidrodinámicas de la explosión. Mediante estas comparaciones, se estimó que el progenitor era una estrella nacida con  $19.5 M_{\odot}$  en un sistema binario con una compañera de  $13.5 M_{\odot}$  (Bersten et al., 2018).

En este trabajo nos centramos en el estudio del espectro nebular de la SN 2016gkg, obtenido 340 días después de la explosión. Durante la fase nebular, el material de la supernova se encuentra fuertemente diluido debido a la expansión, por lo que la radiación que se recibe pro-

viene de regiones cercanas al antiguo núcleo estelar. Es por ello que las intensidades, los anchos y los corrimientos Doppler de las líneas de emisión proveen información sobre las propiedades internas de la estrella progenitora en el momento de la explosión.

En base a la comparación con modelos sintéticos de espectros nebulares disponibles en la literatura, se puede obtener una estimación de la masa del núcleo estelar en el momento de la explosión, a partir de las intensidades de las líneas del oxígeno. El objetivo del presente trabajo es obtener una estimación de la masa del progenitor de forma independiente al modelado hidrodinámico. Por otro lado, se realiza un breve análisis de la simetría de la explosión a partir de corrimientos Doppler de las líneas de emisión.

## 2. Observaciones y reducción

Las observaciones con las que se realizó el estudio fueron tomadas en el marco del programa GS-2017B-Q-65, entre los días 20 y 26 de agosto de 2017 con el instrumento GMOS del telescopio Gemini Sur. Se empleó un tiempo total de integración de 5.33 horas, distribuidas en 16 exposiciones de 1200 s cada una, una ranura de  $1''$  de ancho y un poder resolvente de 1900. La mitad de las imágenes fueron tomadas con una longitud de onda central de 685 nm y el resto con 695 nm, con el objetivo de sortear el problema que representa la separación entre los CCDs.

Para realizar la reducción se utilizaron imágenes de calibración de fechas lo más cercanas posibles a las observaciones, con las que se realizaron las correcciones por BIAS y FLAT-FIELD. La calibración en longitud de onda se realizó con arcos tomados con la misma configuración que las imágenes, y luego se calibró el espectro en flujo mediante observaciones de la estrella estándar CD-34 241. Las imágenes fueron combinadas para obtener un único espectro. El procesamiento se llevó a cabo empleando el paquete GEMINI dentro del software IRAF.

### 3. Espectro nebular de la SN 2016gkg

El espectro de la SN 2016gkg (ver Fig. 1) está dominado por líneas anchas de emisión sobre un continuo débil. Se destacan líneas importantes de oxígeno, hidrógeno, calcio, magnesio y sodio. Como se indica en la Figura 1, algunas de las líneas que se observan corresponden a transiciones prohibidas, lo que motiva el nombre de “fase nebular”.

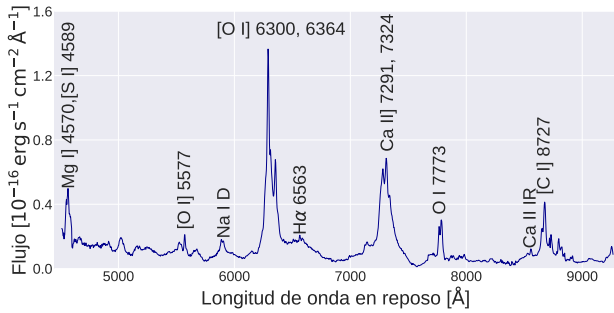


Figura 1: Espectro 1D resultante de la combinación de las 16 exposiciones. En las abscisas se muestra la longitud de onda en reposo, considerando el corrimiento al rojo de la galaxia madre  $z = 0.0049$ . Se indican los elementos que son responsables de las principales emisiones. Debido al corrimiento al rojo, la línea [OI] 5577 está libre de contaminación del cielo, y la línea del cielo se puede restar limpiamente.

#### 3.1. Comparación con SN 2011dh y SN 1993J

Las SNs 2011dh y 1993J son de tipo IIb, por lo que resulta interesante comparar sus espectros con el obtenido para la SN 2016gkg (ver Fig. 2). En la Fig. 2 comparamos nuestro espectro con los de la SN 1993J a 384 días y la SN 2011dh a 336 días, obtenidos de la base de datos WISeREP (Yaron & Gal-Yam, 2012).

En la Fig. 2 se puede apreciar que las líneas más importantes coinciden, lo que es esperable dado que las tres SNs son del mismo tipo. Las principales diferencias se aprecian en los perfiles de la línea  $H\alpha$ , más débil en la SN 2016gkg, y de las líneas de [OI]. Además, en la SN 2016gkg se destaca una emisión que identificamos como OI 7773, la cual no está presente en las otras dos supernovas.

##### 3.1.1. Perfil del doblete de [OI] 6300, 6364

Mientras que para las SN 1993J y SN 2011dh dominan componentes anchas centradas en la longitud de onda de

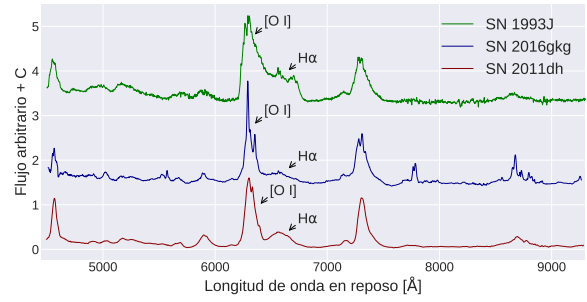


Figura 2: Espectro de la SN 2016gkg junto con los espectros de la SN 2011dh y la SN 1993J, ambas de tipo IIb, aproximadamente un año después de la explosión. Los tres espectros están corregidos por el corrimiento al rojo de las galaxias respectivas y han sido multiplicados por un factor de escala y desplazados verticalmente para facilitar su comparación.

reposo, SN 2016gkg está dominada por una componente angosta montada sobre la componente ancha y corrida en  $\approx 400 \text{ km s}^{-1}$  al azul (ver Fig. 3). Esto es indicativo de asimetrías en el mecanismo de explosión en la parte central de la estrella, lo que produce concentraciones de material rico en oxígeno en componentes de distinta velocidad.

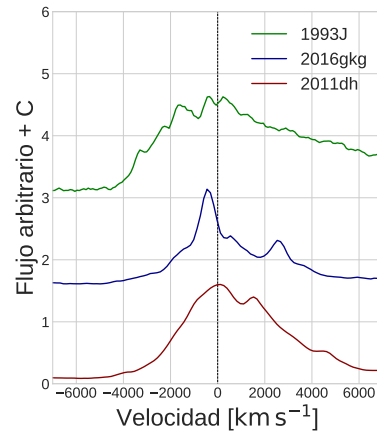


Figura 3: Perfil del doblete de [OI] 6300, 6364 de las tres SNs en el espacio de velocidades en base a su corrimiento Doppler respecto a 6300 Å. Los flujos han sido multiplicados por un factor de escala y desplazados verticalmente para facilitar su comparación.

##### 3.1.2. Perfil de la línea $H\alpha$

La SN 2016gkg muestra una línea de  $H\alpha$  más débil que en los espectros de las SN 1993J y SN 20011dh (ver Fig. 4), lo que puede indicar una menor cantidad de hidrógeno en la estrella progenitora. Se destaca el perfil cuadrado en SN 1993J, lo que se ha asociado a una interacción fuerte con material circundante a la estrella (Filippenko, 1996). Esto no se observa en la SN 2016gkg ni en la SN 2011dh, y tiene implicancias en los procesos de pérdida de masa en épocas previas a la explosión (Benvenuto et al., 2013).

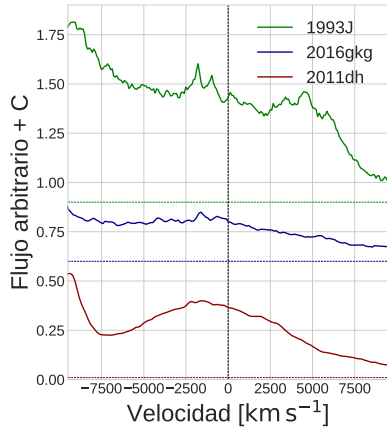


Figura 4: Perfiles de la línea H $\alpha$  de las tres SNs en el espacio de velocidades en base a su corrimiento Doppler respecto a 6563 Å. Los flujos han sido multiplicados por un factor de escala y desplazados para facilitar su comparación. Las líneas punteadas horizontales marcan los niveles de flujo cero de cada espectro.

#### 4. Masa del progenitor

En base a modelos de espectros nebulares es posible estimar la masa de un determinado elemento responsable de alguna línea de emisión. En particular, se puede estimar la masa de oxígeno neutro a partir de la emisión del doblete [OI] 6300,6364. Uomoto & Kirshner (1986) provee la siguiente fórmula para la masa mínima de OI\*:

$$M_{OI} = 10^8 f_{6300,6364} D^2 \exp\left(\frac{2.28}{T_4}\right) M_{\odot}, \quad (1)$$

donde  $f_{6300,6364}$  es el flujo en  $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$  del doblete [OI]6300,6364,  $D$  es la distancia en Mpc y  $T_4$  es la temperatura en  $10^4$  K.

Para obtener una estimación de la temperatura  $T_4$  se siguió el procedimiento detallado por Jerkstrand et al. (2014), que utiliza modelos de síntesis espectral presentados en Jerkstrand et al. (2012). Se propone:

$$\frac{f_{5577}}{f_{6300,6364}} = 38 \exp\left(\frac{-25790\text{K}}{T}\right) \frac{\beta_{5577}}{\beta_{6300,6364}}, \quad (2)$$

donde  $f_{5577}$  es el flujo medido de la línea [OI]5577 (ver Fig. 1). Los factores  $\beta$  son la probabilidad de escape de los fotones en la aproximación de Sobolev y son función de la profundidad óptica para la longitud de onda considerada. En base a modelos del mismo trabajo adoptamos  $\frac{\beta_{5577}}{\beta_{6300,6364}} = 1.5$ . Las mediciones de flujo se llevaron a cabo con la herramienta DEBLEND de IRAF, con la que se ajustaron perfiles gaussianos (ver Tabla 1).

De esta manera, obtuvimos una temperatura de  $3500 \pm 200\text{K}$ . La incerteza proviene de propagar los errores en el flujo (ver Tabla 1).

Adoptamos como distancia a la galaxia madre, NGC 613, el valor de  $26.4 \pm 5.3$  Mpc, según la determinación más reciente de que se dispone en la literatura (Nasonova et al., 2011).

\*Es una masa mínima porque parte del oxígeno puede no estar emitiendo por no estar excitado. Se desprecia la presencia de oxígeno ionizado a las temperaturas típicas del material.

Tabla 1: Valores medidos del flujo total de las líneas de oxígeno empleadas en los cálculos, considerando las contribuciones de las componentes anchas y angostas. La tercera columna da el error estadístico en base a la dispersión de diez mediciones del flujo.

Línea	Flujo [ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ]	Error
[OI]6300,6364	$8.77 \times 10^{-15}$	$8.91 \times 10^{-16}$
[OI]5577	$2.92 \times 10^{-16}$	$8.33 \times 10^{-17}$

A partir de estas mediciones, la masa mínima de oxígeno se logró estimar en  $1.6 \pm 0.3 M_{\odot}$ . La incerteza en el valor se estimó mediante la propagación del error en la distancia, el error estadístico del flujo, y la incerteza en los parámetros de los modelos, suponiendo que no hay correlación entre ellos.

Se estimó la masa inicial del progenitor utilizando las determinaciones de producción de oxígeno provistas por Nomoto et al. (1997) y Rauscher et al. (2002), obteniéndose respectivamente masas mínimas en la Secuencia Principal de  $19 - 23 M_{\odot}$  y  $17 - 19 M_{\odot}$ . Estos valores son compatibles con el modelo de evolución binaria propuesto por Bersten et al. (2018), que sugiere un progenitor de  $19.5 M_{\odot}$ .

#### 5. Conclusiones

Se obtuvo un espectro nebular de alta calidad de la SN 2016gkg, con el instrumento GMOS-S del telescopio Gemini. Se realizó la reducción y calibración de los datos y se comparó con espectros en etapas similares de otras SNs del mismo tipo. Por último, en base a la comparación con modelos de síntesis espectral de Jerkstrand et al. (2014) se estimó una masa mínima de oxígeno, a partir de la cual se obtuvo una masa mínima de secuencia principal del progenitor, estimada entre  $17$  y  $23 M_{\odot}$ .

*Agradecimientos:* Agradecemos al Dr. Leandro Sesto y al Dr. Carlos Escudero, de la Oficina Gemini Argentina, por la excelente predisposición a brindar su ayuda durante la reducción de los datos. Agradecemos también al referí por los valiosos aportes al presente trabajo. Por último, agradecemos también a la base de datos WISEREP - <https://wiserep.weizmann.ac.il>, de la que fueron descargados los datos de las SN 1993J y SN 2011dh.

#### Referencias

- Benvenuto O.G., Bersten M.C., Nomoto K., 2013, ApJ, 762, 74  
 Bersten M.C., et al., 2018, Nature, 554, 497  
 Filippenko A., 1996, Interaction of Supernovae with Circumstellar Material, HST Proposal  
 Jerkstrand A., et al., 2012, A&A, 546, A28  
 Jerkstrand A., et al., 2014, MNRAS, 439, 3694  
 Nasonova O.G., de Freitas Pacheco J.A., Karachentsev I.D., 2011, A&A, 532, A104  
 Nomoto K., et al., 1997, NuPhA, 616, 79  
 Rauscher T., et al., 2002, ApJ, 576, 323  
 Uomoto A., Kirshner R.P., 1986, ApJ, 308, 685  
 Yaron O., Gal-Yam A., 2012, PASP, 124, 668