



# Maestría en astrofísica IRyA-UNAM

## Programa Astrofísica Estelar

*Omaira González Martín, responsable de posgrado* [jposg@irya.unam.mx](mailto:jposg@irya.unam.mx)  
*Karin Hollenberg, administración de posgrado* [k.hollenberg@irya.unam.mx](mailto:k.hollenberg@irya.unam.mx)  
Página de posgrado: <https://posgrado.irya.unam.mx>  
Contacto para pedir información: [posgrado@irya.unam.mx](mailto:posgrado@irya.unam.mx)

---

## Astrofísica Estelar

**Objetivo general:** Introducir al alumno a la física necesaria para entender la estructura y evolución de las estrellas, así como el espectro de radiación emitida por ellas.

**Objetivos específicos:** El objetivo de este curso será proporcionar al alumno un entendimiento teórico de los siguientes temas y conceptos:

- ✓ Conceptos físicos básicos: Transferencia de radiación, equilibrio termodinámico, equilibrio virial y equilibrio hidrostático.
- ✓ Procesos físicos en los interiores estelares: Ecuaciones de estado, reacciones nucleares, transporte de energía.
- ✓ Estructura Estelar: Secuencias homólogas y soluciones politrópicas.
- ✓ Evolución Estelar: Formación de estrellas, la secuencia principal, etapas tardías, la muerte de las estrellas e interacción en sistemas binarios.
- ✓ Atmósferas Estelares: Opacidades, equilibrio termodinámico local, formación de líneas y vientos estelares.

### Listado de profesores que imparten Materia Interestelar

#### atmósferas estelares

Sundar Srinivasan

Will Henney

Ricardo Chávez

Ricardo González

Jesús Toalá

#### estructura y evolución

Jane Arthur

Susana Lisano

Carlos Carrasco

## CONTENIDO TEMÁTICO

### I. FÍSICA BÁSICA Y PROCESOS RADIATIVOS

#### 1.1 El campo de radiación

1.1.1 Los tres niveles de descripción (macroscópico, electromagnético y cuántico).

1.1.2. La intensidad específica y sus momentos.



# Maestría en astrofísica IRyA-UNAM

## Programa Astrofísica Estelar

*Omaira González Martín, responsable de posgrado* [jposg@irya.unam.mx](mailto:jposg@irya.unam.mx)  
*Karin Hollenberg, administración de posgrado* [k.hollenberg@irya.unam.mx](mailto:k.hollenberg@irya.unam.mx)  
Página de posgrado: <https://posgrado.irya.unam.mx>  
Contacto para pedir información: [posgrado@irya.unam.mx](mailto:posgrado@irya.unam.mx)

---

### 1.2 Conceptos básicos de la transferencia radiativa

En esta parte del curso, se introducen los conceptos de TR que son necesarios para las demás partes de los procesos.

- 1.2.1 Interacción de la radiación con la materia (emisión y absorción /dispersión).
- 1.2.2 Opacidad, emisividad, función fuente, profundidad óptica.
- 1.2.3. Derivación de la ecuación de transporte a lo largo de un rayo y su solución formal.
- 1.2.4. El equilibrio radiativo.

### 1.3 Aplicaciones sencillas de la transferencia radiativa

- 1.3.1 Pura absorción-extinción por polvo.
- 1.3.2 Emisión ópticamente delgada.
- 1.3.3 La aproximación de difusión.

### 1.4 Equilibrio termodinámico local

- 1.4.1 Excitación de los niveles (distribución de Boltzmann).
- 1.4.2 Principio de correspondencia.
- 1.4.3 Estado de ionización (ecuación de Saha).
- 1.4.4 Distribución de Maxwell-Boltzmann.
- 1.4.5 Ecuación de estado del gas ideal.
- 1.4.6 Gas de fotones, radiación de cuerpo negro.
- 1.4.7 Definición de ETL y Contraste con ET.
- 1.4.8 Coeficientes de Einstein y relaciones de Einstein (y Einstein Milne).
- 1.4.9 Ley de Kirchhoff.

## II. ATMÓSFERAS ESTELARES

### 2.1 Introducción a las atmósferas estelares

- 2.1.1 Terminología básica.
- 2.1.2 Las diferentes regiones de una atmósfera.
- 2.1.3 El problema básico de la atmósfera: el acoplamiento entre la radiación y el gas.
- 2.1.4 Observaciones fundamentales de atmósferas (colores y líneas).
- 2.1.5 Elementos de la astronomía observacional.
  - 2.1.5.1 Espectroscopía, fotometría, medición de líneas, etc.
- 2.1.6 Clasificación espectral, diagrama de Hertzsprung-Russell.

### 2.2 La transferencia radiativa en geometría plano- paralela

- 2.2.1 La ecuación de transporte y su solución formal en geometría plano-paralela.
- 2.2.2 Momentos de la ecuación de transporte y las ecuaciones de SchwarzschildMilne.
- 2.2.3 La conservación de flujo como consecuencia del equilibrio radiativo.
- 2.2.4 La relación Eddington-Barbier.



# Maestría en astrofísica IRyA-UNAM

## Programa Astrofísica Estelar

*Omaira González Martín, responsable de posgrado* [jposg@irya.unam.mx](mailto:jposg@irya.unam.mx)  
*Karin Hollenberg, administración de posgrado* [k.hollenberg@irya.unam.mx](mailto:k.hollenberg@irya.unam.mx)  
Página de posgrado: <https://posgrado.irya.unam.mx>  
Contacto para pedir información: [posgrado@irya.unam.mx](mailto:posgrado@irya.unam.mx)

---

### Continúa 2.2 La transferencia radiativa en geometría plano- paralela

- 2.2.5 La atmósfera gris en la aproximación Eddington.
- 2.2.6 Estructura de temperatura en ETL y ER.
- 2.2.7 Oscurecimiento al limbo.
- 2.2.8 Otros contextos para la transferencia radiativa: nubes moleculares, discos de acreción, líneas de resonancia en regiones HII y galaxias.

### 2.3 Opacidades

- 2.3.1 Fuentes de opacidad atmosférica.
- 2.3.2 Las variedades de opacidades promedio.

### 2.4 Cómo calcular un modelo de una atmósfera

- 2.4.1 Equilibrio hidrostático:  $P(p, z)$ .
- 2.4.2 Transporte radiativo, ETL, ER:  $T(T)$ ,  $T(k, z)$ .
- 2.4.3 Opacidad:  $k(p, T)$ .
- 2.4.4 Ecuación de estado:  $P(p, T)$ .

### 2.5 Aplicaciones sencillas de Atmósferas I

- 2.5.1 Dependencia del espectro en temperatura y presión.
- 2.5.1.1 Dependencia de salto de Balmer

### 2.6 Introducción a la formación de líneas

- 2.6.1 Perfiles observados y ancho equivalente.
- 2.6.2 Teoría clásica de transferencia en líneas.
- 2.6.3 Diferencia entre los límites Wien y Rayleigh-Jeans.
- 2.6.4 Las curvas del crecimiento.
- 2.6.5 Incorporación de líneas en modelos ETL.
- 2.6.6 Efecto de líneas en Modelos ETL.

### 2.7 Aplicaciones sencillas de atmósferas II

- 2.7.1 Dependencia del espectro en temperatura y presión
- 2.7.1.1 Líneas de Balmer.
- 2.7.1.2 Líneas representativas de metales.

### 2.8 Atmósferas NLTE

- 2.8.1 Tasas de transiciones fuera de ETL.
- 2.8.2 Reconsideración de la aproximación ETL.
  - 2.8.2.1 Criterios para recuperar equilibrio termodinámico
  - 2.8.2.2 Límites de alta y baja densidad.
- 2.8.3 Atmósferas de estrellas masivas.
- 2.8.4 La cromósfera y corona.



# Maestría en astrofísica IRyA-UNAM

## Programa Astrofísica Estelar

*Omaira González Martín, responsable de posgrado* [jposg@irya.unam.mx](mailto:jposg@irya.unam.mx)  
*Karin Hollenberg, administración de posgrado* [k.hollenberg@irya.unam.mx](mailto:k.hollenberg@irya.unam.mx)  
Página de posgrado: <https://posgrado.irya.unam.mx>  
Contacto para pedir información: [posgrado@irya.unam.mx](mailto:posgrado@irya.unam.mx)

---

## 2.9 Vientos estelares

- 2.9.1 Parámetros empíricos y diagnósticos básicos.
  - 2.9.1.1 Tasa de pérdida de masa.
  - 2.9.1.2 Velocidad terminal.
  - 2.9.1.3 Ley de velocidad.
  - 2.9.1.4 Perfiles P Cisne.
  - 2.9.1.5 Diagnósticos de  $dM/dt$  y  $V$  inf.
- 2.9.2 Teoría básica de la aceleración de vientos.
  - 2.9.2.1 Hidrodinámica del viento isotérmico.
  - 2.9.2.2 Fuerzas adicionales  $\sim r^{-2}$  y  $\sim v dv/dr$ .
  - 2.9.2.3 Vientos impulsados por polvo / Vientos impulsados por líneas de resonancia.

## III. ESTRUCTURA Y EVOLUCIÓN ESTELAR

### 3.1 Conceptos básicos de interiores estelares

- 3.1.1 Equilibrio hidrostático.
- 3.1.2 Ecuación de estado: Gas perfecto / Gas degenerado.
- 3.1.3 Equilibrio virial.
- 3.1.4 Calores específicos.
- 3.1.5 Fuentes de energía estelares.
- 3.1.6 Escalas de tiempo.
  - 3.1.6.1 Dinámica (caída libre).
  - 3.1.6.2 Térmica.
  - 3.1.6.3 Nuclear.
  - 3.1.6.4 Pérdida de masa.
- 3.1.7 Modos de transporte de energía.
- 3.1.8 Ecuaciones de estructura estelar.

### 3.2 Transporte de energía por la radiación

- 3.2.1 Revisión de la aproximación de difusión.
- 3.2.2 Fuentes de opacidad importantes.
- 3.2.3 Opacidades Rosseland como función de  $(\rho, T)$ .

### 3.3 Transporte de energía por convección

- 3.3.1 Gradiente de temperatura radiativa y adiabática.
- 3.3.2 Inestabilidad a la convección.
- 3.3.3 La frecuencia Brunt-Väisälä.
- 3.3.4 Longitud de mezcla.
- 3.3.5 Convección en núcleos de estrellas masivas.
- 3.3.6 Convección en envolventes de estrellas frías.



# Maestría en astrofísica IRyA-UNAM

## Programa Astrofísica Estelar

*Omaira González Martín, responsable de posgrado* [jposg@irya.unam.mx](mailto:jposg@irya.unam.mx)  
*Karin Hollenberg, administración de posgrado* [k.hollenberg@irya.unam.mx](mailto:k.hollenberg@irya.unam.mx)  
Página de posgrado: <https://posgrado.irya.unam.mx>  
Contacto para pedir información: [posgrado@irya.unam.mx](mailto:posgrado@irya.unam.mx)

---

### 3.4 Reacciones nucleares

- 3.4.1 Tasas de reacción.
  - 3.4.1.1 Tunélo cuántico.
  - 3.4.1.2 Sección eficaz de colisión.
  - 3.4.1.3 Pico de Gamow.
  - 3.4.1.4 Resonancias.
- 3.4.2 Leyes de conservación.
- 3.4.3 Los ciclos de combustión termonucleares.
  - 3.4.3.1 Ciclo del hidrógeno (PP y CNO).
  - 3.4.3.2 Combustión del helio.
  - 3.4.3.3 Combustión de elementos pesados.
- 3.4.4 Weak reactions y emisión de neutrinos.

### 3.5 Modelos sencillos de estructura estelar

- 3.5.1 Modelos homólogos.
- 3.5.2 Polítropos.

### 3.6 Teoría de la secuencia principal

- 3.6.1 Relación masa-luminosidad.
- 3.6.2 Relación teff -luminosidad.
- 3.6.3 Estructura interna cómo función de masa.
- 3.6.4 Evolución durante la secuencia principal.

### 3.7 La etapa pre-secuencia principal

- 3.7.1 Combustión de Deuterio.
- 3.7.2 Línea de nacimiento.
- 3.7.3 Fase pre-secuencia principal.
  - 3.7.3.1 Traza de Hayashi.
  - 3.7.3.2 Traza de Henyey.
  - 3.7.3.3 Estrellas T Tauri y Herbig Ae/Be.

### 3.8 Evolución pos-secuencia principal

- 3.8.1 Agotamiento de hidrógeno en el centro.
  - 3.8.1.1 Estrellas de masa intermedia - inestabilidad de Schönberg- Chandrasekhar.
  - 3.8.1.2 Estrellas de baja masa - flash de helio.
- 3.8.2 Formación de gigantes rojas.
- 3.8.3 Combustión nuclear de helio - rama horizontal.
- 3.8.4 Estrellas AGB.
  - 3.8.4.1 Combustión en cáscaras.
  - 3.8.4.2 Pulsos térmicos.
  - 3.8.4.3 Nebulosas planetarias.



# Maestría en astrofísica IRyA-UNAM

## Programa Astrofísica Estelar

*Omaira González Martín, responsable de posgrado* [jposg@irya.unam.mx](mailto:jposg@irya.unam.mx)  
*Karin Hollenberg, administración de posgrado* [k.hollenberg@irya.unam.mx](mailto:k.hollenberg@irya.unam.mx)  
Página de posgrado: <https://posgrado.irya.unam.mx>  
Contacto para pedir información: [posgrado@irya.unam.mx](mailto:posgrado@irya.unam.mx)

---

Continúa 3.8 Evolución pos-secuencia principal

### 3.8.5 Estrellas masivas.

- 3.8.5.1 Límite de Eddington.
- 3.8.5.2 Pérdida de masa.
- 3.8.5.3 Efectos de rotación.
- 3.8.5.4 Fase Wolf-Rayet.
- 3.8.5.5 Colapso del núcleo.
  - 3.8.5.5.1 Supernova tipo II.
  - 3.8.5.5.2 GRB largos.
  - 3.8.5.5.3 Hoyos negros estelares.

### 3.8.6 Nucleosíntesis.

## 3.9 Estrellas compactas

- 3.9.1 Transporte de energía por la conducción.
- 3.9.2 Enanas blancas.
- 3.9.3 Estrellas de neutrones.
  - 3.9.3.1 Pulsares.

## 3.10 Pulsación de estrellas

- 3.10.1 Descripción sencilla de mecanismos de pulsación.
- 3.10.2 Ejemplos de estrellas pulsantes.
- 3.10.3 La franja de inestabilidad.

## 3.11 Evolución en sistemas binarios

- 3.11.1 Puntos de Lagrange.
- 3.11.2 Lóbulo de Roche.
- 3.11.3 Clasificación de binarios.
- 3.11.4 Escenarios para la evolución de la órbita.
- 3.11.5 Discos de acreción.
- 3.11.6 Variables cataclísmicas.
- 3.11.7 Binario de rayos-X.
- 3.11.8 Supernova tipo Ia.