

# Programa de la Asignatura

## Astrofísica de Regiones de Formación Estelar y Núcleos Galácticos Activos.

### **Profesores:**

Profesores a Cargo: Dra. Mónica Cardaci y Dr. Guillermo Hägele.

Profesores mesa examinadora: Dra. Mónica Cardaci, Dr. Guillermo Hägele, Dr. Guillermo Bosch, Dra. Cristina Cappa.

**Modalidad y Carrera:** La materia se ofrece como seminario de grado de la Carrera de la Licenciatura en Astronomía, y como seminario de posgrado de la Carrera de Doctorado en Astronomía.

**Carga horaria semanal:** 4 horas de teoría.

**Carácter:** Semestral (segundo semestre).

### **Evaluación:**

En el caso que la asignatura se realice como seminario de grado el alumno debe asistir a un mínimo del 80 % de las clases teóricas y deberá exponer uno de los temas de la asignatura en una clase de dos horas. El examen final será cumpliendo la pautas establecidas por la reglamentación vigente para seminarios de grado.

En su modalidad de seminario de posgrado, la asignatura tiene características similares al caso de seminario de grado, pero la evaluación será más completa, buscando una mayor profundidad de los conocimientos adquiridos, con el adicional de un tema de la materia a convenir que el estudiante debe presentar y que deberá exponer también en una clase de dos horas. El examen final será cumpliendo la pautas establecidas por la reglamentación vigente para seminarios de posgrado.

### **Correlatividades:**

Estadística Aplicada [736]

Sistemas Estelares [737]

Elementos de Astrofísica Teórica [739]

Sería conveniente, aunque no imprescindible, que los alumnos hubieran también cursado las optativas Óptica Astronómica, Astronomía Observacional y Medio Interestelar.

**Objetivos:** A lo largo de décadas la interpretación del espectro de las nebulosas ionizadas ha servido para estudiar, por ejemplo, cómo se forman y mueren las estrellas, cómo es la formación de galaxias o realizar estudios del Universo a gran escala, incluyendo su metalicidad primordial. En este contexto, las observaciones del gas ionizado y los modelos de foto-ionización son esenciales para derivar las abundancias químicas de la fase gaseosa en Regiones de Formación Estelar (SFRs) y su población estelar, y son esenciales en el estudio de galaxias con núcleos activos y la interrelación de éste con su medio circundante a través del flujo de materia. Por esto, el objetivo de la materia es brindar a los estudiantes avanzados de grado y los estudiantes de doctorado de la Carrera de Astronomía una introducción a los conceptos observacionales y las bases teóricas para el estudio integral de las propiedades físicas del gas (densidades y temperaturas electrónicas, abundancias químicas, grado de ionización y temperatura efectiva del campo de radiación, y cinemática del gas) y poblaciones estelares en diferentes entornos, incluyendo regiones con diferentes metalicidades, estados evolutivos o fuentes de ionización, desde cúmulos estelares ionizantes en Regiones de Formación Estelar a Núcleos Activos de Galaxias (AGNs).

## Programa:

### 1. **Introducción a las nebulosas ionizadas.**

Rápida revisión de los principales procesos físicos. Objetos interestelares y componentes del Medio Interestelar (MI). Fuentes de energía: campos de radiación; campos magnéticos; rayos cósmicos, energía cinética del MI. Diagramas diagnóstico (BPT) de clasificación de fuentes ionizantes.

### 2. **Enfriamiento y calentamiento del gas.**

Espectroscopía: transiciones electrónicas (atómicas y moleculares). Tasa de enfriamiento. Sistema de dos niveles: límite ópticamente delgado, efectos de la profundidad óptica y excitación radiativa. Enfriamiento del gas en regiones ionizadas y en regiones atómicas neutras. Ley de enfriamiento. Calentamiento por foto-ionización y efecto foto-eléctrico. Transferencia de calor entre el gas y el polvo. Calentamiento por rayos cósmicos, rayos-X, turbulencia, difusión ambipolar, gravitacional. Calentamiento del MI.

### 3. **Polvo interestelar.**

Procesos físicos: absorción y scattering. Destrucción de los granos. Observaciones: extinción interestelar, dispersión y polarización de la luz, emisión infrarroja, proporción gas-polvo, depleción interestelar.

### 4. **Regiones HII.**

Balance de ionización: (i) hidrógeno: tamaño de las regiones, grado de ionización, frente de ionización, estructura de ionización, parámetro de ionización; (ii) helio; (iii) estructura de ionización de especies trazadoras. Polvo y regiones HII. Balance de energía: nebulosa de hidrógeno puro y nebulosa con elementos trazadores. Características de la emisión. Líneas de recombinación de hidrógeno. Radiación de líneas excitadas colisionalmente. Emisión en radio.

### 5. **Observaciones de Regiones HII.**

Espectroscopía óptica: medición de líneas y poblaciones subyacentes. Densidades y temperaturas electrónicas. Temperatura estelar efectiva del cúmulo ionizante y parámetro de ionización. Abundancias químicas elementales: régimen de baja y alta metalicidad. Polvo en regiones HII. Fluctuaciones de temperatura.

### 6. **Dinámica del medio.**

Choques: tipos J y C. Expansión de Regiones HII. Explosión de supernovas. Vientos interestelares.

### 7. **Espectroscopía de alta resolución espectral y espacial.**

Componentes cinemáticas en los perfiles de emisión: múltiples componentes, instrumentación y técnicas de medida. Modelos de formación de las distintas componentes: (i) remanentes de supernova; (ii) vientos en sistemas estelares múltiples; (iii) fases del medio: nubes foto-evaporadas. Relación  $\sigma$ -L en distintos sistemas estelares: circunucleares, regiones gigantes, galaxias HII y elípticas. Masas dinámicas, de cúmulos ionizantes y de hidrógeno ionizado.

### 8. **Evolución química de galaxias.**

Componentes de los modelos: (i) condiciones iniciales; (ii) productos finales de la evolución estelar; (iii) función inicial de masas; (iv) tasa de formación estelar incluyendo

efectos estocásticos; (v) contexto galáctico. Aproximación de reciclado instantáneo y lento. Modelo simple de una zona. Cociente de abundancias de elementos primarios y secundarios. Gradiente radial de abundancias en galaxias espirales. Relación edad-metalicidad en diferentes poblaciones estelares. Modelos de “inflow”. Evaluación química de elementos livianos. Evolución química de galaxias enanas, elípticas e interactuantes. Gradiente de densidades electrónicas, abundancias químicas y tasa de formación estelar en galaxias interactuantes.

9. **Evolución química a escala cosmológica.** Evolución de la luminosidad. Abundancia del material procesado. Brotes de formación estelar y producción de metales. Sistemas con líneas de absorción a alto corrimiento al rojo. Determinación del helio primordial.
10. **Núcleos Galácticos Activos.**  
Propiedades más relevantes: tamaños angulares, luminosidades, distribución espectral de energía, líneas de emisión, variabilidad, polarización. Taxonomía. Galaxias anfitrionas.
11. **Paradigma del agujero negro.**  
Masa del objeto central, acreción de materia y estructura del disco de acreción, y modelos alternativos. Evidencia de agujeros negros masivos en galaxias: comportamiento esperado de las estrellas y el material interestelar, y de la existencia del agujero negro masivo en el centro de nuestra galaxia.
12. **Emisión de los AGNs.**  
Continuo: óptico-UV, altas energías, IR y radio. Variabilidad del continuo. Región de líneas anchas (BLR): parámetros básicos (densidades, masas), foto-ionización, perfiles de las líneas, tamaños usando mapas de reverberación, campo de velocidades. Correlación entre línea y continuo. Región de líneas angostas (NLR): condiciones físicas en entornos de baja densidad, perfiles de las líneas, morfología. Diagramas diagnóstico tipo BPT. Mecanismos físicos de formación de líneas. Condiciones de equilibrio de foto-ionización. Choques: estructura interna, foto-ionización pos-choque. Línea  $K\alpha$  del Fe neutro. Luminosidad como función del corrimiento al rojo (L-z).
13. **Modelo Unificado.**  
Descripción del modelo unificado. Evidencias observacionales. El comportamiento dual de NGC 1068.
14. **Procesos a altas energías.**  
Fuentes de altas energías. Espectro observado de AGNs. Origen de la radiación X y  $\gamma$ . Producción de electrones energéticos. Condiciones físicas del medio.
15. **Absorción en AGNs.**  
Fenomenología. Warm absorbers en rayos X. Absorción intrínseca y galáctica del hidrógeno neutro. Galaxias Dumped Lyman- $\alpha$  y Lyman- $\alpha$  forest.
16. **Espectroscopía de rayos X de SFRs y AGNs.**  
Introducción al análisis de datos en rayos-X. Método de modelado de los espectros. Modelos más usados para analizar la química del medio.
17. **Códigos de foto-ionización.**  
Introducción al código de foto-ionización *Cloudy*. Descripción de los parámetros de entrada de los modelos: fuentes ionizantes, geometría de la nebulosa, abundancias químicas,

modelos de polvo, etc. Utilización del código de foto-ionización Cloudy para modelar SFRs y AGNs. Nociones sobre el código de foto-ionización *MAPPINGS*. Modelado de las fuentes de ionización en regiones HII, código de síntesis de poblaciones estelares *Starburst99*. Ajuste observacional de poblaciones estelares utilizando el código *Starlight*.

#### 18. Interpretación de las salidas de los modelos.

Cómo se reobtienen las abundancias químicas a partir de las líneas calculadas por el código. Cómo se obtienen propiedades de la fuente ionizante, y los valores predichos de gradientes de densidades y temperaturas a los largo de la nebulosa.

### Bibliografía:

- The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, A. Tielens, Cambridge University Press, 2006.
- Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies (2da edición), B. Pagel, Cambridge University Press, 2009.
- Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei, D. Osterbrock y G. Ferland, University Science Books, 2006.
- Galaxies in the Universe: An Introduction, L. Sparke y J. Gallagher, Cambridge University Press, 2000.
- High Energy Astrophysics (Vol. 2): Stars, the Galaxy and the Interstellar medium (2da edición), M. Longair, Cambridge University Press, 1994.
- An Introduction to Active Galactic Nuclei, B. Peterson, Cambridge University Press, 2004.
- Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment, J. Krolik, Princeton Series in Astrophysics, 1999.
- Hazy 3: a brief introduction to Cloudy results, computational environment, and test suite version 08, G.J. Ferland, Department of Physics and Astronomy, University of Kentucky, Lexington.
- Página web de Cloudy: <http://www.nublado.org/>
- Página web de MAPPINGS: <http://www.ifa.hawaii.edu/~kewley/Mappings/>
- Página web de Starburst99: <http://www.stsci.edu/science/starburst99/docs/howto.html>
- Página web de Starlight: <http://astro.ufsc.br/starlight/>