



Departamento de Astronomía de la
Universidad de Guanajuato/
Centro de Radioastronomía
y Astrofísica UNAM



DIAGNÓSTICOS NEBULARES DE REGIONES H II SIMULADAS.

TESIS QUE PRESENTA

Sac Nicté Xiomara Serrano Medina

PARA OBTENER EL GRADO DE

Maestro en Ciencias
(Astrofísica)

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Sarah Jane Arthur

CO-DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Juan Pablo Torres Papaqui

Junio 2013

Esta tesis fue evaluada por el siguiente comité de sinodales:

- Dr. William John Henney Strutt
- Dra. Adriana Gazol Patiño

CENTRO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA.
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

- Dr. Erick Nagel Vera
- Dr. Juan Pablo Torres Papaqui

DEPARTAMENTO DE ASTRONOMÍA, DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS.
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO.

© 2013

A mi Familia, amigos y maestros por todo su apoyo.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Introducción	11
1.2. Fotoionización	11
1.3. La expansión de una región H II dentro de un medio uniforme	13
1.4. La distribución de la velocidad y la densidad dentro de una región H II uniforme	18
1.5. Estratificación de ionización.	20
1.6. Flujo de “Champagne”	22
1.7. Turbulencia en la Astrofísica	27
1.8. Teoría de Kolmogorov	28
1.9. Cascada de Energía	28
1.10. Función de Autocorrelación y Función de estructura de segundo orden	29
1.11. Espectro de Energía	29
2. ANTECEDENTES Estudios Observacionales de turbulencias en regiones H II.	31
3. METODOLOGÍA	47
3.1. Ecuaciones	49
3.2. Código hidrodinámico y de transferencia radiativa.	50
3.3. Condiciones iniciales	50
3.4. Cálculos numéricos	51
3.5. Análisis estadísticos	52
3.5.1. Velocidad centroide	52
3.5.2. Función de estructura de segundo orden	52
3.5.3. Espectro de Potencias	53
3.5.4. Ajustes.	53
4. RESULTADOS	55
4.1. Caso prueba: Expansión de una región H II en un Medio Uniforme	55
4.1.1. Resultados Morfológicos	55
4.1.2. Función de estructura de segundo orden	58
4.1.3. Espectros de energía o espectros de potencia	62
4.2. Modelo No Uniforme: Expansión de una región H II en un Medio no Uniforme	68

4.2.1. Resultados Morfológicos	68
4.2.2. Función de estructura de segundo orden	73
4.2.3. Espectros de Energía	77
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	83
5.1. Comparaciones morfológicas	83
5.2. Comparación con cinemática de Kolmogorov	84
5.3. Comparación con cinemática de resultados observacionales	84
5.4. Conclusiones	85
5.5. Trabajo futuro	85
6. APÉNDICES	87
6.1. Apéndice A	87
6.2. Apéndice B	88
6.3. Apéndice C	89

RESUMEN

Las simulaciones numéricas de regiones H II que se expanden dentro de nubes moleculares turbulentas producen resultados muy parecidos a las regiones observadas en cuanto a morfología y apariencia en líneas de emisión predichas (*e.g.*, *Mellema et al. 2006b*, *Arthur et al. 2011*). Sin embargo, es importante mostrar que la cinemática también se pueden comparar con los resultados observacionales para obtener conclusiones confiables acerca de la formación y evolución de estos objetos astrofísicos y su entorno. También, simulaciones numéricas sugieren que los flujos fotoevaporativos que salen de filamentos y grumos que resultan de la expansión de una región H II en un medio turbulento interactúan en el interior de la nebulosa. Esta interacción de flujos es lo que dará origen a las dispersiones de velocidades, lo cual observacionalmente se interpreta como turbulencia dentro del gas ionizado. Los flujos turbulentos en la astrofísica se compara con la teoría clásica de turbulencias de Kolmogorov.

En esta tesis se hace un análisis de los perfiles de velocidad de las líneas de emisión simuladas, se calculan las dispersiones de velocidad dentro de la expansión de una región H II en un medio con una distribución de densidad homogénea y con una distribución de densidad no homogénea. Para el estudio de la turbulencia y el análisis de las escalas a las cuales se inyecta energía a la nebulosa, se lleva a cabo un análisis estadístico que consiste en obtener de los perfiles de la función de estructura de segundo orden y de los espectros de potencia simples y pesados de las velocidades, leyes de potencia que se puedan comparar con trabajos observacionales, donde se reportan evidencias de turbulencia en el gas ionizado de algunas regiones H II, y se intenta caracterizar esta turbulencia analizando los campos de velocidades y la teoría clásica (teoría de Kolmogorov).

En el código que se utiliza en esta tesis para simular la expansión y evolución de una región H II acopla las ecuaciones de hidrodinámica de fluidos compresibles y las ecuaciones de ionización a través de los términos de enfriamiento y calentamiento. El sistema de ecuaciones diferenciales parciales resultante se resuelve con los métodos numéricos descritos en *Mellema et al. 2006b*, *Henney et al. 2009* y *Arthur et al. 2011*. Las simulaciones se corren a tres resoluciones distintas (alta, mediana y baja) y con los

mismos parámetros estelares.

Los resultados muestran una similitud en cuanto a morfología entre las regiones H II simuladas y las observadas. La cinématica por otro lado dice, a partir de las leyes de potencia resultantes de los ajustes lineales a los perfiles de la función de estructura y los diferentes espectros de potencia del modelo con densidad no uniforme, que no es posible utilizar el análisis turbulento clásico para estudiar la turbulencia en regiones H II o bien, que se pueden considerar a las condiciones iniciales del modelo de este trabajo como un límite de aplicación de la teoría clásica. Cabe la posibilidad de que, al encontrarse aislada la región H II, contar con un espacio computacional limitado, tener un límite de resolución y no incluirse fenómenos astrofísicos que pueden ocurrir en su entorno, como chorros o proplyds, las diferencias obtenidas entre los datos simulados y las predicciones clásicas de la turbulencia de Kolmogorov sean significativas.