

AAF-431 - Materia Interestelar

Proyectos de Investigación

3er Periodo del 2024

Polvo en SN1987A

El medio interestelar (ISM) contiene una fracción significativa de polvo, equivalente a aproximadamente el 1 % de la masa total del gas. Se cree que la mayor parte de este polvo proviene de las envolturas de estrellas AGB (*Asymptotic Giant Branch*). Sin embargo, la detección de galaxias submilimétricas con alto corrimiento al rojo sugiere que cantidades considerables de polvo deben formarse en escalas de tiempo evolutivas mucho más cortas. Las supernovas son las principales candidatas para explicar esta formación rápida de polvo, pero la evidencia directa ha sido limitada debido a la interacción de sus eyecciones con el medio circundante, que dificulta distinguir entre polvo recién formado y procesos radiativos secundarios.

SN1987A, una supernova tipo II detectada en la Gran Nube de Magallanes, es una excelente candidata para estudiar este fenómeno. Indebetouw et al. (2014) publicaron observaciones de ALMA que resuelven espacialmente la emisión milimétrica-submilimétrica en dos componentes principales: una fuente puntual central y un toroide circundante. Las observaciones en otras longitudes de onda complementan esta información, proporcionando un panorama más completo del *SED* (*Spectral Energy Distribution*) de estos componentes (o su suma en caso de fotometría FIR de baja resolución).

Realice un análisis de los datos proporcionados en la Tabla 1 del artículo de Indebetouw et al. (2014), graficando los puntos con sus respectivos errores. Descomponga el *SED* en dos componentes: una ley de potencias para el toroide y un modelo de cuerpo negro modificado (cuerpo gris) para la eyección central, según la relación:

$$F_\nu \propto B_\nu(T) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^\beta \right] \right\}, \quad (1)$$

donde T es la temperatura del polvo, ν_0 es la frecuencia característica para la opacidad de los granos de polvo, y β es el índice espectral.

Determine los parámetros libres (T , ν_0 , y β) a partir de los datos observacionales. Evalúe qué tan bien se pueden limitar estos valores y discuta sus implicaciones en el contexto de la formación de polvo en supernovas.

Finalmente, estime, mediante un cálculo aproximado, la tasa de producción de polvo en supernovas dentro de una galaxia como la Vía Láctea, comparándola con las contribuciones de estrellas AGB y las tasas de destrucción por ondas de choque de supernovas. Discuta los resultados obtenidos y sus implicaciones para la evolución del polvo en el ISM.

Cúmulos de Superestrellas

Las estrellas masivas producen grandes regiones ionizadas (H II) que emiten fuertemente en longitudes de onda de radio a través del mecanismo *bremsstrahlung* (libre-libre). Esta emisión se distingue fácilmente de otros procesos radiativos por su espectro característico. Mezger y Henderson (1967) proporcionan la siguiente aproximación útil para la profundidad óptica de *bremsstrahlung*:

$$\tau(\nu) = 8.235 \times 10^{-2} \nu_{\text{GHz}}^{-2.1} T_e^{-1.35} EM, \quad (2)$$

donde $\tau(\nu)$ es la profundidad óptica, ν la frecuencia en GHz, T_e la temperatura electrónica en kelvin y EM la medida de emisión en unidades de $\text{cm}^{-6} \text{pc}$.

Utilice esta ecuación y la solución general a la ecuación de transferencia radiativa para trazar el *SED* (*Spectral Energy Distribution*) de una región H II con una temperatura electrónica $T_e = 10^4 \text{ K}$, una medida de emisión $EM = 10^6 \text{ cm}^{-6} \text{ pc}$, y ubicada a una distancia de 1 kpc. Además, incorpore el efecto de una cantidad de polvo equivalente a una masa solar, que emita radiación térmica como un cuerpo gris. Para este modelo, asuma un índice espectral del cuerpo gris $\beta = 1$ y que el polvo se encuentra a la misma temperatura que el gas ionizado.

Compare su modelo de *SED* con observaciones de Wood y Churchwell (1989). Este estudio fundamental se centró en regiones H II ultra-compactas menos evolucionadas, que eran pequeñas y densas, con medidas de emisión mucho más altas. Si la temperatura permanece constante (como es razonable asumir), ¿cómo cambia el *SED* a medida que la medida de emisión aumenta en un orden de magnitud? Explique físicamente qué está ocurriendo.

El VLA (*Very Large Array*) puede observar con alta resolución angular desde longitudes de onda de centímetros a metros. Describa cómo Wood y Churchwell (1989) utilizaron estas observaciones para determinar la densidad de las regiones H II ultra-compactas.

Posteriormente, Turner et al. (2000) descubrieron regiones H II ultra-compactas extragalácticas. Estas eran mucho más grandes, con aproximadamente 1 pc de tamaño en lugar de la típica 0.1 pc para regiones H II galácticas. Razonando a partir de la similitud de la forma del *SED* y el equilibrio de ionización-recombinación, ¿cuántas más estrellas tipo O habría en una gran *supernébula* comparada con una región H II ultra-compacta galáctica?

Si la *supernébula* tiene una IMF (*Initial Mass Function*) estelar similar a la de nuestra galaxia, extrapole el número total de estrellas. ¿Cuál sería la velocidad de escape en un radio de 1 pc? ¿Cómo se compara esto con la velocidad del sonido y con los vientos estelares? ¿Cómo afecta esta diferencia a las regiones H II galácticas y cuáles podrían ser las implicaciones? ¿Qué resultados esperaría obtener al final?

Region H II en Nebulosa de Orión

La Nebulosa de Orión es la región H II más cercana que podemos estudiar en detalle. En este proyecto medirá algunas de sus propiedades utilizando observaciones de emisión de líneas ópticas. Por favor responda a las siguientes preguntas y proporcione las citas de literatura relevantes y gráficas para ilustrar el proceso por el cual las ha respondido.

Parte I

Investigue y determine cuál o cuáles estrellas son responsables de ionizar el gas en la Nebulosa de Orión. ¿Cuáles son los tipos espectrales de la estrella o estrellas en cuestión? ¿Cuál es su tasa de producción de fotones ionizantes? Cite las fuentes de literatura que utilice.

Estime el tamaño de la esfera de Stromgren para la Nebulosa de Orión usando las tasas de fotones ionizantes que ha encontrado. Haga una gráfica del radio de Stromgren predicho para un rango de diferentes densidades de gas. Discuta lo siguiente: 1) ¿Necesita considerar múltiples fuentes de fotones ionizantes? 2) ¿Cómo afectaría la combinación espacial de múltiples fuentes ionizantes a su evaluación del radio de Stromgren predicho?

Mida el radio de la Nebulosa de Orión utilizando una imagen $H\alpha$ de la región. Hay múltiples maneras de hacer esto. Orión tampoco es esférica, lo que hace más desafiante definir un radio. Sea cual sea el método que elija, documente los pasos que ha tomado, proporcione cualquier figura relevante y de una estimación de su incertidumbre sobre el valor medido. Aparte de la definición de un radio para una región no esférica, ¿cuáles son las principales incertidumbres que afectan su medición del tamaño de Orión? (Una técnica simple para medir el tamaño es usar el programa `ds9` para cargar una imagen de Orión y crear una región circular que cubra el tamaño aproximado de la nebulosa. `ds9`¹ le dirá el radio de la región en segundos de arco, que luego puede convertir a pc usando la distancia a la Nebulosa de Orión. Le proporcionaré una imagen $H\alpha$ de la nebulosa (`OrionNebula_image.fits`).

Compare el tamaño medido con las predicciones de su estimación de la esfera de Stromgren. ¿Qué densidad necesitaría para hacer que el radio de la Nebulosa de Orión coincida con la predicción de la esfera de Stromgren? Use la incertidumbre que estime sobre el tamaño de la región para dar un

¹<https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9/home>

rango de densidades donde el tamaño de Orión sería comparable al radio de Stromgren.

Parte II

Le compartiré un espectro (`Spectrum_OrionNebula.dat`) representativo de la Nebulosa de Orión de una observación con el instrumento MUSE en el Very Large Telescope (Weilbacher et al., 2015).

Identifique una razón de dos líneas en el análisis espectral de la observación MUSE que rastree la densidad del gas. Escriba una breve explicación de por qué esta relación de líneas rastrea la densidad.

Mida la razón de las líneas en el espectro. (Nota: primero necesitará medir la intensidad integrada de las líneas relevantes. Puede hacer esto de la forma que considere adecuada. Puede medir el pico del espectro y la anchura de la línea y aproximarla por un triángulo para obtener un área integrada bajo la línea.) Cualquier técnica que utilice, proporcione una valoración de la incertidumbre en su medida de la razón de líneas (vale la pena dedicar algo de tiempo para asegurarse de que tiene una herramienta de ajuste Gaussiano - esto es algo que se utiliza mucho).

Grafique los valores teóricos de la razón de líneas que ha elegido como función de la densidad, y gráfique su medida de la razón de líneas. ¿Cuál es la densidad de electrones que deduce de la razón de líneas? Proporcione una valoración de la incertidumbre sobre la densidad de electrones.

Compare la densidad de electrones medida con lo que predijo que Orión necesitaría tener para coincidir con el radio de la esfera de Strömgren. ¿Las densidades coinciden? Describa algunas de las razones por las que Orión podría no coincidir con el radio de la esfera de Strömgren predicho.

Diagnóstico de Temperatura y Densidad Electrónica de la Nebulosa Planetaria IC 2149

Las nebulosas planetarias son regiones ionizadas del medio interestelar producidas por la eyección de material de estrellas en las últimas etapas de su evolución. Estas regiones emiten líneas espectrales características que son sensibles a las propiedades físicas del gas ionizado, como la temperatura electrónica (T_e) y la densidad electrónica (n_e). En este proyecto, se analizarán las líneas aurorales y nebulares de O III ($\lambda = 4363 \text{ \AA}$ auroral y $\lambda = 4959, 5007 \text{ \AA}$ nebulares), así como de Ne V ($\lambda = 2973 \text{ \AA}$ auroral y $\lambda = 3345.8, 3425.9 \text{ \AA}$ nebulares). Además, se utilizarán las líneas nebulares de S II ($\lambda = 6716, 6731 \text{ \AA}$) para diagnosticar la densidad electrónica del gas. El objetivo principal es calcular T_e y n_e , y explorar cómo estas propiedades físicas afectan las intensidades de las líneas espectrales observadas.

Se proporcionará un archivo espectral (`ic2149.dat`) que contiene longitudes de onda (λ), intensidades (I) y errores (σ). En primer lugar, deberá cargar y visualizar los datos del espectro para identificar las líneas espectrales de interés. A continuación, ajuste las líneas espectrales utilizando un modelo que combine una ley de potencias para el continuo y funciones gaussianas para las líneas de emisión. Este ajuste permitirá determinar parámetros clave como la posición central de las líneas, su amplitud y el ancho a media altura (FWHM). Posteriormente, deberá calcular T_e utilizando la relación entre las intensidades aurorales y nebulares:

$$R = \frac{\text{Intensidad Nebular}}{\text{Intensidad Auroral}}.$$

Este cociente se vincula con T_e mediante ecuaciones de equilibrio estadístico que consideran las probabilidades de colisión y radiación. Realiza este cálculo para O III y Ne V, y grafique cómo varía $R(T_e)$ en función de la temperatura.

Además del cálculo de T_e , diagnostique n_e utilizando las líneas nebulares de S II ($\lambda = 6716, 6731 \text{ \AA}$). Calcuque el cociente $R_{\text{S II}} = I(6716)/I(6731)$, y utiliza relaciones teóricas para estimar la densidad electrónica dentro del rango típico de $n_e \sim 10^2 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$. Examine cómo varían las intensidades de las líneas nebulares a medida que n_e aumenta o disminuye, y qué implicaciones físicas tiene esto en el gas ionizado. Finalmente, analice las diferencias en la sensibilidad de O III y Ne V a diferentes rangos de temperatura, y discuta por qué Ne V es más adecuado para diagnosticar regiones con temperaturas

más altas.

Como parte del informe, incluya gráficos del espectro ajustado resaltando las líneas aurales y nebulares, curvas de $R(T_e)$ y $R_{S II}(n_e)$, y un detallado con sus cálculos, interpretaciones y respuestas a preguntas clave: ¿Qué diferencias existen en la sensibilidad de O III y Ne V a diferentes rangos de T_e ? ¿Cómo afecta n_e las intensidades de las líneas nebulares de S II? ¿Qué cambios esperaría si n_e aumenta por un orden de magnitud? Utiliza herramientas computacionales como Python y bibliotecas específicas como **numpy**, **matplotlib**, **sherpa** y **scipy** para realizar los cálculos y generar las visualizaciones requeridas.

Referencias

- Indebetouw, R., Matsuura, M., Dwek, E., Zanardo, G., Staveley-Smith, L., Gaensler, B., Meixner, M., Sonneborn, G., Baes, M., Bouchet, P., et al. (2014). Dust production and particle acceleration in supernova 1987A revealed with ALMA. *The Astrophysical Journal Letters*, 782(1), L2.
- Mezger, P., & Henderson, A. (1967). Galactic H II regions. I. Observations of their continuum radiation at the frequency 5 GHz. *Astrophysical Journal*, vol. 147, p. 471, 147, 471.
- Turner, J. L., Beck, S. C., & Ho, P. T. (2000). The radio supernova in NGC 5253. *The Astrophysical Journal*, 532(2), L109.
- Weilbacher, P. M., Monreal-Ibero, A., Kollatschny, W., Ginsburg, A., McLeod, A. F., Kamann, S., Sandin, C., Palsa, R., Wisotzki, L., Bacon, R., et al. (2015). A MUSE map of the central Orion Nebula (M 42). *Astronomy & Astrophysics*, 582, A114.
- Wood, D. O., & Churchwell, E. (1989). The morphologies and physical properties of ultracompact H II regions. *Astrophysical Journal Supplement Series (ISSN 0067-0049)*, vol. 69, April 1989, p. 831-895., 69, 831-895.