

Análisis cinemático con GMOS IFU en galaxias de formación estelar violenta: SDSSJ0839

G. Bosch¹, G. Hägele¹, R. Amorín², V. Firpo³, M. Cardaci¹

¹ *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

² *Institute of Astronomy, Reino Unido*

³ *Universidad de La Serena, Chile*

Contacto / guille@observatorio.unlp.edu.ar

Resumen / Este trabajo describe un nuevo método para analizar observaciones con espectrógrafo de campo integrado (IFU) de espectros con líneas de emisión originadas en regiones de formación estelar, considerando la presencia de componentes múltiples en los perfiles de líneas de diferentes iones. Las observaciones del objeto en cuestión fueron realizadas con GMOS en el telescopio Gemini Norte. A este fin desarrollamos un código Python que analiza cada espectro del cubo de datos final. Nuestro código utiliza un proceso iterativo que comienza con el ajuste de un perfil gaussiano simple a cada perfil de emisión a partir de una estimación de la velocidad sistémica de la galaxia. Esta primer solución fue utilizada como aproximación inicial para la segunda etapa, en la cual se agrega una segunda componente y el proceso de ajuste se repite. La nueva salida es analizada para verificar que haya una verdadera mejora sobre el modelo anterior, usando el criterio de información de Akaike (AIC). El proceso se repite hasta que no haya mejora estadística al agregar una componente adicional. Para nuestros datos de SDSSJ0839 el mayor número de componentes estadísticamente significativas resultó ser igual a tres para la mayor parte de los spáxeles sobre los perfiles de la línea de $H\alpha$. La posibilidad de realizar ajustes de múltiples componentes sobre los perfiles de las líneas de emisión en todo el cubo de datos permite realizar un análisis detallado de la cinemática del gas ionizado, ya que su comportamiento difiere notoriamente del que puede inferirse del ajuste de gaussianas simples. Hemos podido medir también flujos para las líneas de [N II] y [S II] entre otras líneas prohibidas. Con ellas derivamos cocientes de líneas relacionados con densidades y temperaturas, si bien la restricción en cobertura espectral no nos permitió obtener mediciones directas de los parámetros físicos. En esta contribución presentamos la información que este tipo de análisis puede proveer sobre la cinemática compleja del gas ionizado en una galaxia de formación estelar violenta.

Abstract / This work describes a new method for analysing Integral Field Spectroscopic observations of emission line spectra originated in star forming regions, considering the presence of multiple components in the line profile of different ions. Observations were carried out in queue mode using the GMOS attached to the Gemini North Telescope. To achieve this we built a Python code that analyses every individual spectrum of the data cube. Our code applies an iterative process that starts with a single Gaussian fit to each emission line profile starting from a single estimated average velocity of the galaxy. The output of this first approximation is used as the source for the second stage, where a second component is cloned from the first one and the fitting procedure is repeated with this new set of initial guesses. The new output is analysed to check whether there is an actual improvement in the fit from the previous model, using the Akaike Information Criterion indicator. For our GMOS spectra on SDSSJ0839, the largest meaningful number of components was found to be three for the brightest spaxels on the $H\alpha$ line profile. The possibility of fitting multiple components to the $H\alpha$ line profiles of the data cube allows to perform a much more detailed analysis of the gas kinematics, as the behaviour differs dramatically from what can be inferred from fitting a single Gaussian profile. We were also able to measure fluxes for [N II], [S II] among other forbidden lines. With these, we could estimate line ratios linked to temperature and density, even though the wavelength coverage does not allow to obtain values for these physical parameters directly. In this contribution we present the information that this kind of analysis provides on the ionised gas complex kinematics within a starburst galaxy.

Keywords / galaxies: starburst — galaxies: kinematics and dynamics — techniques: imaging spectroscopy

1. Introducción

Las galaxias de baja masa de formación estelar violenta en el universo local resultan ser laboratorios ideales para estudiar en detalle la formación estelar junto con los procesos de realimentación y enriquecimiento químico en condiciones físicas similares a galaxias masivas detectadas a redshifts mayores. Entre dichas regiones, resultan de particular interés el subconjunto

de galaxias enanas compactas con formación estelar, ubicadas a $z \approx 0.1 - 0.3$ conocidas como *Green Peas* (GPs). Estas galaxias presentan líneas de emisión extremadamente intensas y son sistemas caracterizados por una tasa de formación estelar inusualmente alta ($SFR/M_* \approx 10^7 - 10^9 yr^{-1}$), en el rango de galaxias de brotes de formación estelar a redshifts mayores. Utilizando espectroscopía profunda de ranura simple con el telescopio William Herschel pudimos estudiar la ci-

nemática del gas ionizado en forma global de una muestra representativa de GPs. Notoriamente, todas las galaxias de la muestra presentan perfiles complejos en sus líneas de emisión que consisten en la superposición, dentro de una extensión de pocos kiloparsecs, de diferentes componentes cinemáticas incluyendo al menos una componente ancha superpuesta sobre más de una componente relativamente más angosta (ver e.g. Amorín et al., 2012). Green et al. (2010) realizaron un estudio cinemático con espectroscopía de campo integrado de una muestra que contenía una decena de galaxias con formación estelar intensa, encontrando que la mayoría de ellas evidenciaban la presencia de un disco rotante. Con el objetivo de obtener información detallada espacialmente se eligió a SDSSJ083843.63+385350.5 (SDSSJ0839 de aquí en más) como prototipo para ser observada con espectroscopía de campo integrado con la mayor resolución disponible de manera de confirmar y estudiar el origen de dichas componentes múltiples.

2. Observaciones y análisis

Las observaciones del objeto en cuestión fueron realizadas con el *Gemini Multi-Object Spectrograph* (GMOS) en el telescopio Gemini Norte. SDSSJ0839 fue observada en el modo IFU con la red R831 en el modo de ranura simple, obteniendo una resolución R alrededor de 3800 para la línea $H\alpha$ detectada en 7500 Å. El perfil instrumental fue medido a partir de las líneas de emisión de la lámpara de comparación obteniendo un ancho instrumental de $\sigma_{inst} \sim 25 \text{ km s}^{-1}$.

El ajuste de perfiles gaussianos a más de 400 espectros es un desafío interesante. La mayoría de los paquetes de análisis disponibles, como NGAUSS en IRAF dependen de la provisión de valores iniciales que requiere intensa interacción con el usuario. Esto resulta crucial puesto que el ajuste de mínimos cuadrados detecta mínimos locales, cuyo número crece junto con el número de parámetros libres de la función a ajustar. En nuestro caso, disponemos de datos de toda una galaxia, donde se esperan perfiles complejos (ver e.g. Amorín et al., 2012). La velocidad central y el flujo total de cada perfil varía a lo largo del campo observado. Nuestra estrategia se basa en una aproximación gradual e iterativa. Comenzamos con un ajuste global con una sola gaussiana a partir de un valor medio de velocidad y flujo, de manera de obtener una estimación del campo de velocidades medio y la variación del flujo a lo largo de la zona observada. Sobre esta aproximación inicial comenzaremos la búsqueda de múltiples componentes en forma iterativa.

Para realizar dichos ajustes estamos desarrollando un código Python que analiza cada espectro del cubo de datos provisto por las tareas de reducción de Gemini/IRAF. Dentro del mismo, el ajuste se basa en las rutinas de *Non-linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting* (LMFIT) (Newville et al., 2014). Nuestro código realiza entonces ajustes iterativos comenzando con una curva gaussiana simple y agrega componentes sucesivamente de manera de poder estudiar la presencia perfiles complejos en el spaxel en cuestión. El método para agregar una nueva componente de manera de lograr una mejor convergencia fue derivado empíricamente y con-

siste en distribuir el flujo de la n -ésima componente en dos nuevas componentes con idénticas propiedades cinemáticas, pero cuyos flujos individuales distribuyen el anterior en un factor 2/3 y 1/3. Luego de hacer el ajuste respectivo, la comprobación de que la introducción de una nueva componente tenga sentido estadístico se realiza mediante el uso del Criterio de Información de Akaike (AIC, de su nombre en inglés) (Akaike, 1974) el cual permite, entre otras cosas, comparar el ajuste de distintos modelos a un mismo conjunto de datos. Si bien merece recordarse que el valor absoluto del AIC no tiene sentido estadístico el valor a considerar es la diferencia del AIC entre modelos a comparar. De acuerdo a lo mencionado en, por ejemplo, Wei et al. (2016) consideramos un $\Delta AIC > 10$ como una evidencia "muy fuerte" a favor de incrementar el número de componentes gaussianas en un perfil compuesto. Para nuestros datos GMOS en SDSSJ0838, el mayor número de componentes para la gran mayoría de spaxels con señal suficiente para tal análisis es de tres.

La línea de recombinación $H\alpha$ es la línea más intensa presente en nuestros espectros y fue, por lo tanto, la utilizada para derivar el mapa detallado de la cinemática del gas ionizado. Como las líneas de emisión del [N II], presentes en 6548 y 6583 Å se encuentran en las alas de los perfiles de las componentes anchas de $H\alpha$ debieron ser incluidas en forma simultánea con el ajuste de la misma de manera de mejorar la determinación del valor del continuo adyacente. Como estas líneas son intrínsecamente más débiles es preferible reducir el número de parámetros libres involucrados en su ajuste. Considerando que $H\alpha$ y [N II] tienen grado de ionización similar es de esperar que su cinemática sea similar, por lo que los parámetros de velocidad y de dispersión de las líneas de [N II] fueron fijados iguales a los de $H\alpha$ y solo se permitió al ajuste variar los valores de los flujos. En este caso se consideró adicionalmente el cociente conocido entre las intensidades de las líneas del [N II] ($I(6584) \approx 2.9 \cdot I(6548)$, Osterbrock, 1989)). El número total de parámetros ajustados a este conjunto de líneas varió desde seis (3 parámetros de la gaussiana de $H\alpha$, dos parámetros para el continuo y uno para el flujo de las líneas de [N II]) al ajustar una gaussiana simple hasta dieciocho (12 para $H\alpha$, 2 para el continuo y 4 para [N II]) cuando se ajustaron cuatro componentes gaussianas por línea.

Las rutinas de LMFIT permiten asignar límites superiores para los parámetros a ser ajustados, los que utilizamos para poner un límite inferior a la dispersión medida en los perfiles, relacionado con el ancho mínimo instrumental de los perfiles de líneas en nuestro espectro. Esto permite evitar combinaciones de parámetros que si bien mejoran la solución numérica, no se corresponden con lo esperado. El inconveniente asociado se presenta porque cada ajuste en el cual uno de sus parámetros alcanza el límite impuesto carece de una determinación fehaciente de los errores asociados al mismo. En este reducido número de casos, los spaxels son identificados en una máscara para ser considerados como tales durante el análisis posterior. Una vez que la solución cinemática del gas ionizado fue encontrada, se utilizó como solución inicial para el ajuste de otras líneas más débiles presentes en el espectro. Como en el caso de las líneas de [NII],

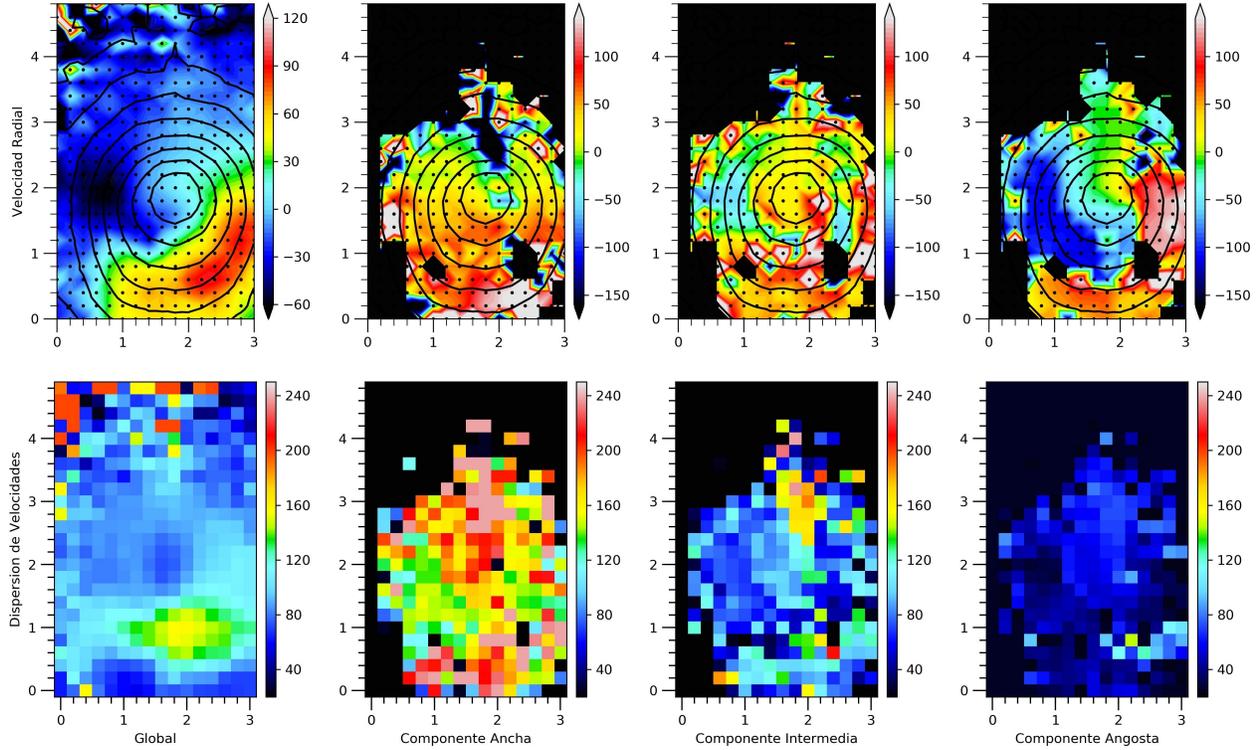


Figura 1: Cinemática del gas ionizado a partir de $H\alpha$. De izquierda a derecha, la figura incluye resultados para una gaussiana simple y para las tres componentes de un ajuste de gaussianas múltiples, en orden decreciente de dispersión. La fila superior muestra la velocidad radial, relativa al promedio de la galaxia. La fila inferior muestra los valores correspondientes a la dispersión de velocidades derivada del ancho de la gaussiana respectiva.

solo fueron ajustadas las amplitudes, permaneciendo el centro y ancho de los perfiles fijos durante el ajuste por mínimos cuadrados.

3. Resultados: Cinemática

La posibilidad de realizar un ajuste de componentes múltiples en la línea de emisión de $H\alpha$ permite realizar un análisis mucho más detallado de la cinemática del gas, puesto que el comportamiento difiere dramáticamente de lo que podría inferirse del ajuste de una componente gaussiana simple.

Esto puede verse directamente en la Fig. 1, donde la fila superior incluye los distintos mapas de velocidad derivados a partir de una componente gaussiana simple (panel izquierdo) y lo que puede descubrirse de un análisis más comprensivo y detallado combinando tres componentes gaussianas distintas (segundo a cuarto panel). La segunda fila muestra la dispersión de velocidades para cada panel de la fila superior, dejando en evidencia que los paneles del ajuste de tres componentes están en orden decreciente de dispersión. La inspección del panel izquierdo superior (ajuste de gaussiana simple) sugiere una evidencia a favor de rotación en la galaxia, que sería difícil de reconciliar con el hecho de que la dispersión de velocidades no tenga su valor máximo en el centro (panel inferior izquierdo). Luego de descomponer los perfiles en componentes múltiples es posible visualizar un escenario alternativo completamente distinto.

La componente ancha tiene un comportamiento complejo: sobre una distribución de velocidades aparentemente uniforme, los spaxels que muestran la mayor dispersión de velocidad también exhiben los mayores apartamientos (tanto hacia el azul como el rojo) en velocidad radial. Estos apartamientos extremos, en lados opuestos al centro de la galaxia sugieren la presencia de un *outflow* con alta dispersión de velocidades aproximadamente en la dirección del eje y . Por el otro lado, el gas con baja dispersión de velocidades muestra también un comportamiento extremo en apartamiento de velocidades radiales, pero con mayores amplitudes y a lo largo del eje x . Extender el análisis de una cinemática compleja, pasando del ajuste de una gaussiana simple a varias componentes superpuestas puede, como se muestra en este caso, mejorar sensiblemente la caracterización y comprensión de las distintas fases del gas responsables del perfil observado.

Referencias

- Akaike H., 1974, IEEE Transactions on Automatic Control, 19, 716
- Amorín R., et al., 2012, ApJL, 754, L22
- Green A. W., et al., 2010, Nature, 467, 684
- Newville M., et al., 2014, LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python¶
- Osterbrock D. E., 1989, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei
- Wei J.-J., Wu X.-F., Melia F., 2016, MNRAS, 463, 1144