

---

## Estudio del ancho de las líneas de emisión del gas ionizado en regiones de formación estelar de M33

### Study of the width of the emission lines of the ionized gas in the star formation regions of the M33

Javier García Vázquez, Hector O. Castañeda \*

*Departamento de Física, Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México*

Recibido: 02/03/2016; revisado: 18/05/2016; aceptado: 09/07/2016

---

**Javier García Vázquez, Hector O. Castañeda:** Estudio del ancho de las líneas de emisión del gas ionizado en regiones de formación estelar de M33 *Jou.Cie.Ing.* **8** (1): 47-51, 2016. ISSN 2145-2628.

#### Resumen

Analizamos la cinemática del gas ionizado y la posible existencia de turbulencia hidrodinámica en dos regiones gigantes de la galaxia M33. Para ello producimos diagramas de diagnóstico de Dispersión de Velocidades vs. Intensidad de la línea de emisión. Analizamos la variación espacial de la dispersión de velocidades a partir del ancho de línea, y comparamos los resultados con modelos teóricos.

**Palabras Clave:** Regiones HII, turbulencia.

#### Abstract

In this work we present a study of the kinematics of the ionized gas and the possible existence of hydrodynamical turbulence in two giant HII regions of the galaxy M33. We produce diagnostic diagrams of velocity dispersion vs. intensity of the emission line. We analyze the variation of the velocity dispersion from the width of the emission line, and compare the results with models.

**Keywords:** HII regions, turbulence.

---

### 1. Introducción

Las líneas de emisión integradas en regiones HII extragalácticas presentan velocidades de dispersión (velocidades de turbulencia) para el gas nebuloso del orden de 25 km/s, valor que excede significativamente la velocidad del sonido (10 km s<sup>-1</sup>) [1]. Las líneas espectrales son más anchas que su componente térmica, implicando un estado de movimiento desordenado a lo largo de la línea de visión, que podría ser interpretado como turbulencia hidrodinámica [2]. Dada la naturaleza disipativa

del fenómeno de turbulencia, estas observaciones indican una fuente continua de energía mecánica al medio ionizado [3].

En este trabajo estudiamos la existencia de turbulencia a partir del análisis del perfil de las líneas de emisión en dos regiones gigantes de M33.

### 2. Observaciones

Las observaciones se realizaron utilizando la técnica de espectroscopía de rendija larga con exposiciones

---

\* castaneda@esfm.ipn.mx

para diferentes posiciones espaciales sobre un objeto astronómico. Para nuestro estudio se escogieron de datos de archivo con observaciones de las regiones gigantes NGC 604 y NGC 595, en la galaxia espiral M33. Información detallada sobre el análisis y la reducción de los datos espectroscópicos se encuentran disponibles en [4,5].

### 3. Flujos turbulentos

Los flujos turbulentos son irregulares, aleatorios y caóticos. A pequeña escala la energía interna es disipada por la viscosidad de fluido. El fenómeno también se caracteriza por la fluctuación rápida de las variables (como velocidad, temperatura, etc) con el tiempo, generalmente en torno a una media que puede ser independiente del tiempo en el caso de flujo medio estacionario.

Una de las características representativas de un flujo turbulento es el valor alto en el número de Reynolds. Este número es del orden de  $10^6$  para el caso de nebulosas gaseosas. Por consiguiente, el flujo de masa asociado a estos objetos astronómicos presentan propiedades de aleatoriedad y caos, que son descritas como un estado turbulento.

El modelo estándar propuesto por Kolmogorov [6,7] describe una turbulencia isotrópica, homogénea y completamente desarrollada, en un régimen donde el espectro de energía de la turbulencia y la distribución de probabilidad de las velocidades relativas del fluido están determinadas únicamente por la tasa de transferencia de energía en el medio  $\epsilon$  y por la viscosidad cinemática  $\nu$ . Si el número de Reynolds es suficientemente grande, el espectro sólo es dependiente de  $\epsilon$ . La ley de Kolmogorov indica que la diferencia cuadrática media de la diferencia en velocidad entre dos puntos separados por una distancia  $R$  debería ser proporcional a  $R^{2/3}$ . Este comportamiento del fluido sólo ocurre en un rango espacial limitado, conocido como el “rango sub-inercial”.

Como hemos indicado anteriormente, una nebulosa gaseosa en un estado de turbulencia requiere el ingreso continuo de energía que reemplace la energía disipada por el fluido. La primera fuente de energía es la radiación proveniente de las estrellas ionizantes. Si las estrellas ionizantes están cerca de una densa nube molecular, el sistema puede entrar en una fase de “champagn”, donde el movimiento supersónico se propaga a grandes distancias. Otra fuente de energía mecánica son los vientos estelares. Las estrellas O y B arrojan cada una de ellas masa a una razón de  $10^{-(5-6)}M_{\odot}$  por año, a velocidades que exceden los 1000 km/s. Considerando que las regiones HII están ionizadas por numerosas

estrellas de este tipo ( $10^2 - 10^3$ ), los vientos estelares que ellas generan afectan la cinemática del gas nebuloso y la energía cinética asociada a los vientos podría generar una considerable turbulencia. De manera análoga, otra fuente de turbulencia podrían ser las explosiones de supernovas, cuyas tasas típicas en las regiones HII son del orden de  $10^{-3}$  años $^{-1}$ , por lo tanto las SN no proporcionan una fuente de energía estrictamente continua que permita alimentar la turbulencia supersónica. Finalmente, podemos considerar el efecto de la gravedad. Las regiones HII gigantes son complejos masivos de gas, estrellas y aunque las masas totales no han sido medidas directamente, es posible obtener un estimado si se asume la función de masa típica para cúmulos ionizantes y se agrega la componente del gas neutro y del gas ionizado, lo que ha permitido estimar masas de regiones HII superiores a  $10^6 M_{\odot}$  [8-10].

### 4. Análisis de la turbulencia

En nuestro trabajo presentamos una caracterización de la turbulencia en las regiones de NGC 604 y NGC 595, empleando el enfoque de ancho de las líneas de emisión observados en el espectro.

El ancho de las líneas de emisión medido en las observaciones presenta un exceso respecto al ancho natural que es debido al movimiento térmico del gas y el ancho instrumental. Para determinar este ancho natural, el cual se expresa en unidades de velocidad, es necesario realizar una deconvolución del perfil observado en la línea de emisión, lo que permite separar la componente no-térmica de aquellas que se deben a la contribución instrumental y térmica. Las fuentes de error radican por una parte a la incertidumbre asociada al ancho térmico cuando el valor de la temperatura electrónica no se conoce con exactitud y por otro lado por la posibilidad de que el ancho observado no se deba únicamente a la turbulencia sino a otros procesos como por ejemplo el colapso del gas o un gradiente en gran escala en las velocidades macroscópicas del gas ionizado.

Para determinar la velocidad de dispersión, es necesario calcular tres cantidades: el ancho instrumental, el ancho observado y el ancho térmico. Para determinar el ancho instrumental asociado a cada línea de emisión se utilizaron las líneas de emisión observadas en el espectro de calibración asociado a cada brazo del espectrógrafo (rojo y azul) y para cada objeto observado. Por consiguiente, el ancho instrumental a media altura asociado a cada línea de emisión es el ancho a media altura promedio de las dos líneas de emisión sobre el espectro de calibración que la acotan de forma superior

e inferior. Se emplea este criterio con el fin de minimizar los errores en lugar de considerar únicamente un solo ancho instrumental para todas las líneas de emisión observadas en un brazo del espectrógrafo.

La dispersión de velocidad asociada al ancho instrumental se expresa como  $\sigma_{inst} = (0.6006 \text{ FWHM}_{inst})/1.414$ , donde  $\text{FWHM}_{inst}$  es el ancho instrumental a media altura expresado en unidades de velocidad. De forma análoga, la velocidad asociada al ancho observado en la línea de emisión se expresa como  $\sigma_{obs} = (0.6006 \text{ FWHM}_{obs})/1.414$ , con  $\text{FWHM}_{obs}$ , como el ancho observado (en unidades de velocidad). La componente térmica es sensible a la temperatura asumida en el gas y a la masa del ion emitida en las líneas de emisión. Su forma funcional es  $\sigma_{term} = (166.3 t / m 1.414)$ , donde  $t = (T_e \times 10^{-4})$ , donde  $T_e$  es la temperatura del gas, igual a la temperatura electrónica, y  $m$  que es la masa atómica del ion asociado a la línea de emisión.

Esta ecuación nos dice cuál es la mínima velocidad asociada al ancho de la línea de emisión que puede ser observada, es  $(\sigma_{inst}^2 + \sigma_{term}^2)^{0,5} = \sigma_{obs}$ . El  $\sigma_{obs-min}$  representa el mínimo valor que se puede medir en  $\sigma_{obs}$ . Cuando  $\sigma_{obs} < \sigma_{inst}$  se dice que no es posible resolver el ancho de la línea de emisión.

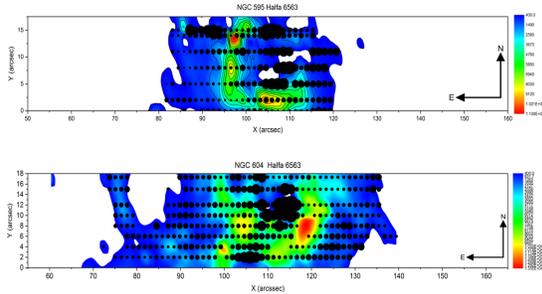


Figura 1. Mapas bidimensionales de emisión con valores de dispersión (círculos negros) normalizados al valor máximo.. Imagen Superior: NGC 595. Imagen Inferior: NGC 604. Los mapas fueron realizados en la línea de  $H\alpha$ .

La figura 1 ilustra la variación de la dispersión de velocidades sobre las dos regiones estudiadas. En NGC 604 y NGC 595 es visible un comportamiento mixto que incluye puntos con velocidades de dispersión que van desde el rango subsónico hasta el supersónico. Este comportamiento pone en evidencia la existencia de gradientes en la velocidad de dispersión para esta región HII, los cuales son claramente identificados en los mapas bidimensionales de dispersión.

Para NGC 604 es posible apreciar series de núcleos con sus respectivos halos rodeados de una zona difusa

de baja emisión. Tenemos un rango amplio de velocidad de dispersión en rangos supersónicos y subsónicos. Realizando una comparación con las imágenes del campo estelar asociado que se conocen en esas regiones [11] es posible concluir que no se tienen estrellas en las regiones de más intensidad. Se deduce entonces que la estructura compleja se debe a explosiones de supernovas que generan cascadas de gas en expansión, teniendo como consecuencia altas velocidades de dispersión. Esta conclusión es apoyada por la detección de emisión de rayos X que se encuentra en la zona estudiada, que es debida a los remanentes [12].

Para NGC 595 se tiene una estructura menos compleja, pero aun así con la característica de una disposición núcleo-halo para el gas ionizado. En esta región coinciden cúmulos estelares con las zonas de mayor intensidad. Esta característica junto con su peculiar forma en "L" apoyan la posibilidad de que este cúmulo tiene una alta velocidad y forma una estructura de arco de choque, apreciable en diferentes líneas de emisión. En los diagramas de dispersión es posible apreciar que las velocidades de dispersión están más agrupadas que NGC 604, dando la posibilidad de interpretar como que esta región es menos evolucionada en el tiempo, y está aun definida su morfología por vientos estelares.

## 5. Diagramas dispersión vs. intensidad

La información observacional nos permite estudiar la correlación entre el valor de  $\sigma_{obs}$ , que mide la dispersión de velocidades a lo largo de la línea de visión dentro de la nebulosa, y la intensidad de la línea, que es una medida de la emisividad del gas [13].

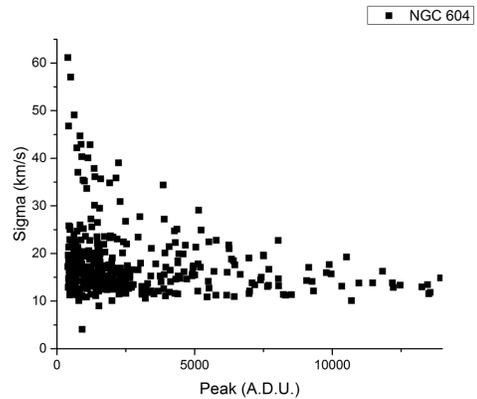


Figura 2. Dispersión de velocidad vs. Intensidad de la línea de emisión, para la región NGC 604.

Para ambas regiones en los mapas dispersión vs intensidad, es apreciable un límite mínimo en intensidad, debido al límite impuesto para ajustar una gaussiana. Se encuentra que el valor mínimo de dispersión en NGC 604 está cerca de 10 km/s, mientras que en NGC 595 se tienen velocidades más bajas y más puntos dispersados en la región inferior del diagrama.

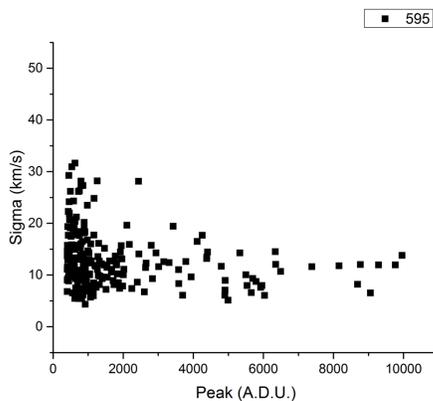


Figura 3. Dispersión de velocidad vs. Intensidad de la línea de emisión, para la región NGC 595.

Los valores altos de dispersión tienden a aparecer en zonas donde hay “loops” cascarones, o fenómenos físicos peculiares. En este caso la ausencia de estos en NGC 595 se puede interpretar como ausencia de estos fenómenos o como el hecho de que no sean lo suficiente energéticos a ciertas escalas para considerarse en la dinámica del gas.

Para NGC 604 se aprecian 3 bandas inclinadas principales, siendo este diagnóstico más complicado para NGC 595. Los valores para la dispersión de velocidades de NGC 604 llegan a ser casi del doble que NGC 595, que interpretamos es debido a la energía proporcionada por explosiones de supernova. El abultamiento a bajas intensidades y velocidades del diagrama en NGC 595 se expandirá a medida que la región evolucione en el tiempo.

## 6. Conclusiones

La espectroscopia de rendija larga es una herramienta poderosa para diagnosticar y estudiar la cinemática de regiones gaseosas. Esto lleva a un mapeo de la región de emisión y de velocidad que sirven para relacionar ambos fenómenos.

En base a los diagramas de diagnóstico, tanto dispersión como emisión, es posible ver las diferencias y similitudes entre las dos regiones estudiadas.

Es posible apreciar una morfología caótica en NGC 604 y relacionarla con los valores altos de dispersión que se observan, mientras que en NGC 595 el proceso de turbulencia no ha tenido tanto tiempo para evolucionar, siendo esto reflejado en los relativamente valores bajos de dispersión, comparados con la primera región.

Se utilizó el diagnóstico de bandas para descomponer fenómenos físicos en las regiones y entender como es la entrada de energía que determinara la evolución de la región y como estos fenómenos afectan y transportan dicha energía.

## Agradecimientos

Este trabajo fue patrocinado en parte por la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN, proyecto SIP-20151452, SIP-20100080, SIP-2009194, y con Becas para Estudios de Posgrado del CONACYT.

## Referencias

- [1] GA Shields. Extragalactic h ii regions. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 28:525–560, 1990.
- [2] Malcolm G Smith and Daniel W Weedman. Internal motions in galactic and extragalactic h ii regions. *The Astrophysical Journal*, 161:33, 1970.
- [3] Héctor O Castañeda. Supersonic turbulence in giant extragalactic hii regions. In *Kinematics and Dynamics of Diffuse Astrophysical Media*, pages 285–289. Springer, 1994.
- [4] H.E. Caicedo-Ortiz and H.O. Castañeda. A study of the ionized gas in giant hii regions in ngc 6822. In *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series*, volume 40, pages 187–187, 2011.
- [5] H.E. Caicedo-Ortiz. Estudio de regiones hii gigantes. Master’s thesis, Escuela Superior de Física y Matemáticas (ESFM), Instituto Politecnico Nacional, México, 2011.
- [6] Andrey Nikolaevich Kolmogorov. Dissipation of energy in locally isotropic turbulence. In *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, volume 32, pages 16–18. JSTOR, 1941.
- [7] Andrei N Kolmogorov. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large reynolds numbers. In *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, volume 30, pages 301–305. JSTOR, 1941.
- [8] J Melnick. Velocity dispersions in giant h ii regions-relation with their linear diameters. *The Astrophysical Journal*, 213:15–17, 1977.
- [9] Jorge Melnick, Roberto Terlevich, and Mariano Moles. Giant h ii regions as distance indicators—ii. application to h ii galaxies and the value of the hubble constant. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 235(1):297–313, 1988.
- [10] J-R Roy and R Arsenault. The h-alpha velocity widths of giant h ii regions as distance indicators. *The Astrophysical Journal*, 302:579–584, 1986.
- [11] J Maíz-Apellániz, E Pérez, and JM Mas-Hesse. Ngc 604, the scaled ob association (soba) prototype. i. spatial distribution

- of the different gas phases and attenuation by dust. *The Astronomical Journal*, 128(3):1196, 2004.
- [12] Hui Yang, You-Hua Chu, Evan D Skillman, and Roberto Terlevich. The violent interstellar medium of ngc 604. *The Astronomical Journal*, 112:146, 1996.
- [13] Casiana Munoz-Tunon, Guillermo Tenorio-Tagle, Hector O Castaneda, and Roberto Terlevich. Supersonic line broadening and the gas dynamical evolution of giant hii regions. *The Astronomical Journal*, 112:1636, 1996.