

## **INTRODUCTORIO: ASTROFÍSICA GENERAL**

Curso introductorio (0 créditos)

**OBJETIVO:** Materia orientada a estudiantes que ingresan al posgrado en astronomía sin haber llevado cursos de astrofísica en licenciatura. Se pretende dar una visión global de la astrofísica moderna, que permita al estudiante adquirir un conocimiento básico amplio y un lenguaje astronómico. Por ser este un curso preparatorio para el posgrado se recomienda que se ofrezca durante el primer semestre de inscripción al posgrado o, de ser posible, en un curso intensivo previo.

### **1. Parámetros observables en la astrofísica (8 horas)**

- Coordenadas y medición del tiempo
- Velocidad radial y movimiento propio
- Paralaje y determinación de distancia
- Magnitudes y flujos

### **2. Telescopios e instrumentos (6 horas)**

- Espectro electromagnético. Astronomía en diferentes longitudes de onda
- Telescopios ópticos, radio telescopios, telescopios espaciales, instrumentos del futuro
- Detectores

### **3. Sistema Solar (10 horas)**

- El Sol
- Planetas terrestres y jovianos
- Otros componentes del sistema solar
- Formación del sistema solar

### **4. Propiedades físicas de las estrellas (7 horas)**

- Masas y radios (estrellas binarias)
- Temperatura
- Luminosidad
- Vientos estelares

### **5. Teoría de atmósferas estelares (7 horas)**

- Clasificación espectral y diagrama H-R
- Teoría de transporte de radiación
- Formación de líneas espectrales

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

### 6. Estructura estelar (8 horas)

- Equilibrio hidrostático
- Transporte de energía
- Generación de energía nuclear

### 7. Evolución estelar (8 horas)

- Formación de estrellas
- Etapa de secuencia principal
- Estrellas variables
- Etapas avanzadas de evolución (estrellas compactas)

### 8. Materia interestelar (10 horas)

- Fases del medio interestelar: gas molecular y neutro, nebulosas gaseosas, gas coronal
- Polvo interestelar
- Dinámica del gas interestelar

### 9. Estructura y componentes de la Galaxia (8 horas)

- Vecindad solar, sistema local del reposo
- Distribución de estrellas, gas y polvo en la galaxia (disco, núcleo y halo)
- Función de luminosidad
- Estrellas binarias y múltiples
- Cúmulos estelares
- Rotación galáctica
- Estructura espiral

### 10. Galaxias (6 horas)

- Clasificación de Hubble
- Rotación de las galaxias
- Masas de las galaxias
- Galaxias activas y cuasares

### 11. Cosmología (10 horas)

- Observaciones cosmológicas: expansión del Universo, radiación fósil
- El principio cosmológico. Universos homogéneos e isotrópicos
- La Gran Explosión e historia del Universo

### Prerrequisitos de Física Fundamental

- Campo gravitacional, leyes de Kepler
- Teorema del Virial

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

- Elementos de mecánica estadística
- Emisión de cuerpo negro. Átomo de hidrógeno
- Emisión molecular

### TEXTOS

1. Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., y Donner, K.J. "Fundamental Astronomy" Springer-Verlag, 1a. y 2a. edición, Berlín, 1987 y 1994.
2. Rose, W.K. "Astrophysics" Winston, Holt Rinerhart, 1973
3. Shu, F.H., "The Physical Universe, an Introduction to Astronomy" Mill Valley, Calif. University Science, 1982

## SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN I

Curso Obligatorio (10 créditos)

**OBJETIVO:** Poner en contacto a cada alumno con la actividad de investigación. Estas actividades académicas son diferentes a los cursos tradicionales pues se trata de incorporar a cada estudiante en un proyecto de investigación que se esté realizando. El estudiante participará durante el semestre en las actividades múltiples que lo requiera el proyecto.

Tiene una enorme capacidad formativa, al poner al alumno en la situación de buscar soluciones originales a problemas astronómicos utilizando el método científico aunado a las técnicas que está aprendiendo. El trabajo diario en contacto con un investigador experimentado es un método docente extremadamente completo. Esta actividad es muy variada y tiene muy diversas facetas, por lo que no se puede establecer un programa fijo ni TEXTOS. Sin embargo, se pueden establecer normas para cumplir este requisito:

1. Al principio del semestre se deberá presentar por escrito para su aprobación al Comité Académico del Posgrado plan de trabajo detallado para esta actividad. Este plan de trabajo deberá contar con la aprobación del profesor que dirija la actividad.
2. Es el trabajo que el alumno realiza como parte de su formación participando en un proyecto incorporado a un grupo de investigación, dirigido por un investigador experimentado. Puede incluir varias actividades distintas ya que es fundamentalmente la introducción a toda la gama de tareas involucradas en la investigación misma: lectura de TEXTOS básicos, revisión de artículos para informarse de los resultados más recientes, realización de observaciones, reducción de datos, elaboración de programas de cómputo, desarrollo de cálculos numéricos y modelos matemáticos, redacción de TEXTOS de presentación de la investigación, etc.
3. Estas actividades serán acreditadas mediante el trabajo continuado, entrevistas periódicas con el profesor que dirija la investigación y un reporte por escrito al final del semestre.
4. Este curso cubre diez horas a la semana.
5. No se autorizará inscripción simultánea a las materias "Seminario de Investigación, I, II, III o IV", ya que por la naturaleza de las actividades se desea que éstas sean cursadas en semestres distintos

## PROCESOS RADIATIVOS EN LA ASTROFÍSICA

Curso Básico (10 créditos)

**OBJETIVO:** Este curso estudia una gran parte de los procesos físicos importantes para una descripción de los fenómenos de interacción-radiación-materia en astrofísica. Estos procesos microscópicos tienen consecuencias muy importantes en el comportamiento de los cuerpos. En particular, se enfatiza la teoría del transporte radiativo y se dan ejemplos de aplicaciones de esta teoría.

### 1. Equilibrio termodinámico:

- Distribución de Gibbs, función de partición
- Excitación de los niveles (distribución de Boltzmann)
- Principio de correspondencia
- Estado de ionización (ecuación de Saha)
- Distribución de Maxwell-Boltzmann
- Ecuación de estado del gas ideal
- Gas de fotones, radiación de cuerpo negro
- Coeficientes de Einstein y relaciones de Einstein
- Ley de Kirchhoff

### 2. Transiciones entre niveles ligados:

- Atomo de un electrón
- Atomo multielectrónico
- Reglas de selección
- Transiciones radiativas espontáneas y estimuladas
- Transiciones colisionales

### 3. Transiciones entre el continuo y niveles ligados:

- Fotoionización y recombinación radiativa
- Autoionización y recombinación dielectrónica
- Ionización colisional y recombinación de tres cuerpos

### 4. Equilibrio estadístico:

- Equilibrio estadístico para los niveles excitados por colisiones
- Límites de alta y baja densidad
- Cascada de recombinación
- Equilibrio estadístico para la ionización
- Límites de alta y baja densidad

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

### 5. Transiciones libre-libre:

- Radiación de cargas en movimiento
- Bremsstrahlung
- Radiación sincrotrónica

### 6. Transporte radiativo:

- La intensidad específica y sus momentos
- Ecuación de transporte
- Espesor óptico
- Función fuente
- Momentos de la ecuación de transporte
- Solución formal de la ecuación de transporte

### 7. Aplicaciones de la ecuación de transporte radiativo:

- Extinción en una capa uniforme
- Formación de líneas de absorción
- Frente de ionización
- Atmósfera gris

### 8. Dispersión:

- Polarización
- Dispersión Thomson y Rayleigh
- Dispersión por granos de polvo
- Dispersión múltiple
- Dispersión Compton y Compton inverso

## TEXTOS

1. Mihalas, D. "Stellar Atmospheres" W.H. Freeman, San Francisco, 1978
2. Rybicki, G., y Lightman, P. "Radiative Processes in Astrophysics", J. Willey, New York, 1979
3. Shu, F. "The Physics of Astrophysics", Vol. 1. University Science Books, Mill Valley, California, 1991

## ESTRUCTURA Y EVOLUCION ESTELAR

Materia Optativa-Básica (6 créditos)

**OBJETIVO:** Proporcionar la teoría básica de la estructura de las estrellas y de su evolución temporal. Entendimiento profundo de las ecuaciones de estructura y comprensión básica de los procesos físicos involucrados. Conocimiento general de las numerosas etapas de la evolución estelar en función de las condiciones iniciales de formación y de la masa de la estrella.

### 1. Ecuaciones de estructura estelar:

- Ecuación de equilibrio hidrostático y de conservación de momento
- Ecuación de conservación de energía
- Ecuación de transporte de energía  
transporte por radiación y conducción  
estabilidad frente a perturbaciones  
teoría de transporte de energía por convección:  
teoría de longitud de mezcla, semiconvección, "overshooting"
- Ecuación de evolución química

### 2. Física de los interiores estelares:

- Ecuación de estado del material estelar:  
gas ideal  
ionización parcial  
radiación  
gas perfecto degenerado  
cristalización, neutronización y otros efectos menores
- Opacidad radiativa y conductividad electrónica
- Producción de energía por reacciones nucleares:  
sección eficaz de colisión
- Tasas de reacciones termonucleares
- Los ciclos de combustión termonucleares:  
ciclo del hidrógeno (PP y CNO)  
combustión del helio  
combustión de elementos pesados
- Emisión de neutrinos

### 3. Modelos sencillos de estructura estelar y propiedades generales:

- Teorema del virial
- Relaciones de homología
- Politropos
- Modelo estándar de Eddington
- Estrellas totalmente convectivas

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

- Estrellas supermasivas y presión de radiación
- Envolturas y modelos en el plano U-V
- La línea de Hayashi
- Estabilidad de la combustión nuclear central y en capa
- Diferencias entre estrellas de población I y II

### 4. Métodos numéricos:

- El método de "shooting"
- El método de Henyey
- Existencia y unicidad de soluciones

### 5. Etapas de la evolución estelar:

- Formación estelar:  
inestabilidad de nubes, criterio de Jeans  
formación de protoestrellas  
evolución hacia la secuencia principal
- La secuencia principal
- Evolución de estrellas de masa baja  
combustión de helio (flash de helio)  
la rama horizontal y la rama asintótica de las gigantes  
la fase protonebulosa planetaria y evolución hacia las enanas blancas
- Evolución de estrellas masivas  
el "gap" de Herzprung-Russell  
la fase Cefeida  
viento estelar y pérdida de masa, estrellas Wolf-Rayet  
las últimas fases de evolución  
colapso de supernovas tipo II y Ib
- Nucleosíntesis

### 6. Estrellas compactas:

- Enanas blancas:  
la masa de Chandrasekar  
modelos modernos  
enfriamiento de las enanas blancas
- Estrellas de neutrones:  
ecuación de estado de gas de alta densidad  
modelos de estrellas de neutrones

### 7. Temas avanzados:

- Evaluación de estrellas en sistemas binarios:  
pérdida de masa en sistemas cercanos  
acreción en enanas blancas (variables cataclísmicas) y supernova de tipo Ia
- Estrellas en rotación
- Estrellas pulsantes
- Astrosismología
- Neutrinos solares

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

- Enanas rojas y enanas cafés

### TEXTOS

1. Cox, J.P., & Giuli, R.T. "Principles of Stellar Structure", Gordon & Breach, New York, 1984
2. Clayton, D.F., "Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis", Univ. of Chicago, Press, Chicago, 1983
3. Chiu, H.Y., "Stellas Physics" Blaisdell, Waltham, 1968
4. De Loore, C.W.H. & Doom, C. "Structure and Evolution of Single and Binary Stars", Kluwer, Dordrecht, 1992
5. Hansen, C.J., & Kawaler, S.D. "Stellar Interiors: Physical Principles, Structure and Evolution", Springer, Berlin, 1994
6. Kippenhahn, R. & Weigert, A. "Stellar Structure and Evolution", Springer, Berlin, 1990
7. Shapiro, S.L. & Teukolsky, S.A. "Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars", Wiley-Interscience, New York, 1983

## **ATMÓSFERAS ESTELARES**

Curso Básico (10 créditos)

**OBJETIVO:** Proporcionar la teoría básica para lograr un entendimiento de los procesos que determinan el flujo emergente de una atmósfera estelar.

### **I. TEMAS BASICOS:**

#### **1. Introducción a las atmósferas estelares**

- Terminología básica
- Las diferentes regiones de una atmósfera
- El problema básico de la atmósfera: el acoplamiento entre la radiación y el gas
- Importancia del estudio de las atmósferas para otras áreas de la astrofísica

#### **2. El campo de radiación**

- Los tres niveles de descripción (macroscópico, electromagnético, cuántico)
- La intensidad específica y sus momentos

#### **3. La transferencia radiativa**

- Interacción de la radiación con la materia (emisión y absorción/dispersión)
- Opacidad, emisividad, función fuente, profundidad óptica
- Derivación de la ecuación de transporte
- La solución formal y las ecuaciones de Schwarzschild-Milne
- Momentos de la ecuación de transporte
- El equilibrio radiativo
- La aproximación de difusión

#### **4. La atmósfera gris**

- La ecuación de transporte en la aproximación gris y su solución formal
- La solución en la aproximación Eddington
- Aplicación a la estructura de temperatura en equilibrio termodinámico local (ETL)
- Aplicación al oscurecimiento al limbo
- Introducción al método de ordenadas discretas y su solución para  $n = 4$
- Las variedades de opacidades promedios y sus usos
- El espectro del flujo en una atmósfera gris

#### **5. Fuentes de la Opacidad**

- Opacidad del continuo y de las líneas
- Teoría de transiciones ligada-ligada, relaciones de Einstein

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

- Teoría de transiciones ligada-libre, relaciones de Einstein-Milne
- Aplicación a hidrógeno (incluyendo transiciones libre-libre)
- Fuentes dominantes de la opacidad a diferentes frecuencias y temperaturas, contribución de H- , metales y dispersión.

### 6. El equilibrio estadístico

- Derivación de las ecuaciones de ETL (Maxwell, Boltzmann, Saha)
- Métodos para resolver la ecuación de estado en ETL
- ¿Hasta dónde es válido el ETL?
- Las tasa de excitación/desexcitación y ionización/recombinación tanto radiativas como colisionales
- Tasas fuera de ETL

### 7. Modelos de atmósferas I

- El equilibrio hidrostático
- Modelos solares semi-empíricos
- Aplicación a otras estrellas (modelos solares escalados)

### 8. Introducción a la formación de líneas

- Mecanismos de ensanchamiento
- Teoría clásica de transferencia en líneas
- Las curvas del crecimiento
- Vientos estelares y la formación de perfiles P Cisne

## II. APLICACIONES Y TEMAS AVANZADOS:

### 1. Regreso a la ecuación de transferencia

- Métodos de solución en el caso no-gris (Rybicky, Feautrier)
- Acoplamiento con el equilibrio estadístico
- El método del operador - L aproximado
- El método de la linealización completa

### 2. Modelos de atmósferas II

- Modelos ETL de estrellas tempranas
- Efecto de la convección en estrellas tardías
- Efectos no-ETL en modelos de atmósferas

### 3. Atmósferas extendidas

- La atmósfera gris en geometría esférica
- La cromósfera y corona

### 4. La formación de líneas fuera de ETL

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

- Atomo de dos niveles
- Atomo de varios niveles
- La redistribución parcial en frecuencia

### 5. Atmósferas en movimiento

- Teoría de Sobolev
- La radiación-hidrodinámica de vientos estelares

### TEXTOS

1. Böhm-Vitense, E., "An Introduction to Stellar Astrophysics. Volume II: Atmospheres", Cambridge University Press, Cambridge, RU, 1989
2. Chandrasekhar, S. "Radiative Transfer", Dover, New York, 1960
3. Collins, G.W. "The Fundamentals of Stellar Astrophysics", Freeman, New York, 1989
4. Crivellari, L., Hubeny, I., & Hummer, D.G., eds. "Stellar Atmospheres: Beyond Classical Models", Kluwer, Dordrecht, Holanda, 1991
5. Gray, D. "The Observation and Analysis of Stellar Photospheres" 2a. Ed. CUP. Cambridge, RU, 1992
6. Mihalas, D. "Stellar Atmospheres" 2a. Ed. Freeman, New York, 1978 (Texto principal del curso)

## MATERIA INTERESTELAR

Materia Optativa - Basica (10 créditos)

**OBJETIVOS:** El estudiante aprenderá la teoría básica sobre los procesos en el Medio Interestelar (MIE). Se familiarizará con las observaciones que han dado lugar a la idea actual de la estructura y de las propiedades del MIE. Adquirirá las herramientas para estudiar los distintos fenómenos del MIE.

### 1. Introducción

Condiciones físicas de Medio Interestelar  
Fases del Medio Interestelar.  
Halos de Galaxias  
Medio Intergaláctico  
Foresta de Lyman  
Gas de Núcleos de Galaxias  
Componentes de alta energía: rayos cósmicos, rayos gamma

### 2. Polvo interestelar

Propiedades radiativas del polvo  
Composición y propiedades físicas del polvo  
Formación y destrucción de granos  
Hidrocarburos poliaromáticos

### 3. Regiones H I

Estado de ionización  
Calentamiento y enfriamiento  
La línea de 21 cm  
El polvo en las regiones H I

### 4. Regiones fotoionizadas

Regiones H-II y nebulosas planetarias  
Esfera de Strömgren  
Estructura del frente de ionización  
Radiación difusa  
Aproximación "on the spot"  
Estado de ionización de los elementos pesados  
Balance de energía

### 5. Espectro de Regiones HII y diagnósticos de plasma

Líneas útiles para determinaciones de densidad, temperatura y abundancias químicas  
Corrección por extinción  
Propiedades físicas a partir del espectro en radio

## **6. Nubes moleculares**

Estructura  
Balance de energía  
Líneas moleculares  
Química de las nubes moleculares  
Turbulencia y propiedades estadísticas de las nubes moleculares.  
Diagnósticos moleculares

## **7. Nubes en equilibrio**

Teorema del virial  
Soluciones hidrostáticas  
El efecto del campo magnético

## **8. Dinámica del medio interestelar**

Aplicabilidad de la mecánica de fluidos al medio interestelar.  
Ecuaciones de la dinámica de gases  
Ondas de sonido  
Teoría de Kolmogorov para turbulencia incompresible.  
Espectro de  $-5/3$  y cascada de energía.  
Turbulencia astrofísica. Diferencias con la teoría de Kolmogorov:  
forzamiento a escalas intermedias, compresibilidad.

## **9. Formación estelar**

Criterio de Jeans  
Colapso de una nube esférica  
Acreción de una envoltura en rotación

## **10. Ondas de choque**

Condiciones de salto  
Zonas de relajamiento  
Choque isotérmico  
Ecuaciones para la zona post-choque  
Ecuaciones para la ionización  
Enfriamiento radiativo (curva de enfriamiento) y por ionización colisional  
Modelo mínimo: calentamiento y enfriamiento por ionización de hidrógeno.  
Efecto del campo magnético

## **11. Fenómenos dinámicos y su efecto en el medio interestelar**

Expansión de regiones H II: expansión inicial del frente de ionización, expansión dinámica, equilibrio final

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

Vientos estelares: isotérmico, presión de radiación  
Burbujas de vientos estelares  
Remanentes de supernova  
Objetos Herbig-Haro y jets

### Prerrequisitos

Estos prerrequisitos se estudian en las materias de Procesos Radiativos y Atmósferas Estelares. El estudiante los puede cubrir cursando simultáneamente dichas materias, en forma tutorial o en forma personal.

#### 1. Equilibrio termodinámico y estadístico

Distribución de Maxwell-Boltzmann  
Ecuación de Saha  
Ecuación de Boltzmann  
Tiempo de relajamiento  
Equilibrio de ionización  
Equilibrio de excitación

#### 2. Transferencia radiativa

Ecuación de transporte: espesor óptico, función fuente  
Ley de Kirchhoff  
Emisión de líneas  
Ensanchamiento de líneas  
Coeficientes de emisión y de absorción

#### 3. Plasmas

Cascada de recombinación  
Líneas excitadas por colisiones  
Átomo de 3 niveles

### TEXTOS

4. Spitzer, Jr. L., Physical Processes in the Interstellar Medium, 1978, John Wiley & Sons
5. Hollenbach, D. J. & Thronson, Jr. H. A. (eds), Interstellar Processes, 1987, D. Reidel Publishing Company
6. Osterbrock, D. E., Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei, 1989, University Science Books
7. Aller, L. H., Physics of Thermal Gaseous Nebulae (Physical Processes in Gaseous Nebulae), 1987, D. Reidel Publishing Company
8. Shu, F. H., The Physics of Astrophysics, Vols. 1 y 2, 1991, University Science Books
9. Dyson, J. E. & Williams, D. A., The Physics of the Interstellar Medium, 1980, Manchester University Press

## **ESTRUCTURA GALACTICA Y DINAMICA ESTELAR**

Materia Optativa-Básica (10 créditos)

**OBJETIVOS:** Proporcionar las bases observacionales y teóricas para el análisis de la cinemática y la dinámica de sistemas estelares, y de la estructura de las galaxias.

### **1. Distribución de las estrellas en el espacio**

Distribución local  
Análisis de los recuentos estelares. Efectos de la absorción  
Función de densidad estelar  
Función de luminosidad. Espectro de masas

### **2. Cinemática estelar**

Distancias, movimientos propios y velocidades radiales. Velocidades espaciales  
Determinación del movimiento solar y del sistema local de reposo (SLR)  
Movimiento del SLR en la galaxia  
Elipsoide de velocidades. Desviación del vértice. Estrellas de alta velocidad  
Velocidades residuales

### **3. Rotación galáctica**

Cinemática de la rotación galáctica. Fórmulas generales y constantes de Oort  
Determinación de las constantes locales de la rotación:  $A$ ,  $B$ ,  $W$ ,  $R_0$   
Determinación de la ley general de rotación (en radiofrecuencias y en el óptico)  
Aplicación a la determinación de distancias  
Rotación en otras galaxias

### **4. Estructura a gran escala de la galaxia**

Distribución del gas:  
evidencia observacional de la estructura espiral  
evidencia de estructura espiral en otras galaxias  
Distribución estelar:  
distribución de las estrellas y de los elementos químicos en el disco, el bulbo y el halo galácticos  
Propiedades estructurales globales:  
el núcleo galáctico  
el bulbo  
el disco  
el halo

## 5. Dinámica estelar y galáctica

Ecuación de Boltzmann y teorema de Jeans

Ecuaciones de la hidrodinámica estelar (ecuaciones de momentos):

aplicaciones: relación entre la velocidad circular y la de rotación,  
fuerza vertical y densidad local, etc.

Teoría orbital. Potenciales de esferoides y discos. Modelos del potencial galáctico.

Orbitas individuales

Dinámica de la estructura espiral. Ondas de densidad

Dinámica de cúmulos estelares:

problemas de los N-cuerpos

teorema del virial

procesos dominantes y tiempos característicos: mezcla orbital, relajamiento,

disolución, ecuación de Fokker-Planck

últimas etapas evolutivas. Fricción dinámica, catástrofe gravotérmica, etc.

### TEXTOS

1. Binney, J. y Tremaine, S. "Galactic Dynamics" Princeton Series in Astrophysics, Princeton University Press, Princeton, 1987
2. Blaauw, A., y Schmidt, M. "Galactic Structure", Chicago University Press, Chicago, 1965
3. Gilmore, G., y Carswell, R. "The Galaxy" Dordrecht, Reidel, 1987
4. Gilmore, G., King, I., y Van Der Kuit, P. "The Milky Way as a Galaxy" University Science Books, Mill Valley, California, 1989
5. King, I. "Galactic Dynamics" San Francisco, 1996
6. Mihalas, D. y Binney, J. "Galactic Astronomy" Freeman, San Francisco, 1981
7. Ogorodnikov, K.F. "Dynamics of Stellar Systems" Pergamon, London, 1965
8. Saslaw, W. "Gravitational Physics of Stellar and Galactic Systems" Cambridge University Press, Cambridge, 1987
9. Spitzer, L. "Dynamical Evolution of Globular Clusters" Princeton University Press, Princeton, 1987
10. Van Woerden, H., Allen, R.J., y Burton, W.B. "The Milky Way Galaxy, Simp. 106, IAU" Dordrecht, Reidel, 1985

## **ASTRONOMIA EXTRAGALACTICA Y COSMOLOGIA OBSERVACIONAL**

Materia Optativa - Básica (10 créditos)

**OBJETIVOS:** Las galaxias son tema de síntesis astronómica donde confluyen las grandes escalas del Universo con las escalas galácticas e intragalácticas. En el tema convergen variadas ramas de la Astronomía: Cosmología, Medio Interestelar, Dinámica, Formación y Evolución de estrellas y Galaxias, Astrofísica de Altas Energías, etc. La filosofía del curso es cubrir muchos temas, no muy profundamente, para que el estudiante llegue a apreciar, entender y discutir los problemas actuales de astronomía extragaláctica y cosmología.

### **1. Características observacionales de las galaxias**

Clasificación morfológica. Diferentes esquemas  
Propiedades fotométricas y espectrales de las galaxias normales: magnitudes, colores, brillo superficial, distribución de intensidad, gradientes radiales, luminosidades absolutas, diámetros fotométricos. Espectros integrales.  
Poblaciones estelares y medio interestelar de los diferentes tipos morfológicos.  
Composición y evolución química.  
Propiedades de las galaxias en radio, infrarrojo, ultravioleta, rayos x y rayos gamma.  
Cinemática interna y rotación de las galaxias. Materia oscura  
Distribución espacial de las galaxias. Grupos y cúmulos de galaxias. Función de luminosidad  
Galaxias enanas y galaxias de bajo brillo superficial.

### **2. Física de las galaxias**

Dinámica de sistemas estelares  
Sistemas en equilibrio: cúmulos globulares, galaxias elípticas y discos galácticos.  
Determinación de masas y cocientes masa-luminosidad en galaxias elípticas y espirales.  
Materia oscura.  
Estructura espiral: teorías de ondas de densidad y teorías estocásticas.  
Galaxias barradas y galaxias irregulares  
Formación estelar y fenómenos hidrodinámicos del disco y el medio intragaláctico  
La conexión halo-disco: viento galáctico, fuentes y supercascarones  
Campos magnéticos de las galaxias  
Brotos de formación estelar

### **3. Galaxias peculiares y núcleos activos de galaxias**

Propiedades de los diferentes núcleos activos de galaxias.  
Distribución espectral de energía; mecanismos de generación de energía  
Galaxias huésped, entorno y actividad inducida  
El modelo unificado. Alternativas  
Implicaciones cosmológicas y evolución

### **4. Cúmulos galácticos y la estructura a gran escala del Universo**

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

Propiedades estructurales y dinámicas de los cúmulos de galaxias  
Interacción de las galaxias en los cúmulos. Fusiones de galaxias  
Medio intracúmulo. Mecanismos de calentamiento del gas intracúmulo y modelos dinámicos.  
Observaciones de rayos X  
Agrupamiento espacial de las galaxias, funciones de correlación  
Formación de la estructura a gran escala del Universo: observaciones y Simulaciones numéricas

### **5. Modelos cosmológicos estándares**

Ecuaciones de Einstein (introducción)  
Los modelos de Friedmann. Evidencias y necesidad de la gran explosión.  
Modelos sin gran explosión  
Historia térmica del Universo. Nucleosíntesis. Abundancias de He y D  
El modelo inflacionario. Predicciones. Espectro primordial.  
Cosmología y física de partículas  
Constante cosmológica  
Bariogénesis

### **6. Métodos de la cosmología observacional**

Confrontaciones de los modelos cosmológicos con las observaciones.  
Los parámetros cosmológicos  $H_0$ ,  $q_0$ ,  $W_0$ ,  $L$  y la edad del Universo.  
Determinación de distancias extragalácticas. Métodos por calibradores secundarios y métodos físicos  
Perturbaciones al flujo de Hubble y la determinación de  $H_0$  - La edad del Universo  
Determinación del parámetro  $q_0$   
Evolución espectral de las galaxias  
Determinación de la constante cosmológica. Lentes gravitacionales.  
Conteos de galaxias y funciones de correlación. Campos de velocidades.  
La radiación cósmica de fondo: medición e interpretación de sus anisotropías

### **7. Formación de estructuras en el Universo. La materia oscura**

Teoría lineal de las perturbaciones. Procesos disipativos de las materias bariónica y oscura  
Evolución no lineal de las perturbaciones. Modelos jerárquicos y modelos de fragmentación.  
Adquisición de momento angular  
Colapso gravitacional no disipativo. Formación de los halos galácticos y cúmulos de galaxias  
Colapso disipativo. Formación de las galaxias luminosas  
Objetos observables a altos corrimientos al rojo.

**TEXTOS**

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

1. Appenzeller, Y., Habing, H.J. y Lena, P. (eds) "Evolution of Galaxies. Astronomical Observations" Lecture Notes in Physics 333, Springer Verlag, Berlín, 1989
2. Blandford, R.D., Netzer, H., y Woltjer, L. "Active Galactic Nuclei", Springer-Verlag, Berlín, 1990
3. Gilmore, G., "The Milky Way as a Galaxy", Univ. Science Books, Mill Valley, Cal., 1990
4. Kolb, E.W., Turner, M.S. "The Early Universe" Addison Wesley Publishing Co., California, 1990
5. Linde, A.D., "Inflation and Quantum Cosmology", Academic Press. Inc., Boston, 1990
6. Ohanian, H.C., Ruffini, R. "Gravitation and Spacetime", Second Edition, W.W. Norton & Company, New York, 1994
7. Padmanabhan, T. "Structure Formation in the Universe, Cambridge Univ.Press., Cambridge, 1993
8. Peebles, P.J.E. "Physical Cosmology" Princeton Univ. Press., Princeton, 1993
9. Sandage, A., Sandage, M. y Kristina, J. "Galaxies and the Universe: Volume IX of Stars and Stellar Systems" Univ. of Chicago Press, Chicago, 1975
10. Tinsley, B.M. y Larson, R. "The Evolution of Galaxies and Stellar Populations", New Haven, Yale Univ. Printing Service, Yale, 1977
11. Vorontsov-Vel'yaminov, B.A., "Extragalactic Astronomy", Harwood Academic Publishers, Chur, Switzerland, 1987
12. Weinberg, S. "Gravitation and Cosmology", Wiley, New York, 1972

## **ASTRONOMIA OBSERVACIONAL**

Materia Optativa-Avanzada (6 créditos)

**OBJETIVOS:** Capacitar a los alumnos en las instrumentos, métodos y técnicas específicas de observación astronómica. Este es un curso teórico-práctico en el que se presentan los alcances y metas de cada técnica, y se apoya en la realización de prácticas específicas. Requiere una o varias prácticas observacionales en las instalaciones del Observatorio Astronómico Nacional en Tonantzintla, Puebla o en San Pedro Mártir, B.C.

### **1. Conceptos introductorios**

sistemas coordenados, triángulo esférico, ángulo horario, ángulo cenital, conversión de coordenadas  
refracción atmosférica  
tiempo solar, tiempo sideral, días julianos  
nomenclatura  
atlas y cartas en la biblioteca, atlas y cartas en la red

### **2. Conceptos generales**

placa fotográfica  
detectores electrónicos  
corrección de las imperfecciones del detector (campo plano, corriente oscura, determinación de constantes 'bias', etc)  
Elementos de estadística y análisis de errores

### **3. Fotometría óptica e infrarroja**

sistemas fotométricos de banda ancha y banda intermedia  
procedimientos de observación  
reducción de observaciones (extinción atmosférica, conversión a sistema estándar, etc.)  
paquetes de reducción IRAF  
aplicaciones astronómicas

### **4. Espectroscopía óptica e infrarroja**

espectrofotometría, determinación de velocidades radiales, interferometría Fabry-Perot, etc.  
técnicas de observación y reducción de observaciones  
aplicaciones astronómicas

### **5. Otras técnicas**

elementos de radioastronomía

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

### TEXTOS

1. Birney, D.S., "Observational Astronomy", Cambridge University Press, Cambridge, 1991
2. Henden, A.A. y Kaitchuck, R. H., "Astronomical Photometry", Van Nostrand, Nueva York, 1982
3. Kitchin, C.R., "Astrophysical Techniques", Adam Hilger Ltd, Bristol, 2a edición, 1991
4. Lena, P., "Observational Astrophysics", Springer Verlag, Heidelberg, 1988
5. Walker, G., "Astronomical Observations, An Optical Perspective" Cambridge University Press, Trowbridge, 1987

MATERIA OPTATIVA - AVANZADA (6 créditos)

**IV.2 RADIOASTRONOMIA**

**OBJETIVOS:** Introducir al estudiante a la investigación del Universo en ondas de radio. Esta introducción incluye una revisión de la física de los procesos más importantes de emisión en línea y continuo en ondas de radio, una presentación de los instrumentos y técnicas observacionales empleadas, así como el estudio de diversos objetos y fenómenos astronómicos.

**1. Introducción**

El espectro electromagnético  
Perspectiva histórica  
Transparencia de la atmósfera  
La ecuación de transporte en radio

**2. Radiotelescopios**

Resolución angular y criterio de Nyquist  
Receptores  
Espectrómetros  
La ecuación de radiómetro  
Detectabilidad de las fuentes de radio

**3. Procesos de radiación en continuo**

Radiación libre-libre  
Regiones HII, nebulosas planetarias, chorros térmicos  
Polarización y parámetros de Stokes  
Radiación sincrotrónica  
Remanentes de supernova, estrellas masivas

**4. Procesos de radiación en línea**

Línea de HI en 21-cm: física atómica básicas  
Cinemática de galaxias espirales  
Determinación de parámetros a partir de líneas de recombinación  
Regiones HII ultracompactas

**5. Interferometría**

Principios básicos  
Transformada de Fourier  
Coherencia de fase atmosférica  
Síntesis de apertura

**6. Máseres**

Física básica  
Estrellas jóvenes  
Variables tardías  
Máseres extragalácticos  
MWC 349

**7. Pulsares y otros objetos compactos**

Física básica de los pulsares  
Estrellas de neutrones  
Sistemas binarios en radio

**8. El centro de nuestra galaxia**

Revisión histórica  
Sgr A W y Sgr A  
Otras fuentes

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

Núcleos activos de galaxias

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

### 9. Radiogalaxias y cuasares

- Conceptos básicos
- Clasificación morfológica
- Energética
- Expansiones superlumínicas en cuasares y sistemas binarios galácticos

### 10. Cosmología

- Radiación fósil a 3 K
- Conteos de fuentes de radio
- Galaxias muy jóvenes

### 11. Otras aplicaciones de la radioastronomía

- Radioastronomía solar y planetaria
- Radarastronomía
- Geodesia y astrometría
- Búsqueda de vida inteligente en el Universo

## TEXTOS

- Christiansen, W.N., y Hogbom, J.A. "Radio Telescopes" Cambridge University Press, Cambridge, 1985
- Elitzur, M. "Astronomical Masers" Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992
- Kraus, J.D. "Radio Astronomy" Second Edition, Cygnus-Quasar Books, Powell Ohio, 1986
- Lyne, A.G. y Graham-Smith, F. "Pulsar Astronomy" Cambridge University Press, Cambridge, 1990
- Pacholczyk, A.G. "Radio Astrophysics" Freeman, San Francisco, 1970
- Perley, R.A., Schwab, F.C., y Bridle, A.H. "Synthesis Imaging in Radio Astronomy", ASP, Conferences Series, Vol. 6, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, 1989
- Rohlfs, K. "Tools of Radio Astronomy" , Springer-Verlag, Berlin, 1990
- Thompson, A.M., Moran, J.M., y Swenson, G.W. "Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy" Wiley, New York, 1986
- Verschuur, G.L., y Kellermann, K.I. "Galactic and Extragalactic Radio Astronomy" Second Edition, Springer-Verlag, Berlín, 1988
- Verschuur, G.L. "The Invisible Universe Revealed" Springer-Verlag, Berlín, 1987

### IV.3 ASTRONOMIA INFRARROJA

**OBJETIVOS:** Presentar una visión del impacto de las observaciones en el infrarrojo sobre nuestro conocimiento del Universo.

#### 1. Formación estelar

Formación estelar y la astronomía infrarroja:

- el IRAS y la formación estelar

- clasificación en IR

- modos y distribución de la formación estelar

Formación estelar aislada:

- colapso protoestelar y tasa de acreción

- evolución protoestelar

Evolución estelar temprana:

- evolución presecuencia principal

- efectos de acreción presecuencia principal

- propiedades infrarrojas de las estrellas presecuencia principal

Formación estelar colectiva

- observaciones en el creceno IR de cúmulos embebidos

- función de luminosidad bolométrica

#### 2. Estados tardíos de evolución estelar

Evolución teórica:

- pulsaciones térmicas de las estrellas en la rama asintótica de las gigantes

- enriquecimiento de helio, nitrógeno y carbón

- relación masa luminosidad para la componente nuclear

- evolución después de la rama sintótica

Observaciones:

- las gigantes frías

- las variables Mira

- las estrellas OH/IR

Evolución de la rama asintótica a la fase de nebulosa planetaria:

- diagrama IRAS color-color

- objetos que sugieren ser postrama asintótica

- supergigantes y planetarias jóvenes

Nebulosas planetarias:

- distribución espacial y cinemáticas

- distancias

- temperaturas centrales

- luminosidades de las estrellas centrales

- número y tasa de formación de nebulosas planetarias en la Galaxia

Transición a estrellas enanas blancas

#### 3. Medio interestelar en el IR

Hidrógeno molecular

- excitación por fluorescencia

- excitación por choques

Polvo en el MIE:

- teorías de formación

- extinción de la luz estelar

- polarización interestelar

Modelos de polvo

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

modelos de hielo  
modelos de grafito  
silicatos  
modelos de tres componentes  
Otras moléculas en el MIE

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

### 4. **La vía láctea y el centro galáctico**

Estructura galáctica:

bulbo central y bulbo principal

halo

disco grueso y delgado

Bulbo galáctico:

resultado del IRAS

¿Hay una barra en el bulbo?

El centro galáctico:

equilibrio de energía

formación estelar en el centro

el gran aniquilador

Sagitario A

Estrellas de baja masa:

enanas cafés

densidad de masa en la vecindad solar

el potencial galáctico

modelos para la función de luminosidad

### 5. **Galaxias en el IR**

• Emisión extragaláctica IR:

líneas de emisión del gas

líneas de emisión del polvo

emisión de las estrellas

Galaxias inactivas

Galaxias con brotes recientes de formación estelar:

observaciones en el IR

condiciones físicas

causas

Núcleos activos de galaxias y cuasares

### 6. **Instrumentación en el infrarrojo**

• La banda IR

IR, cercano, intermedio y lejano

extinción atmosférica y ventanas

fuentes de la radiación de fondo

emisión OH

emisión térmica

Tecnología de los detectores:

detectores de fotones, detectores térmicos y arreglos IR

Arreglos IR (principios básicos):

materiales sensibles al IR

estructuras híbridas, comparación con los CCD

propiedades de los arreglos IR

cálculo de la señal a ruido

### 7. **Técnicas de observación en el IR**

Imagen directa y fotometría

Espectroscopía

## TEXTOS

Black, J.H., Astrophysical Journal, Vol. 322. p. 412. Chicago, 1987

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

Draine, B.T., Roberge, W.G., Dalgarno, A., *Astrophysical Journal*, Vol. 264, p. 485, Chicago, 1983

Kwan, J., *Astrophysical Journal*, Vol. 216, p. 713, Chicago, 1977

4. Mampaso, A., Prieto, M., Sánchez, F., "Infrared Astronomy" Cambridge University Press. *Astronomical Infrared Spectroscopy*, De. Sun Kwan, Astron. Soc. Pacific, Cambridge, 1993

MATERIA OPTATIVA-AVANZADA (6 créditos)

**IV.4 INSTRUMENTACION ASTRONOMICA**

**OBJETIVOS:** Introducir al estudiante los instrumentos astronómicos contemporáneos, familiarizándolos con sus componentes (ópticas, mecánicas, electrónicas) básicas que lo conforman. Se analizan el funcionamiento y los protocolos de operación y se realizan algunos experimentos o demostraciones en los laboratorios y en el Observatorio para ejercitar/reafirmar algunos temas.

**1. El telescopio, el instrumento principal**

Evolución histórica  
Optica de telescopios  
Relaciones opticas fundamentales  
Viñeteo y aberraciones en el plano focal

**2. Telescopios de nueva tecnología**

Espejos ligeros de gran tamaño  
Materiales y manufactura  
Pruebas opticas durante el pulido  
Suspensión activa (Optica Activa primera parte)  
Monturas y diseño mecánico  
Movimiento del telescopio  
Sistema de control (consola)

**3. Guiadores excéntricos**

Tipos de guiador y su funcionamiento  
Adquisidores de campo  
Autoguiado  
Tipo de sensores de frente de onda (Optica Activa segunda parte)

**4. Detectores para la astronomía**

Materia y radiación. Respuesta espectral  
Detectores cuánticos. Características  
Eficiencia, linealidad, ruido e intervalo dinámico  
Detección de imágenes en el visible  
Detección de imágenes en el infrarrojo  
Necesidad de procesamiento (paquetes de reducción)

**5. Instrumentos astronómicos (visible e infrarrojo)**

Fotómetro bidimensional  
Espectrógrafos de rejilla  
Multi-rendija vs Fibras opticas  
Espectrógrafos Echelle  
Interferometría Fabry Perot y M.F.  
Polarimetría

**6. Optica activa (tercera parte) y Optica adaptiva**

Aberraciones del frente de onda y límite impuesto por difracción  
Modelo de turbulencia atmosférica  
Aproximación a la reconstrucción del frente de onda  
Espejos deformables. Actuadores piezo-resistivos  
Limitaciones de los sistemas adaptivos  
Perspectivas de la observación terrestre

**TEXTOS**

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

Alloin, D.M., Mariotti, J.M. ed. "Adaptive Optics for Astronomy" Mat & Ph. Sc. Vol. 423, Dordrecht, 1993  
Crawford, D.L. eds. "Instrumentation in Astronomy VIII", SPIE Proc., Vol. 2198, Bellingham, 1994  
England, E.E.V. "CCD Imaging", Technical Notes, 1983  
McLean I.S. "Electronic and Computer Aided Astronomy, From Eyes to Electronic Sensores", Ellis Horwood, Chichester, 1989  
Schroeder, D.J. "Astronomical Optics" Academic Press, San Diego, 1987 SPIE Proceeding, etc. 1986-1994  
Vicent, J.D. "Fundamentals of Infrared Detector Operation and Testing", John Wiley, New York, 1990

### MATERIA OPTATIVA-AVANZADA (6 créditos)

#### IV.5 LA FISICA DE LA ASTROFISICA

**OBJETIVOS:** Presentar al estudiante una visión unitaria de los conceptos teóricos usados en la astrofísica moderna. Para ello se emplea la Ecuación de Boltzmann como elemento unificador que nos permite describir de manera genérica el flujo de un fluido cualquiera y se deducirán y estudiarán las ecuaciones de la hidrodinámica, dinámica estelar, de transporte radiativo y de estructura estelar como aplicaciones particulares de la Ecuación de Boltzmann.

##### 1. La Ecuación de Boltzmann

Introducción  
Significado físico  
Diversas formas de la Ecuación de Boltzmann  
El término colisional  
La funcional H de Boltzmann y la flecha del tiempo  
La distribución de Maxwell-Boltzmann como atractor dinámico  
El método de momentos

##### 2. Hidrodinámica

Las relaciones de cerradura a orden cero  
Las ecuaciones de la hidrodinámica no viscosa  
Aplicaciones de las ecuaciones sin viscosidad:  
a) El Teorema de Bernoulli  
b) El Teorema de circulación de Kelvin  
c) La tobera de La Val y la aceleración de chorros  
d) El problema de Bondi y la acreción esférica de gas  
Las relaciones de cerradura a primer orden  
Las ecuaciones de la hidrodinámica viscosa  
Aplicaciones de las ecuaciones con viscosidad  
a) Flujo de un fluido viscoso ante una esfera sólida  
b) El método de relajamiento Gauss-Seldei aplicado a la solución numérica de la ecuación de Navier-Stokes

##### 3. Dinámica estelar

La Ecuación de Boltzmann aplicada a un fluido Hamiltoniano no colisional  
El Teorema de Jeans y las integrales aislantes de movimiento

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

El método de momentos y las ecuaciones de Jeans

Aplicaciones de las ecuaciones de la dinámica estelar:

- a) El límite de Oort y la densidad de la vecindad solar
- b) Modelos dinámicos isotrópicos: las esferas isotérmicas politrópicas
- c) Las constantes de Oort y la rotación diferencial de la Galaxia

### 4. Transporte radiativo

La Ecuación de Boltzmann aplicada a un fluido de fotones

La intensidad específica como función de la distribución de densidad en espacio fase

La ecuación de transporte radiativo como la Ecuación de Boltzmann en términos de la intensidad específica

Los coeficientes A y B de Einstein

La distribución de Planck como la distribución de un gas de fotones en equilibrio térmico con un gas de partículas.

Los coeficientes de absorción, emisión y la función fuente Ejemplos de la ecuación de transporte radiativo:

- a) Absorción de un medio no emisor y la ley de extinción interestelar
- b) Transporte de radiación por un medio que absorbe y emite

### 5. Estructura estelar

El método de momentos aplicado a la ecuación de transporte radiativo.

Las ecuaciones de la estructura estelar como las ecuaciones de momentos de la ecuación de

transporte y la hidrodinámica no viscosa.

Aplicaciones de las ecuaciones de la estructura estela:

- a) Qué es la secuencia principal?
- b) Qué define los límites superior e inferior de la secuencia principal?
- c) Por qué se expanden las estrellas gigantes rojas?
- d) Por qué pulsan las Cefeidas?

## TEXTOS

Huang, K. "Statistical Mechanics", J. Willey, New York, 1963

Shu, F. "Gas Dynamics The Physics of Astrophysics", V Vol. 2. University Science Books, Mill Valley, California, 1992.

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

MATERIA OPTATIVA-AVANZADA (6 créditos)

## IV.6 ESTRELLAS VARIABLES

**OBJETIVOS:** Conocer los distintos tipos de estrellas variables, su importancia en el estudio de los interiores y atmósferas estelares y para la calibración de distancias en el Universo. Establecer relaciones con la estructura de la galaxia, el material interestelar y los sistemas extragalácticos.

### 1. Antecedentes históricos

### 2. Técnicas de detección:

Detección fotográfica, placa fotográfica, técnicas observacionales

Detección fotométrica, sistemas fotométricos, fotómetros, técnicas de observación

Detección con CCD, cómo funciona el CCD, reducción de los datos

### 3. Clasificación de las variables por las siguientes características observables

Períodos característicos

Tipos espectrales en variables

Amplitudes de pulsación

Población de las variables y su distribución en la galaxia

Composición química y cinemática de las variables

#### 3.1 Estrellas eclipsantes

Determinación de masas

Estrellas binarias en contacto, variaciones seculares y su análisis en la determinación de transferencia de masa.

#### 3.2 Estrellas variables intrínsecas de distintos tipos

$\beta$  cefeidas

Cefeidas enanas

RR de Lira

$\delta$  Cep

$RV_{\lambda}$

Semirregulares e irregulares

R Cr B

Mira

LBV's

WR's

### 4. Estudio de los mecanismos de pulsación

Estudio de la física de los mecanismos de pulsación y sus condiciones en Cefeidas, RR de Lira y Cefeidas enanas.

Métodos de determinación de frecuencias

### 5. Variables eruptivas

Estrellas en pre-secuencia principal y estrellas ráfaga

Fenómenos circumstelares, cromosféricos y fotosféricos

Estrellas novas

Supernovas

### 6. Calibraciones de distancias

En la vecindad solar

En la galaxia

En sistemas extragalácticos

**TEXTOS**

- Balona, I.A., Henrich, H.F., & Lecontel, J.M. "*Pulsation, Rotation and Mass Loss in Early Type Stars*" IAU Symp. 162.  
Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993.
- Brillinger, D.R., "*Time Series*" Holden Inc., San Francisco, 1981.
- Cox, A. "*Pulsating Stars*" Rep. Prog. Phys. 37, 563, 1974.
- Henden, A.A., & Kaitchkuk, R.H. "*Astronomical Photometry*" Willamnn  
Bell Inc., Richmond, 1982.
- Hill, H.A., & Dziembowski, W.A. "*Nonradial and Nonlinear Stellar Pulsation*", Springer-  
Verlad, New York, 1979
- Kholopov, P.N., "General Catalogue of Variable Stars", Nauka, Moscú, 1985.
- Madore, B.F., "*Cepheids IAU Colloquium 82*", Cambridge University Press, Cambridge,  
1985.
- Payne-Gaposchkin, C. "*Stars and Clusters*" , Harvard University Press, Cambridge, 1979
- Percival, D.B., Walden, A.T., "Spectral Analysis for Physical Applications",  
Cambridge University Press, Cambridge, 1993
- Schaffer, A.W., "*Interacting Binary Stars*" ASP Conference Series Vol. 56, Astronomical  
Society of the Pacific,  
San Francisco
- Schmidt, E.G., "The Use of Pulsating Stars in Fundamental Problems in Astronomy"  
Cambridge University Press, Cambridge, 1989
- Stobie, R.S.& Whitelock, P.A. "*Astrophysical Applications of Stellar Pulsation*"  
ASP Conference Series Vol. 83, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, 1995
- Strohmeier, W. "*Variable Stars*" Pergamon Press, Oxford, 1972
- Warner, B. "*High Speed Photometry*" Cambridge University. Press. Cambridge 1988

## IV.7 PULSARES Y ESTRELLAS DE NEUTRONES

**OBJETIVOS:** Presentar una introducción a los datos observacionales sobre estrellas de neutrones, desde radio hasta rayos  $\gamma$ . Describir los modelos teóricos desarrollados para interpretar estos datos. Se consideran tanto estrellas de neutrones aisladas como en sistemas binarios y se estudian su estructura interior y magnetósfera.

### 1. Introducción histórica

Las predicciones históricas: Landau (1931), Baade-Zwicky (1934), Oppenheimer-Volkov (1939)

1962: fuentes compactas de rayos X

1967: descubrimiento de los pulsares en radio

1975: descubrimiento del primer pulsar binario (Hulse y Taylor)

1982: descubrimiento del primer pulsar de milisegundos

Pulsares en altas energías: rayos gamma y rayos X

### 2. Los pulsares en radio

Detección de pulsares

Las búsquedas sistemáticas ("surveys")

Características del perfil integrado

Características del perfil individual

Modelo del cono vacío y el modelo vectorial

Procesos de emisión en radio

Estadística de las propiedades de los pulsares en radio

Estadística de la evolución de los pulsares en radio

Evolución del campo magnético de los pulsares

Asociación pulsar-remanente de supernova

### 3. Estructura de las estrellas de neutrones

La ecuación de estado

    régimen subnuclear

    régimen supranuclear

Estrellas de quarks

Superfluidez en estrellas de neutrones

Mecanismos de evolución térmica

### 4. Sideramotos en pulsares

Datos observacionales y estadísticas

Modelos de origen cortical

Modelos de origen central

### 5. Emisión de altas energías de pulsares aislados

Los pulsares en rayos gamma

    datos observacionales

    modelo de emisión de "outer gap"

    modelo de emisión de casquetes polares

Los pulsares en rayos X

Datos observacionales

Emisión magnetosférica

Emisión térmica de la superficie

### 6. Las estrellas binarias en rayos X

Estrellas binarias que emiten rayos X de mucha y poca masa:

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

- observaciones en el visible
- determinaciones del periodo de rotación
- pulsares de rayos X
- oscilaciones cuasi periódicas (QPO)

Candidatos a agujeros negros:

- masa máxima de una estrella de neutrones
- candidatos a estrellas colapsadas
- características espectrales

Variables cataclísmicas

### **7. Evolución de estrellas en sistemas binarios cercanos**

Superficies equipotenciales (lóbulos de Roche)

Transferencia de masa y evolución orbital

Pérdida de masa:

- estrellas tipo Be

- viento estelar

- "overflow" del lóbulo de Roche: estabilidad y diferencia entre binarias de mucha y poca masa.

Radio crítico:

- envolvente radiativa o convectiva

Evolución de la estrella con pérdida de masa

### **8. El proceso de acreción**

Acreción sin campo magnético (agujeros negros y enanas blancas no magnéticas)

Acreción con campo magnético (estrellas de neutrones y enanas blancas magnéticas)

La fase de "spiral-in" y objetos de Thorne-Zytkow

Acreción supercrítica:

- acreción supercrítica en sistemas binarios

- acreción en supernovas y SN 1987A, formación de agujeros negros de masa

estelar

### **9. El destino del material acretado**

Pulsares en rayos X :

- combustión continua del material acretado

Emisión súbita de rayos X :

- acreción con campo magnético bajo

Explosiones termonucleares en enanas blancas:

- el mecanismo de nova

Supernovas de tipo I y colapso inducido por acreción

### **10. Escenarios evolutivos**

El origen de las binarias de rayos X de baja masa:

- los pulsares de milisegundos

Las binarias de rayos X de gran masa y los pulsares binarios

Pulsares en cúmulos globulares

Evolución del campo magnético de los pulsares:

- decaimiento del campo magnético por acreción

### **11. Los pulsares binarios: laboratorios para la relatividad general**

### **12. Binarias de rayos X en otras galaxias**

### **13. Los sobresaltos de rayos gamma**

Datos observacionales

Modelos locales vs. Modelos cosmológicos

Escenarios de emisión de sobresaltos gamma por estrellas de neutrones

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

### TEXTOS

- Alpar, M.A., Kiziliglu, U., y Van Paradijs, J. "The lives of the Neutron Stars" Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995
- Lewin, W.H.G., Van Paradijs, J., Van Den Heuvel, E. "X-ray Binaries" Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995
- Lipunov, V. M. "Astrophysics of Neutron Stars" Springer, Berlin, 1992
- Lyne A.G., y Graham-Smith, F. "Pulsar Astronomy" Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1990.
- Michel, F. C. "Theory of Neutron Star Magnetospheres" Chicago Univ. Press, Chicago, 1991.
- Shapiro, S.L. y Teukolsky, S.A. "Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars" Wiley-Interscience, New York, 1983.
- Ventura, J. y Pines, D. "Neutron Stars: Theory and Observation", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.

#### IV.8 DINAMICA DE GASES EN EL MEDIO INTERESTELAR

**OBJETIVOS:** Proporcionar la base teórica para el estudio hidrodinámico de los gases interestelares

##### 1. Ecuaciones Básicas

- Descripción Euleriana y Lagrangiana
- Ecuaciones de Euler y de Navier-Stokes
- Teorema de Bernoulli
- Linealización y ondas de sonido
- Ecuaciones autosimilares

##### 2. Discontinuidades

- Ondas de choque
- Choques isotérmicos
- Discontinuidad de contacto
- Ondas de rarefacción
- Frentes de ionización

##### 3. Inestabilidades

- Inestabilidad convectiva
- Inestabilidad de Rayleigh-Taylor
- Inestabilidad de Kelvin-Helmholtz
- Inestabilidad gravitacional (Jeans)
- Inestabilidades térmicas

##### 4. Flujos en el Medio Interestelar

- Expansión de regiones HII
- Vientos estelares: generación y interacción con el MI
- Remanentes de supernova
- Jets
- El Medio Interestelar a gran escala
- Colapso gravitacional y formación estelar
- Discos de acreción
- Formación de líneas, aproximación de Sobolev

##### 5. Turbulencia

- Análisis dimensional y espectro de Kolmogorov
- Propiedades de conservación y cascadas turbulentas
- Ecuaciones en el espacio de Fourier
- Problema de cerradura y modelos estocásticos
- Tensiones de Reynolds, parametrizaciones de la turbulencia
- Capas de mezcla
- Modelo de Lorenz
- Estructura turbulenta de nubes moleculares
- Turbulencia supersónica

##### 6. Magnetohidrodinámica

- Ecuaciones básicas
- Campos congelados
- Ondas hidromagnéticas
- Ondas de choque y discontinuidades rotacionales
- Configuraciones "force-free"
- Difusión ambipolar y nubes cuasiestáticas

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

Inestabilidad de Parker y discos galácticos  
Dínamos  
Turbulencia magnetohidrodinámica

### ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

#### 7. Métodos Numéricos

Diferencias finitas: métodos explícitos e implícitos  
Criterio de Courant  
Métodos de primer y segundo orden  
Viscosidad de Von Neumann  
Diferencias "upwind"  
Métodos de Godunov y problemas de Riemann  
Métodos espectrales

#### TEXTOS

Landau y Lifshitz, "Fluid Mechanics", 2ª Edición, 1987, Pergamon, Oxford.  
Courant y Friedrichs, "Supersonic Flow and Shock Waves", 1948, Interscience, New York.  
Sedov, "Similarity and Dimensional Methods in Mechanics", 1959, Academic Press, New York.  
Shore, "Astrophysical Hydrodynamics", 1992, Academic Press, San Diego.  
Shu, "The Physics of Astrophysics", Vol. II, University Science Books, Mill Valley  
Chandrasekhar, "Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability", 1961, Clarendon Press, Oxford.  
Drazin & Reid, "Hydrodynamic Stability", 1981, Cambridge University Press, Cambridge.  
Batchelor, "The Theory of Homogeneous Turbulence", 1953, Cambridge University Press, Cambridge.  
Monin y Yaglom, "Statistical Fluid Mechanics", 1971, MIT Press, Cambridge, Mass.  
Cowling, "Magnetohydrodynamics", 1957, Interscience, New York.  
Parker, "Cosmical Magnetic Fields", 1979, Oxford University Press, New York.  
Anderson, Tannehill y Pletcher, "Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer", 1984, McGraw Hill, Washington  
Manzini, Ticca y Zanetti, "Numerical Methods for 1D Compressible Flows: An Interactive Book",

[http://www.crs4.it/HTML/int\\\_book/NumericalMethods/int\\\_book.html](http://www.crs4.it/HTML/int\_book/NumericalMethods/int\_book.html)

#### IV.9 EVOLUCION QUIMICA DEL UNIVERSO

**OBJETIVOS:** Conocer los patrones de abundancias observados en las estrellas y en el medio interestelar. Comprender los procesos estelares y galácticos que dan origen a las abundancias químicas observadas. Inferir las abundancias químicas iniciales del Universo y estudiar sus implicaciones. Profundizar en los temas actuales sobre la evolución química de nuestra galaxia y otras galaxias.

##### 1. Abundancias en estrellas y nebulosas gaseosas

Nucleosíntesis estelar

Abundancias estelares

Abundancias en regiones HII

Abundancias en nebulosas planetarias

Abundancias en remanentes de supernovas

2. Evolución química en diferentes tipos de galaxias

Restricciones observacionales

Formación de estrellas

Modelos analíticos y numéricos

Problemas abiertos

3. Cosmología

Restricciones observacionales (H,  $2^{\text{H}}$ ,  $3^{\text{H}}$  e,  $4^{\text{H}}$  e,  $7^{\text{L}}$  i,  $9^{\text{B}}$  e, B)

Nucleosíntesis

Implicaciones cosmológicas

#### TEXTOS

Crane, P. "The Light Element Abundances", Springer-Verlag, BerlínHeidelberg, 1995

Kolb, E.W., Turner, M.S., y Wesley, A. "The Early Universe", Addison-Wesley Publishing Company, California, 1994

Matteucci, F. "ASP Conf. Ser. 20, Frontiers of Stellar Evolution" p.539, ed. Lambert, D.L., Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, 1991

Osterbrock, D.D. "Astrophysical of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei", University Science Books, Mill Valley, 1989

Rana, N.C., "Annual Review of Astronomy and Astrophysics", Vol. 29, 129, Annual Reviews Inc., Palo Alto, 1991

Tinsley, B "Fundamental Cosmic Physics", Vol. 5, 287, Gordon and Breach Science Publishers, London, 1980

#### **IV.10 COSMOLOGIA FISICA**

**OBJETIVOS:** Profundizar en la teoría y los problemas actuales de la Cosmología. Dominar los conceptos básicos de relatividad general y de ahí construir el modelo cosmológico estándar, confrontándolo con los modelos alternativos. Deducir las predicciones a cerca de las propiedades del Universo y de las estructuras que hay en él y compararlas con las observaciones. Establecer y discutir los problemas actuales de la cosmología, con sus posibles soluciones. Obtener un panorama conceptual de las teorías físicas del Universo muy temprano.

##### **1. Relatividad General**

Tensores  
Variedades riemannianas  
Leyes de la física en relatividad general  
Ecuaciones del campo gravitacional

##### **2. Modelos de Friedmann**

Cosmología newtoniana  
Universo de Einstein  
Universo de de-Sitter  
Modelos de Friedmann  
Homogeneidad e isotropía del espacio. Fractales

##### **3. Determinación de los parámetros cosmológicos**

Cosmografía. Conteo de fuentes luminosas  
La constante de Hubble y la edad del Universo  
Los parámetros de desaceleración y de densidad. Campos de velocidades  
La constante cosmológica

##### **4. Historia térmica del Universo**

La época del desacoplamiento. Radiación cósmica de fondo. Anisotropías.  
La época de la materia y la época de la radiación  
Historia temprana del Universo. Funciones de distribución

##### **5. Nucleosíntesis**

Abundancias de neutrones en función de la temperatura  
Síntesis de los elementos ligeros  
Abundancia del helio  
Comparación con las observaciones

##### **6. El Universo muy temprano**

Cosmología y partículas elementales. Teorías de la gran unificación. Supersimetría, supercuerdas  
Modelos inflacionarios  
Origen de las fluctuaciones en densidad y su distribución estadística  
Bariogénesis  
Constante cosmológica  
Cosmología cuántica  
Modelos cosmológicos alternativos

##### **7. Formación de estructuras**

Fluctuaciones de curvatura y de isocurvatura  
Evolución lineal de las fluctuaciones. Inestabilidad de Jeans y aproximación newtoniana  
Teoría relativística de fluctuaciones  
Procesos disipativos de la materia no colisional (oscura) y de la materia colisional (bariónica)

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

Los modelos de materia oscura  
Procesamiento del espectro de potencias de las fluctuaciones  
Simulaciones numéricas (modelos CDM, C-HDM, L+CDM)  
La estructura a gran escala del Universo. Funciones de correlación, topología  
Pruebas de gaussianidad

### **8. Formación de galaxias**

Evolución no lineal de las fluctuaciones: la aproximación del modelo del colapso esférico y la aproximación de Zel'dovich. El formalismo de Press-Schechter  
Colapso gravitacional no disipativo. Formación de los halos galácticos y cúmulos de galaxias  
Adquisición de momento angular  
Colapso disipativo y la formación de las galaxias luminosas  
Restricciones de la formación y evolución de galaxias a las condiciones cosmológicas primordiales

## TEXTOS

Dolgov, A.D., Sazhin, M.V., Zeldovich, Ya. Bo. "Modern Cosmology", Eds. Frontiers, Gif-Sur-Yvette, France, 1990  
Kolb, E.W. y Turner, M.S. "The Early Universe", Addison Wesley Publishing Company, New York, 1990  
Linde, A.D. "Particle Physics and Inflationary Cosmology", Harwood Academic Publishers, Switzerland, 1990  
Ohanian, H.C., Ruffini, R. "Gravitation and Spacetime", 2nd. Ed. W.W., North & Company, New York, 1994  
Padmanabhan, T. "Structure Formation in the Universe" Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1993  
Peebles, P.J.E. "Physical Cosmology" Princeton Univ. Press, Princeton, 1993  
Weinberg, S. "Gravitation and Cosmology", Wiley, New York, 1972

MATERIA OPTATIVA - AVANZADA (6 créditos)

**IV.11 ASTROFISICA RELATIVISTA**

**OBJETIVOS:** Estudiar los sistemas estelares y las propiedades del Universo dentro del contexto de la teoría de la relatividad.

- 1. Repaso de relatividad especial y general**  
Relatividad especial. Principios básicos  
Tensores de energía-momento
- 2. Relatividad**  
Conceptos fundamentales de la relatividad general  
Espacios de Riemann  
Ecuaciones de Einstein
- 3. Campo gravitacional con simetría esférica**  
Métrica de Schwarzschild  
Movimiento de partículas en un espacio de Schwarzschild Coordenadas de Kruskal  
Colapso gravitacional de materia sin presión  
Ecuaciones relativistas para el interior de una estrella
- 4. Enanas blancas y estrellas de neutrones**  
Ecuación de estado de la materia degenerada  
Límite de Chandrasekhar  
Límite de Oppenheimer-Volkov  
Pulsares
- 5. Colapso gravitacional y hoyos negros**  
Campo gravitacional de un hoyo negro  
Etapas últimas de la evolución estelar  
Métrica de Kerr sin carga y con carga  
Efecto Hawkings y "termodinámica" de hoyos negros  
Singularidades
- 6. Hoyos negros en el Universo**  
Acreción esféricamente simétrica  
Discos de acreción  
Hoyos negros en sistemas binarios  
Hoyos negros gigantes en galaxias
- 7. Radiación gravitacional**  
Principios básicos  
Emisión y detección  
Pulsares binarios
- 8. Lentes gravitacionales**  
Lentes extragalácticas  
Microlentes  
Materia oscura

**TEXTOS**

- Demianski, M. "Relativistic Astrophysics", Pergamon Press., Oxford, 1985  
Kips, T. "Block Holes and Time Warps", W.W. Norton & Company, NewYork, 1994

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

Misner, Ch.W., Thoren, K.S. y Wheeler, J.A. "Gravitation", Freeman & Company, San Francisco, 1973

Ohanian, H.C., y Ruffini, R. "Gravitation and Spacetime" Second Edition, W.W. Norton & Company, New York, 1994

Zel'dovich, Ya., B., y Novikov, I.D. "Relativistic Astrophysics, Vol. 1, Stars and Stellar Systems" University of Chicago Press, Chicago, 1974

Zel'dovich, Ya., B., y Novikoc, I.D. "Relativistic Astrophysics, Vol. The Structure and Evolution of the Universe" Univ. of Chicago Press, Chicago, 1983

Weinberg, S. "Gravitation and Cosmology" Wiley, New York, 1972

## MATERIA OPTATIVA AVANZADA (6 créditos)

### IV.12 SEMINARIO DE INVESTIGACION II

### IV.13 SEMINARIO DE INVESTIGACION III

### IV.14 SEMINARIO DE INVESTIGACION IV

**OBJETIVOS:** Poner en contacto a cada alumno con la actividad de investigación. Estas actividades académicas son diferentes a los cursos tradicionales pues incorporan al estudiante en un proyecto de investigación que se esté realizando. El estudiante participará durante el semestre en las actividades múltiples que requiera el proyecto de investigación. Esta actividad tiene una enorme capacidad formativa, al poner al alumno en la situación de buscar soluciones originales a problemas astronómicos utilizando el método científico aunado a las técnicas que está aprendiendo. El trabajo diario junto a un investigador experimentado es un método docente formativo-informativo extremadamente completo.

Esta actividad es muy variada y tiene muy diversas facetas, por lo que no se puede establecer un programa fijo ni TEXTOS. Sin embargo se pueden establecer normas para cumplir este requisito:

1. Al principio del semestre se deberá presentar por escrito a la Comisión Académica el plan de trabajo detallado para esta actividad. Este plan de trabajo deberá contar con la aprobación del profesor que dirija la actividad.
2. Es el trabajo que el alumno realiza como parte de su formación participando en un proyecto incorporado a un grupo de investigación, dirigido por un investigador experimentado. Puede incluir varias actividades distintas ya que es fundamentalmente la introducción a toda la gama de tareas involucradas en la investigación misma: lectura de TEXTOS básicos, revisión de artículos para informarse de los resultados más recientes, realización de observaciones, reducción de datos, elaboración de programas de cómputo, desarrollo de cálculos, redacción de TEXTOS de presentación de la investigación, etc.
3. Estas actividades serán acreditadas mediante el trabajo continuado, entrevistas periódicas con el profesor que dirija la investigación y un reporte por escrito al final del semestre.
4. La calificación de este curso será ACREDITADO/NO ACREDITADO.
5. Se espera que el alumno le dedique 10 horas a la semana.
6. No se autorizará inscripción simultánea a las materias Seminario de Investigación I, II, III ó IV, ya que por la naturaleza de las actividades se desea que éstas sean cursadas en semestres distintos.

## ANEXO D. TEMARIO DE CURSOS

### MATERIA OPTATIVA AVANZADA (6 créditos)

**IV.15 Problemas contemporáneos de estructura y evolución estelar**

**IV.16 Problemas contemporáneos de atmósferas estelares**

**IV.17 Problemas contemporáneos de materia interestelar**

**IV.18 Problemas contemporáneos de estructura galáctica y dinámica estelar**

**IV.19 Problemas contemporáneos de astronomía extragaláctica y cosmología**

**IV.20 Temas selectos de la astrofísica**

**OBJETIVOS:** Son cursos formales que tienen como objetivo la revisión y discusión crítica de la frontera del conocimiento en temas específicos de las distintas ramas de la astronomía. En el caso que los temas traten de varias ramas el nombre del curso será "Temas selectos de astrofísica".

Los programas de los temas serán revisados y en su caso, aprobados por el Comité Académico.