

Una nueva perspectiva de la nebulosa del Espirógrafo Observaciones MUSE de IC 418

R.A. Pignata^{1,2}, D. Mast^{1,2} & W. Weidmann^{1,2}

¹ Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Contacto / rafaelpignata@unc.edu.ar

Resumen / Las nebulosas planetarias son reliquias esenciales de la evolución estelar y gracias a la espectroscopía de campo integral, técnica que combina las ventajas de la imagen con la espectroscopía, es posible estudiar estos objetos desde un nuevo punto de vista. Aprovechando estas capacidades del espectrógrafo de campo integral MUSE estudiamos la nebulosa planetaria IC 418 con el objetivo de mostrar, con un detalle nunca antes alcanzado, la distribución espacial de los principales parámetros físicos de la nebulosa. Nuestros mapas sugieren una posible evolución hacia una morfología bipolar. Hemos determinado los valores medios de extinción, temperatura y densidad, encontrando valores que concuerdan con estudios anteriores. Se observó una estructura de excitación radial con tres regiones separadas en la burbuja interior y los diagramas de diagnóstico permitieron identificar las diferentes regiones de ionización en la nebulosa

Abstract / Planetary nebulae are essential relics of stellar evolution and thanks to integral field spectroscopy, a technique that combines the advantages of imaging with spectroscopy, it is possible to study these objects from a new point of view. Taking advantage of these capabilities of the MUSE integral field spectrograph we studied the planetary nebula IC 418 with the aim of showing, with a detail never reached before, the spatial distribution of the main physical parameters of the nebula. Our maps suggest a possible evolution towards a bipolar morphology. We have determined the mean values of extinction, temperature and density, finding values in agreement with previous studies. We observed a radial excitation structure with three separate regions in the inner bubble and diagnostic diagrams allowed us to identify the different ionization regions in the nebula.

Keywords / planetary nebulae: individual (IC 418) — HII regions — techniques: spectroscopic

1. Introducción

Las estrellas con masa entre 1 y 8 M_{\odot} terminan su vida con una fase de fuerte pérdida de masa, dejando su núcleo expuesto (Frew & Parker, 2010). Las capas expulsadas comprimidas e ionizadas por el núcleo estelar expuesto se convierten en una nebulosa planetaria (Kwitter et al., 2014). Se desconoce el número de nebulosas planetarias (NP) en la Vía Láctea, las predicciones oscilan entre 6600 (De Marco & Moe, 2005) y 28000 NP (Frew & Parker, 2006). Actualmente sólo están catalogados unos 3000 objetos (Sabin et al., 2014). Estos laboratorios astrofísicos, presentes tanto en nuestra galaxia como en otras hacen posible estudiar desde el resultado de la evolución de un sistema binario hasta la dinámica galáctica (e.g. Akras & Gonçalves, 2016; Dopita et al., 2017).

Con la aplicación de la espectroscopía de campo integral (IFS por sus siglas en inglés), el estudio de los objetos extendidos, como las NP, recibió gran impulso. Esta técnica permite obtener, de forma homogénea, la distribución espacial de parámetros físicos como la temperatura, la densidad, la clase de excitación, etc.

Este trabajo es la tercera y última parte de nuestro análisis de IC 418 (Pignata et al., 2020, 2021) en el cual se muestran los valores finales medidos del coeficiente de extinción, temperatura y densidad, encontran-

do valores consistentes con estudios anteriores. Además se observó una estructura de excitación radial con tres regiones separadas en la burbuja interior. Por otra parte, los diagramas de diagnóstico permitieron identificar las diferentes regiones de ionización en la nebulosa.

2. Líneas de emisión

La información espectroscópica de las líneas de emisión en cada uno de los 96398 espectros se extrajo mediante un ajuste gaussiano realizado con el código IFSCUBE. Se ajustaron automáticamente las líneas más conspicuas en el rango espectral observado. Para comprobar la calidad de la calibración del flujo, el desenrojecimiento y el proceso de medición, evaluamos las relaciones de líneas de emisión $I(5007)/I(4959)$ e $I(6584)/I(6548)$ (Fig. 1 y 2), ya que estos cocientes de líneas son invariables con las propiedades físicas de la nebulosa (Acker et al., 1989). La Fig. 1 y 2 muestra la distribución de estas relaciones para todos los spaxels de la nebulosa. Esta figura muestra que la mayoría de los spaxels están dentro de los valores teóricos esperados, lo que sugiere un correcto proceso de reducción.

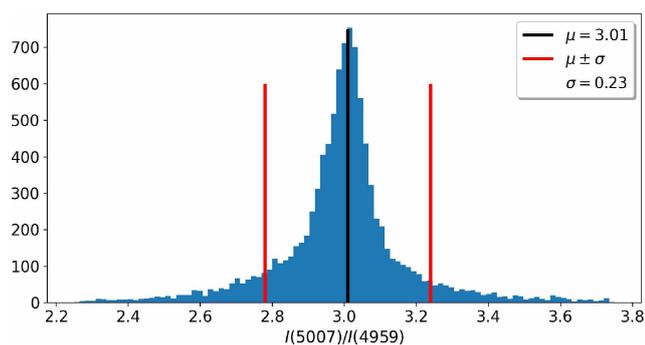


Figura 1: Distribución de los valores de los cocientes de las líneas de emisión I(5007)/I(4959). En las líneas verticales se indica el valor teórico (negro), junto con su incerteza (rojo).

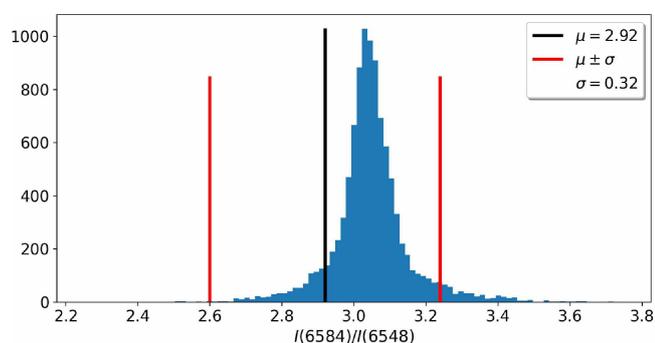


Figura 2: Distribución de los valores de los cocientes de las líneas de emisión I(6584)/I(6548). En las líneas verticales se indica el valor teórico (negro), junto con su incerteza (rojo).

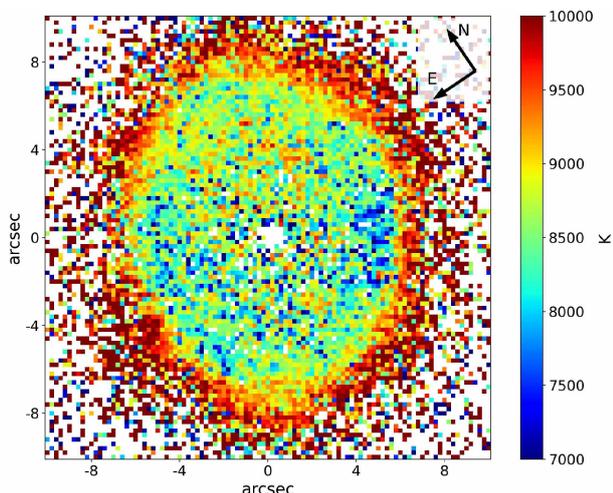


Figura 3: Distribución de la temperatura electrónica, obtenida a partir del cociente [N II] 5755/6548.

3. Propiedades derivadas

3.1. Coeficiente de extinción

La extinción fue derivada usando el paquete de python PyNeb, asumiendo una relación intrínseca de líneas de emisión Balmer de $H\alpha/H\beta = 2.85$ (Osterbrock, 1974) y

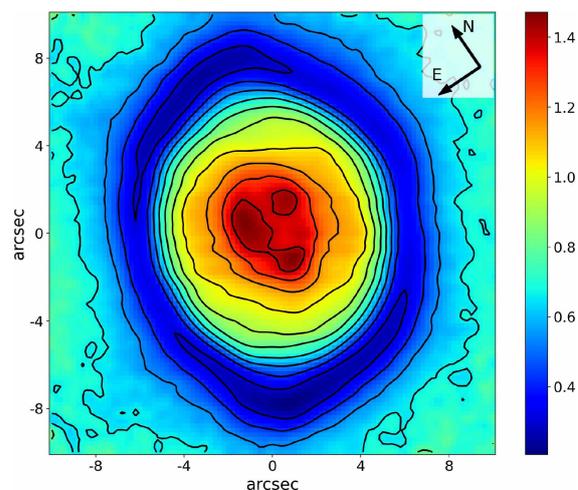


Figura 4: Mapa de clases de excitación derivado utilizando la ecuación de Reid & Parker (2010) en el régimen de baja excitación.

la función de extinción de Cardelli et al. (1989) con $R_V = 3.1$. El valor medio es $c(H\beta) = 0.23 \pm 0.09$, valores similares a los de (e.g. Dopita et al., 2017; Sterling et al., 2015; Hyung et al., 1994). Cabe destacar que no se utilizaron todos los spaxels para determinar el valor medio de $c(H\beta)$ debido a que existen regiones donde el valor de $c(H\beta)$ es negativo. Esto representa casi el 20 % de los spaxels dentro de la región nebulosa visible. Debido a que estas zonas coinciden con las regiones de saturación de $H\alpha$, no fueron consideradas para determinar $c(H\beta)$.

3.2. Temperatura y densidad

Los mapas de temperatura y densidad electrónica (T_e y N_e respectivamente) se calcularon también utilizando el paquete de PyNeb a través de las relaciones de las líneas [N II] 5755/6548 y [S II] 6731/6716. Los valores medios de temperatura y densidad obtenidos son: $T_e = (8700 \pm 650)K$ y $N_e = (21000 \pm 6000)cm^{-3}$, valores que concuerdan con los estimados en otros trabajos (e.g. Dopita et al., 2017; Delgado-Inglada et al., 2015; Sharpee et al., 2004). En el mapa de la temperatura electrónica (Fig. 3) se pueden observar regiones de menor temperatura. Aunque es importante notar que algunos pocos de estos spaxels caen en la misma región que las saturaciones $H\alpha$.

3.3. Clase de excitación

La clase de excitación (CE) de una nebulosa planetaria es una medida del nivel de excitación de su gas, y está íntimamente relacionada con la temperatura de la estrella central. Considerando que la temperatura de la estrella central es de 6700 K (Morisset & Georgiev, 2009), tenemos que IC 418 es de clase de excitación baja (Gurzadian & Egikian, 1991; Zhang, 2008). Utilizando la ecuación para la clase de excitación baja de Reid & Parker (2010), $EC = 0.45[F(5007)/F(H\beta)]$, podemos

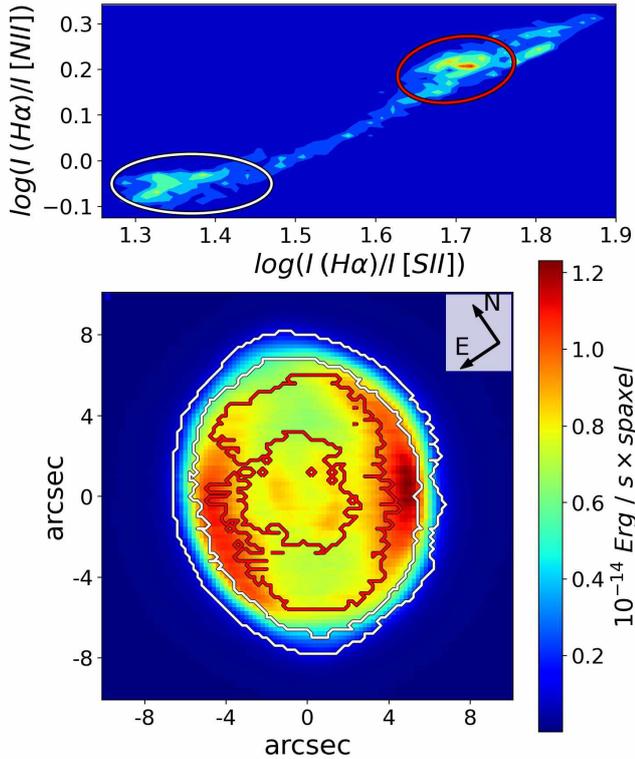


Figura 5: *Panel superior*: Histograma bidimensional del diagrama SMB modificado por Frew & Parker (2010) de IC 418 en el cual se ve como los spaxels se distribuyen principalmente en dos picos (marcados con una elipse roja y otra blanca) según el grado de fotoionización. *Panel inferior*: Mapa de flujo de $H\beta$ con los contornos que envuelven a los spaxel que se encuentran en cada uno de los picos del diagrama.

construir el mapa de EC que se muestra en la Fig. 4. Lo primero que se observa de este mapa es el gradiente negativo en dirección radial. Esto lo interpretamos como una consecuencia de la ionización estratificada. Aun así resulta llamativo la fragmentación de la burbuja interior en tres partes.

3.4. Diagramas de diagnóstico

Los diagramas de diagnóstico (DD) proporcionan una herramienta útil para diferenciar las condiciones físicas e identificar los distintos tipos de ionización en las regiones HII y, en particular, en las NP (Weidmann, 2009). Estos diagramas, junto con el IFS, se convierten en una herramienta aún más versátil, ya que nos dan la posibilidad de estudiar cada punto muestreado del objeto, y así determinar sus propiedades espacialmente resueltas. En el DD presentado (Fig. 5) y en Pignata et al. (2021) se observa claramente la ionización estratificada, además de no observarse shock, coincidente con lo mencionado por otros autores. Es importante destacar que

las distintas líneas de demarcación de los DD convencionales fueron realizadas utilizando espectroscopía de ranura larga, por lo que el análisis de los valores de los cocientes spaxel a spaxel debe realizarse con extremo cuidado (Akras et al., 2022). Como parte de trabajo a futuro se busca, a partir de datos MUSE de nebulosas planetarias, analizar la correlación entre las diferentes regiones de los DD y las estructuras observadas en los mapas bidimensionales.

4. Conclusiones

Los datos presentados en los trabajos muestran, con un detalle nunca visto hasta ahora, a la conocida NP IC 418. La espectroscopía de campo integral nos proporciona una gran colección de datos que nos permite hacer un estudio detallado de una nebulosa. Por un lado, nos lleva a replantearnos cómo caracterizar, por ejemplo, la temperatura electrónica de la nebulosa. Por otro, cómo interpretar los resultados obtenidos de la aplicación de ciertas herramientas que se utilizaban habitualmente para objetos “entero”, es decir, no resueltos (por ejemplo, el DD).

Referencias

- Acker A., et al., 1989, A&AS, 80, 201
 Akras S., Gonçalves D.R., 2016, MNRAS, 455, 930
 Akras S., et al., 2022, MNRAS, 512, 2202
 Cardelli J.A., Clayton G.C., Mathis J.S., 1989, ApJ, 345, 245
 De Marco O., Moe M., 2005, R. Szczerba, G. Stasinska, S.K. Gorny (Eds.), *Planetary Nebulae as Astronomical Tools, American Institute of Physics Conference Series*, vol. 804, 169–172
 Delgado-Inglada G., et al., 2015, MNRAS, 449, 1797
 Dopita M.A., et al., 2017, MNRAS, 470, 839
 Frew D.J., Parker Q.A., 2006, M.J. Barlow, R.H. Méndez (Eds.), *Planetary Nebulae in our Galaxy and Beyond, IAU Symposium*, vol. 234, 49–54
 Frew D.J., Parker Q.A., 2010, PASA, 27, 129
 Gurzadian G.A., Egikian A.G., 1991, Ap&SS, 181, 73
 Hyung S., Aller L.H., Feibelman W.A., 1994, PASP, 106, 745
 Kwitter K.B., et al., 2014, RMxAA, 50, 203
 Morisset C., Georgiev L., 2009, A&A, 507, 1517
 Osterbrock D.E., 1974, *Astrophysics of gaseous nebulae*
 Pignata R.A., Mast D., Weidmann W., 2020, BAAA, 61B, 133
 Pignata R.A., Weidmann W., Mast D., 2021, BAAA, 62, 128
 Reid W.A., Parker Q.A., 2010, PASA, 27, 187
 Sabin L., et al., 2014, MNRAS, 443, 3388
 Sharpee B., Baldwin J.A., Williams R., 2004, ApJ, 615, 323
 Sterling N.C., Porter R.L., Dinerstein H.L., 2015, ApJS, 218, 25
 Weidmann W.A., 2009, *Características Físicas Comparativas de Nebulosas Planetarias con Estrellas Centrales Ricas y Pobres en Hidrógeno*, Ph.D. thesis, Universidad Nacional de Córdoba
 Zhang Y., 2008, A&A, 486, 221