

# Temario de Astrofísica Estelar

## UNIDAD 1. FÍSICA BÁSICA Y PROCESOS RADIATIVOS (14 horas)

### 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

### 1.2 Conceptos básicos de la transferencia radiativa

En ésta 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

## UNIDAD 2. ATMÓSFERAS ESTELARES (30 horas)

### 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 Schwarzschild–Milne.

2.2.3 La conservación de flujo como consecuencia del equilibrio radiativo.

2.2.4 La relación Eddington–Barbier.

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

## **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

2.9.2.4 Vientos impulsados por líneas de resonancia

## **UNIDAD 3. ESTRUCTURA Y EVOLUCIÓN ESTELAR (36 horas)**

### **3.1 Conceptos básicos de interiores estelares**

3.1.1 Equilibrio hidrostático

3.1.2 Ecuación de estado

3.1.2.1 Gas perfecto

3.1.2.2 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 envoltantes de estrellas frías

## **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  $t_{\text{eff}}$  –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
- 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