

EX-2024-00605830- -UNC-ME#FAMAF

| PROGRAMA DE ASIGNATURA                     |                                                        |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>ASIGNATURA:</b> Astrofísica I           | <b>AÑO:</b> 2024                                       |
| <b>CARACTER:</b> Obligatoria               | <b>UBICACIÓN EN LA CARRERA:</b> 4° año 2° cuatrimestre |
| <b>CARRERA:</b> Licenciatura en Astronomía |                                                        |
| <b>REGIMEN:</b> Cuatrimestral              | <b>CARGA HORARIA:</b> 120 horas                        |

| FUNDAMENTACIÓN Y OBJETIVOS |
|----------------------------|
|----------------------------|

**\* Fundamentación:**

La Astrofísica es el estudio de la Física del Universo. El análisis e interpretación del espectro continuo, como así también el de líneas, de los cuerpos celestes que lo componen ha contribuido (y contribuye) fuertemente al entendimiento del origen, evolución y composición de cada uno de ellos.

Por lo tanto, para el/la futuro/a astrónomo/a resulta crucial la comprensión de todos los fenómenos y modelos físicos que contribuyen a determinar cada uno de los rasgos característicos que aparecen en los mismos, con independencia del particular objeto celeste de estudio.

Esta asignatura es esencialmente una introducción a la teoría del espectro continuo de las atmósferas estelares. De esta manera se complementa la teoría de las líneas espectrales introducida en la asignatura "Astrofísica General" del cuatrimestre anterior, recibiendo así el/la estudiante un panorama introductorio completo de la teoría de las atmósferas estelares, de básica importancia para todas las especializaciones relacionadas con la física de las estrellas analizada a partir de observaciones espectroscópicas. Sin embargo, los conceptos desarrollados en el curso tales como, en particular, la ecuación de transporte radiativo, resultan de amplia aplicación en otras áreas de la astrofísica, no sólo estelar.

**\* Objetivos:**

El principal objetivo de esta asignatura es que el estudiante adquiera y ponga en práctica conceptos y procedimientos astrofísicos fundamentales sobre los siguientes contenidos:

- (1) Campo radiativo e interacción con la materia.
- (2) Ecuación del transporte radiativo: solución e interpretación física en distintas geometrías y contextos astrofísicos.
- (3) Equilibrio radiativo y convectivo.
- (4) Origen y consecuencias de la opacidad continua y de la absorción de líneas.
- (5) Construcción de modelos numéricos que ayuden a interpretar las observaciones.

| CONTENIDO |
|-----------|
|-----------|

**Unidad I: Revisión de Conceptos Básicos.**

Órdenes de magnitudes en Astrofísica. Escala de energías de los fenómenos físicos. Procesos radiativos clásicos: Bremsstrahlung Térmico y Radiación Sincrotrón. Procesos radiativos en la Teoría Cuántica. Estructuras de la materia en Astrofísica. Detección de fotones: absorción atmosférica, radio, microondas, sub-milimétrico, IR, óptico, UV, rayos X (blandos y duros) y rayos gamma. Materia y su descripción: peso atómico y peso molecular, átomo-gramo y mol, Número de Avogadro, masa absoluta de átomos y moléculas. Gas ideal. Ecuación de estado de los gases ideales. Transformación adiabática. Equilibrio Termodinámico Estricto (ETE). Emisión y absorción en ETE. Ley de Kirchhoff. Radiación del cuerpo negro: Ley de Planck Ecuación de equilibrio de excitación de Boltzmann. Ecuación de equilibrio de ionización de Saha. Combinación de las ecuaciones de Boltzmann y Saha. Ley de Maxwell de distribución de velocidades: diversas formas. Velocidad más probable, media y cuadrática media. Ecuación de disociación molecular.

**Unidad II: Radiación Electromagnética y Procesos Radiativos.**

Radiación de partículas cargadas. Propiedades generales del Campo Radiativo. Reacciones radiativas. Teoría cuántica de la radiación: generalidades. Cantidades macroscópicas para la

radiación. Absorciones y emisiones continuas. Transiciones atómicas ligado-libre y libre-libre. Scattering de la radiación: electrónico y molecular. Arrastre radiativo de las partículas cargadas. Scattering Compton. Proceso Bremsstrahlung: clásico, cuántico, térmico y absorción libre-libre. Radiación de Sincrotrón: conceptos básicos, distribuciones angular y espectral de la radiación, espectro "power-law" de los electrones, auto-absorción. Radiación y espectro no térmicos. Índice espectral. Fenómenos de Fotoionización. Ionización colisional. Absorciones y emisiones de líneas. Ecuación General del Transporte Radiativo.

### **Unidad III: Descripción del Campo Radiativo e Interacción con la Materia.**

Concepto de atmósfera estelar. Objeto de la teoría de las atmósferas estelares. Presión gaseosa y presión de radiación. Significado de la temperatura en una atmósfera estelar. Temperaturas de excitación, ionización, cinética, de color, de brillo y efectiva. Mecanismos de transporte de energía. Teoría de la Radiación: intensidad específica monocromática y media, densidad de flujo de radiación, radiancia e intensidad media equivalente. Propiedades básicas de un campo isótropo. Densidad de energía. Integral K y presión de radiación. Coeficiente de absorción. Ley de extinción. Coeficiente de emisión. Función fuente: unidades. Función fuente en casos especiales. Función fuente en el caso general. Balance microscópico de energía en las hipótesis de dispersión isotrópica pura, absorción pura y Equilibrio Termodinámico Local.

### **Unidad IV: Planteamiento, Solución Formal e Interpretación de la Ecuación del Transporte Radiativo.**

Ecuación de transporte radiativo en coordenadas esféricas. Condiciones de contorno. Atmósfera de capas plano-paralelas. Capa de espesor finito y atmósfera semi-infinita. Solución de la ecuación de transporte radiativo en casos particulares. Solución formal de la ecuación de transporte radiativo. Aplicaciones a la capa de espesor finito y atmósfera semi-infinita. Integral básica de la ecuación de transporte. Intensidad emergente de una capa con  $S(\tau_{\nu}) = \text{constante}$  y con  $S(\tau_{\nu}) = a + b \cdot \tau_{\nu}$ . Solución para un punto interior de una atmósfera. Integrales exponenciales: propiedades. Ecuaciones integrales de Milne y de Schwarzschild-Milne. Integral K en función de integrales exponenciales.

### **Unidad V: Equilibrio Radiativo y Equilibrio Convectivo.**

Condición de equilibrio radiativo propiamente dicha. Constancia del flujo total. Variación del flujo total con la distancia al centro en una atmósfera extendida. Relación entre flujo total y temperatura efectiva. Ecuación de continuidad. Relación entre equilibrio radiativo y presión de radiación. Ecuaciones de Milne. Transporte de energía por convección. Condición de flujo convectivo: criterio clásico de Schwarzschild. Peso molecular medio. Condición de flujo convectivo para gases mono y poliatómicos. Relación entre los gradientes térmico y adiabático.

### **Unidad VI: Solución de una Atmósfera Gris en Equilibrio Radiativo.**

Atmósfera gris. Ecuación de transporte en la atmósfera gris. Condiciones de equilibrio radiativo y ecuaciones de Milne. Primera aproximación de Eddington: cálculo de  $J$ ,  $F$ ,  $K$ ,  $S$ ,  $\nabla T$  y oscurecimiento al limbo. Segunda aproximación de Eddington: cálculo de  $J$ ,  $F$ ,  $K$ ,  $S$ ,  $\nabla T$  y oscurecimiento al limbo. Segunda aproximación corregida: función fuente integrada y distribución de temperatura. Método de las ordenadas discretas de Chandrasekhar: función fuente integrada en la  $n$ -ésima aproximación, función de Hopf y distribución de temperatura. Intensidades saliente y entrante. Oscurecimiento hacia el limbo en la  $n$ -ésima aproximación.

### **Unidad VII: Atmósfera gris y atmósfera real (no gris) en ETL.**

Ablandamiento de la radiación en la atmósfera gris. Atmósfera gris y no gris en ETL: simplificación del problema. Intensidad emergente y entrante en atmósferas gris y no gris en ETL. Flujo monocromático a diferentes profundidades. Solución aproximada para la atmósfera real: hipótesis para  $B_{\nu}(T(\tau_{\nu}))$ . Comparación de una atmósfera gris y no gris en ETL. Solución formal en la aproximación de Eddington. Solución aproximada para una atmósfera no gris. Coeficientes medios de absorción: pesado por el flujo de Eddington, media de Planck, Rosseland y Chandrasekhar. No

conservación del flujo en la atmósfera no gris.

### **Unidad VIII: El Coeficiente de Absorción Continua.**

Composición química en las atmósferas estelares: diversas formas. Unidades del coeficiente de absorción continua. Coeficientes de Einstein de emisión espontánea, inducida y absorción real. Factor de emisiones estimuladas. Contribución del H neutro a la opacidad continua: transiciones ligado-libre y libre-libre. Ion H-: condiciones físicas y químicas necesarias para su formación. Contribución del ion H- al coeficiente de opacidad: transiciones ligado-libre y libre-libre. Absorción continua de H<sub>2</sub>. Otros absorbentes continuos hidrogenoides. Nociones básicas sobre la contribución de los metales, del helio neutro y ionizado y de los iones negativos de elementos más pesados. Esparcimiento electrónico y molecular. Coeficiente de absorción continua total. Unidades.

### **Unidad IX: Modelos de Atmósferas Estelares.**

Modelo de atmósfera estelar: concepto y definición. Modelos estáticos y unificados. Hipótesis básicas. Ecuación del equilibrio hidrostático. Distribución de temperatura en el Sol: relaciones de Eddington-Barbier. Distribución de temperatura en estrellas sin diámetro aparente: métodos teóricos para determinar distribución de temperatura. Método de ajuste de la distribución de temperatura solar. Relación entre presión del gas, presión electrónica y temperatura. Construcción de un modelo de atmósfera estelar. Método de Unsöld-Lucy. Determinación de la profundidad geométrica. Modelos de atmósferas extendidas. Modelos de atmósferas planetarias. Códigos actuales.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **BIBLIOGRAFÍA BÁSICA**

1. Clariá, J.J. y Levato, H., "El Espectro Continuo de las Atmósferas Estelares", 2008, Editorial Comunicarte, Córdoba, Argentina.
2. Crivellari, L., Simón-Díaz, S. y Arévalo, M., 2020, "Radiative Transfer in Stellar and Planetary Atmospheres", Canary Islands Winter School of Astrophysics, Cambridge University Press.
3. Gray, D., "The Observation and Analysis of the Stellar Photospheres", 1992, 2nd edit., Cambridge University Press.
4. Hubeny, D. y Mihalas, D., 2015, "Theory of Stellar Atmospheres", Princeton University Press.
5. Rutten, R.J., "Radiative Transfer in Stellar Atmospheres", 2003, Institute of Theoretical Astrophysics, Oslo.

### **BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA**

6. Aller, L.H., "Astrophysics: the Atmospheres of the Sun and the Stars", 1963, 2nd edit., Ronald Press Co.
7. Ambartsumian, V.A., "Astrofísica Teórica" (vols. I y II), 1966–1967, EUDEBA.
8. Böhm-Vitense, E., "Introduction to Stellar Astrophysics: Stellar Atmospheres", 1989, Cambridge University Press.
9. Bowers, R. y Deeming, T., "Astrophysics I: Stars", 1984, Jones & Bartlett Publishers, Inc.
10. Bradt, H., "Astrophysics Processes", 2010, Cambridge University Press.
11. Chandrasekhar, S., "Radiative Transfer", 1960, 2nd. edit., Dover Publications, Inc., New York.
12. Clayton, D.D. 1983, "Principles of stellar evolution and Nucleosynthesis", University of Chicago Press.
13. Foukal, P.V., "Solar Astrophysics", 2004, 2nd edit., WILEY-VCH Verlag.
14. Harwit, M., "Astrophysical Concepts", 1988, 2nd edit., Springer-Verlag.
15. Novotny, E., "Introduction to Stellar Atmospheres and Interiors", 1973, Oxford University Press, New York.
16. Padmanabhan, T., "Theoretical Astrophysics", Vol. I: Astrophysical Processes, 2000, Cambridge University Press.
17. Rybicki, G.B. y Lightman, A.P. 1979, "Radiative Processes in Astrophysics", John Wiley & Sons.

EX-2024-00605830- -UNC-ME#FAMAF

18. Shu, F.H., "The Physics of Astrophysics", Vol. I: Radiation, 1991, University Science Books.  
19. Swihart, T.L. 1968, "Astrophysics and Stellar Astronomy", John Wiley & Sons.  
20. Wolley, R.V.D. y Stibbs, D.W.N., "The Outer Layers of the Stars", 1953, Oxford at the Clarendon Press.

### EVALUACIÓN

#### FORMAS DE EVALUACIÓN

- Durante el cursado se presentarán 5 trabajos prácticos, cuyas resoluciones se deberán subir al aula virtual de la asignatura.
- El examen final será una evaluación oral sobre contenidos teóricos-prácticos de la asignatura. La aprobación del mismo requiere de una calificación mayor o igual a 4.

#### REGULARIDAD

##### 1. ASISTENCIA

Cumplir con un mínimo de 70% de asistencia a las clases teóricas y prácticas.

##### 2. TRABAJOS PRÁCTICOS Y DE LABORATORIO

Aprobar al menos el 60% de los 5 Trabajos Prácticos previstos para la asignatura.

#### PROMOCIÓN

La materia no contempla régimen de promoción.