UNIVERSITÀ DI PISA

ASTROFISICA GENERALE

PIER GIORGIO PRADA MORONI

Anno accademico	2022/23
CdS	FISICA
Codice	288BB
CFU	6

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
ASTROFISICA GENERALE	FIS/05	LEZIONI	48	PIER GIORGIO PRADA MORONI

Obiettivi di apprendimento

Conoscenze
L'obiettivo del corso è fornire agli studenti del Corso di Laurea Triennale in Fisica le conoscenze di base dell'astronomia e dell'astrofisica moderne. Il corso fornisce inoltre agli studenti l'opportunità di approfondire le conoscenze di base in fisica acquisite durante il Corso di Laurea Triennale e di applicarle in contesti astronomici.

Modalità di verifica delle conoscenze
Il livello delle conoscenze acquisite e l'abilità nell'esporle con proprietà di linguaggio sarà valutato mediante un esame orale al termine del corso.

Capacità
Al termine del corso lo studente avrà gli strumenti che gli permetteranno di comprendere la letteratura specialistica ed eventualmente di approfondire autonomamente le proprie conoscenze in alcuni dei principali settori dell'astrofisica moderna.

Modalità di verifica delle capacità
Durante l'esame orale lo studente dovrà dimostrare di padroneggiare gli strumenti concettuali descritti durante il corso eventualmente risolvendo semplici problemi.

Prerequisiti (conoscenze iniziali)
Le conoscenze di base in fisica acquisite durante il Corso di Laurea Triennale.

Programma (contenuti dell'insegnamento)
Introduzione

- Scale di massa (massa solare, masse tipiche: stelle, ammassi stellari, galassie), di lunghezza (definizione parsec, lunghezze tipiche: distanze tra stelle, dimensioni delle galassie, distanze tra galassie, universo visibile); di tempo (età dell'Universo, del Sole, delle stelle massicce)
- Definizione di magnitudine: apparente, assoluta, in una banda fotometrica, bolometrica. Modulo di distanza.

Interazione radiazione-materia
Teoria del trasporto radiativo (Rybicki & Lightman):

- Definizione di: intensità specifica, flusso, pressione e densità di energia di un campo di radiazione. Calcolo di queste quantità nel caso di un campo di radiazione isotropo. Costanza dell'intensità specifica lungo un raggio nel vuoto. Sorgente sferica con brillanza superficiale costante: calcolo del flusso.
- Definizione di: coefficiente di emissione, emissività, coefficiente di assorbimento, opacità radiativa.
- Equazione del trasporto radiativo. Soluzione nel caso di: sola emissione, solo assorbimento.
- Definizione di profondità ottica. Mezzi otticamente sottili e otticamente spessi. Funzione sorgente e formulazione dell'equazione del trasporto in termini di profondità ottica e funzione sorgente.
- Soluzione generale dell'equazione del trasporto. Propagazione della radiazione attraverso un mezzo con proprietà costanti: soluzione generale dell'equazione del trasporto, discussione del caso di un mezzo otticamente sottile e di uno otticamente spesso.

- Radiazione termica. Radiazione di corpo nero: legge di Stefan-Boltzmann, legge di Planck, legge di Rayleigh-Jeans, legge di Wien, legge dello spostamento di Wien.
- Definizioni di: temperatura di brillanza, temperatura di colore, temperatura effettiva. Equazione del trasporto in termini della temperatura di brillanza nel limite di Rayleigh- Jeans.
- Legge di Kirchhoff.
- Relazione tra cammino libero medio dei fotoni e coefficiente di assorbimento.

Equilibrio termodinamico:

- Condizioni di validità dell'equilibrio termodinamico.
- Equilibrio termodinamico locale (LTE).

Trasporto radiativo nelle atmosfere stellari:

- Atmosfera a piani paralleli.
- Campo di radiazione quasi-isotropo, valutazione del grado di anisotropia.
- Atmosfera grigia. Momenti dell'equazione del trasporto. Equilibrio radiativo. Approssimazione di Eddington e soluzione del problema del trasporto radiativo: determinazione del campo di radiazione, della funzione sorgente e del profilo di temperatura al variare della profondità ottica.
- Legge del "limb darkening" e sua interpretazione.
- Formazione delle righe spettrali.
- Fotosfera e cromosfera.
- Definizione di: area equivalente e larghezza equivalente. Larghezza naturale di riga.
- Fattori di allargamento di riga: effetto Doppler (calcolo della FWHM dovuta ad agitazione termica), allargamento per collisione, effetto Stark microscopico e macroscopico, Effetto Zeeman, effetti cinematici.

Trasporto radiativo negli interni stellari:

- Media di Rosseland del coefficiente di assorbimento e dell'opacità radiativa.
- Equazione del trasporto nel limite diffusivo.
- Diffusione dei fotoni in una stella: cammino libero medio, “random walk” e tempo scala impiegato dai fotoni a raggiungere la superficie.

Struttuta ed evoluzione delle stelle

• Equazioni di struttura stellare (Clayton / Kippenhahn & Weigert):

- Equazione dell'equilibrio idrostatico. Tempo scala di caduta libera. Tempo scala di esplosione, tempo scala idrostatico. Stime di questi tempi scala per il Sole, per una gigante rossa e per una nana bianca. Stima della pressione centrale nel Sole.
- Teorema del viriale nelle stelle: caso generale, per un gas perfetto, per un gas perfetto monoatomico.
- Relazione tra energia totale, energia potenziale gravitazionale e energia interna. Capacità termica negativa delle stelle. Tempo scala di Kelvin-Helmholtz e sua stima per il Sole.
- Equazione di continuità.
- Tempo scala nucleare e sua stima nel Sole. Equazione di conservazione dell'energia nelle stelle.
- Spiegazione qualitativa del “termostato” stellare: capacità termica negativa insieme ad una sorgente di energia che dipende sensibilmente dalla temperatura.
- Trasporto di energia negli interni stellari. Equazione del trasporto diffusivo della radiazione: derivazione di Eddington. Stima del gradiente di temperatura medio nel Sole e del grado di anisotropia del campo di radiazione.
- Trasporto conduttivo di energia: equazione del calore, opacità conduttiva, cenni agli ambienti stellari in cui diventa il processo di trasporto energetico dominante.
- Moti convettivi e criterio di stabilità di Schwarschild: versione generale. Criterio di Schwarzschild nel caso di gas perfetto chimicamente omogeneo. Definizione di gradiente di temperatura: adiabatico, ambientale e radiativo.
- Trasporto convettivo di energia: cenni alla teoria della “mixing length” e al tempo scala di rimescolamento. Considerazioni sulla

validità dell'assunzione dell'equilibrio idrostatico in presenza di moti convettivi.

Cenni di termodinamica (Kippenhahn & Weigert):

- Gas perfetto, definizione di peso molecolare medio, peso molecolare elettronico medio e loro valutazione nel caso di ionizzazione completa.
- Gas parzialmente ionizzato: derivazione dell'equazione di Saha nel caso generale, nel caso di un gas di puro idrogeno, discussione sui limiti di validità.
- Cenni alla ionizzazione per pressione.

Opacità radiativa negli interni stellari (Clayton):

- processi “bound-bound”, “bound-free”, “free-free”, “scattering” elettronico Thomson.
- Cenni al calcolo dei coefficienti di opacità e discussione sulla dipendenza dalla temperatura.
- Coefficienti di Einstein. Coefficienti di assorbimento e di emissione in termini dei coefficienti di Einstein. Funzione sorgente e equazione del trasporto radiativo in termini dei coefficienti di Einstein. Calcolo del fattore correttivo al coefficiente di assorbimento dovuto all'emissione stimolata (Rybicki & Lightman).
- Legge di Kramers e suoi limiti.
- Cenni allo ione idrogeno negativo.
- Discussione sulla relazione tra regioni parzialmente ionizzate e regioni convettive.

Introduzione alla produzione di energia nucleare nelle stelle (Clayton):

- Difetto di massa, curva dell'energia di legame per nucleone in funzione del numero di nucleoni.
- Valutazione della barriera Coulombiana alle energie tipiche nelle stelle e discussione sull'impossibilità dal punto di vista della fisica classica del suo superamento.
- Effetto tunnel e probabilità di penetrazione di Gamow. Sezione d'urto e fattore astrofisico. Calcolo del tasso di reazione, dell'energia di Gamow e della larghezza della finestra di Gamow.
- Discussione sugli effetti astrofisici della forte dipendenza del tasso di reazioni dalla temperatura e della carica. Necessità di fasi di combustione nucleari distinte.
- Cenni qualitativi allo “screening” elettronico.

Combustione dell'idrogeno:

- Catena protone-protone
- Biciclo CN-NO

Combustione dell'elio:

- 3?
- 12C(?,?)

Sezione d'urto dei neutrini. Cenni qualitativi ai processi di produzione di termoneutrini.

Cenni alle fasi di combustioni avanzate:

- Dalla combustione del carbonio alla combustione del silicio.
- Formazione di un nucleo di ferro.
- Produzione degli elementi più pesanti del ferro attraverso catture neutroniche.

Neutrini solari:

- Predizioni teoriche del flusso totale e dello spettro energetico. ? Esperimenti principali.
- Problema dei neutrini solari e sua soluzione.

Cenni di eliosismologia:

- Osservabili, profilo di velocità del suono.
- Confronto con i risultati del modello solare standard.

Cenni alla costruzione dei modelli stellari:

- Condizioni al contorno.
- Relazioni di scala tra alcune grandezze stellari.

Descrizione qualitativa dell'evoluzione stellare:

- Tracce evolutive di stelle di massa piccola e intermedia

- Fase di pre-sequenza principale, ZAMS, sequenza principale, ramo delle giganti rosse, flash dell'elio, ramo orizzontale e “clump” dell'elio, curva di raffreddamento di nana bianca.

- Criteri di classificazione spettrale delle stelle:
  ? La classificazione di Harvard e di Morgan-Keenan.

- Sistemi fotometrici:
  - Sistema fotometrico UBVRI.
  - Indice di colore come indicatore di temperatura effettiva.
  - Esempi di (B-V) ottenuti dagli spettri di una stella calda e di una fredda.
  - Diagramma colore-magnitudine e diagramma di Hertzsprung-Russell teorico.
  - Immagini di ammassi aperti e globulari galattici. Esempi di diagrammi colore- magnitudine di ammassi stellari galattici aperti e globulari, del campo nelle vicinanze del Sole delle stelle parallassate dal satellite Hipparcos, di un campo stellare della Sloan Digital Sky Survey (campo di cui non si conoscono le distanze), della galassia nana Fornax. Spiegazione delle differenze. Esempi di tracce ed isocrone teoriche.

Sistemi binari:

- Binarie spettroscopiche, ad eclisse, astrometriche.
- Cenni ai metodi di stima della massa.
- Relazione massa-luminosità empirica per stelle di sequenza principale.

Nane bianche:

- Cenni storici sulla scoperta delle nane bianche.
- Gas completamente degenere di elettroni (Kippenhahn & Weigert): equazione di stato esatta, limiti asintotici non relativistico e relativistico. Cenni alle proprietà di un gas di elettroni parzialmente degenere. Esempi di vari ambienti stellari in cui bisogna tener conto della degenerazione elettronica.

- Politropiche (Clayton):
  - Equazione di Lane-Emden.
  - Raggio, massa e relazione massa-raggio per sfere autogravitanti di gas politropiche. Politropiche con indice n= 3/2 e relazione massa-raggio per le nane bianche nel limite non relativistico.
  - Politropiche con indice n=3 e massa limite di Chandrasekhar.
  - Massa limite di Chandrasekhar: dimostrazione di Landau (Shapiro & Teukolsky).
  - Relazione massa-raggio esatta (a T=0) delle nane bianche e cenni alle correzioni dovute a: a) interazioni Coulombiane nel limite di masse piccole; b) processi beta inversi e reazioni picnonucleari per masse prossime al limite di Chandrasekhar (Shapiro & Teukolsky).

- Evoluzione di raffreddamento delle nane bianche (Shapiro & Teukolsky):
  - Trattazione elementare del raffreddamento.
  - Cenni all'effetto delle interazioni Coulombiane sull'equazione di stato, cristallizzazione, rilascio di calore latente e rallentamento dell'evoluzione di raffreddamento delle nane bianche.
  - Regime di Debye ed accelerazione dell'evoluzione di raffreddamento delle nane bianche.

- Luminosità di Eddington.

"Neutron drip" e stelle di neutroni (Shapiro & Teukolsky):

- Calcolo della densità di soglia per il "neutron drip" nel caso di un gas di protoni, elettroni e neutroni.

- Cenni qualitativi al caso in cui siano presenti anche nuclei atomici.

- Massa limite.
- Cenni storici sulle stelle di neutroni e sulla scoperta delle pulsar.
- Stima della densità media di un oggetto compatto rotante con periodo nell'intervallo compreso tra qualche millisecondo e qualche secondo.
- Caratteristiche tipiche di una stella di neutroni.
- Pulsar: modello del momento di dipolo magnetico; stima dell'energia rotazionale e del campo magnetico.
- Discussione su alcuni modelli alternativi. Calcolo della variazione dell'energia potenziale gravitazionale di un corpo che cade sulla superficie di una stella di neutroni dall'infinito.

Cenni all'evoluzione delle stelle in sistemi binari:

- Paradosso di Algol.
- Lobi di Roche e trasferimenti di massa.
- Definizione di binarie: staccate, semi-staccate, a contatto e con inviluppo in comune.

Supernovae:

- Cenni storici.
- Classificazione.
- Modelli fisici.
- Cenni all'uso delle SN Ia come indicatori di distanza.
- Neutrini della SN1987A: stima del limite superiore della massa dei neutrini elettronici.

Sorgenti X in sistemi binari (Shapiro & Teukolsky):

- Modello dell'accrescimento di massa su una stella di neutroni, calcolo della luminosità di accrescimento, del tasso di accrescimento in massa, della temperatura effettiva, del limite di Eddington nel caso di scattering Thomson.

La nostra galassia: la Via Lattea

• **Forma e dimensioni della Via Lattea:**

- Cenni storici, modello di Kapteyn.
- Introduzioni ai conteggi stellari, stima del numero di stelle più brillanti di una data magnitudine apparente, stima della luminosità totale proveniente da queste stelle.
- Cenni al paradosso di Olbers.
- Malmquist bias.
- Modello di Shapley. Stima delle distanze con le variabili RR Lyrae e Cefeidi.
- Mezzo interstellare: estinzione ed arrossamento.

• **Popolazioni stellari:**
? Caratteristiche della Pop. I e Pop. II.
? Cenni alla Pop. III
• Via Lattea: Disco, Alone, Bulge.

Caratterizzazione del mezzo interstellare.

- Identificazione del gas nel mezzo interstellare tramite l'analisi delle righe nello spettro delle stelle:
    - Calcolo del coefficiente di assorbimento, della profondità ottica, della densità di colonna, dell'intensità specifica, della larghezza equivalente.
    - Caso di righe deboli.
    - Curva di crescita.
    - Tasso di eccitazione e di diseccitazione collisionale. Densità critica.
    - Equazione del bilancio dettagliato con processi radiativi e collisionali e calcolo del popolamento dei livelli.
    - Caso di un gas con densità inferiore alla densità critica.
- Nubi interstellari di idrogeno neutro e riga a 21 cm:

- Calcolo del coefficiente di emissione in termini dei coefficienti di Einstein.
- Calcolo dell'intensità della riga di emissione e del coefficiente di assorbimento (corretto per l'emissione stimolata) in termini dei coefficienti di Einstein.
- Calcolo della profondità ottica del mezzo e dell'intensità della riga di assorbimento.
- Cenni ai metodi utilizzati per ricostruire la distribuzione spaziale del gas di idrogeno neutro nel piano galattico e la velocità angolare orbitale tramite la riga a 21 cm. Bracci di spirale.
- Tecniche per individuare la presenza di un mezzo interstellare caldo tra le nubi fredde di HI.

- Nubi molecolari: Idrogeno molecolare, Emissione CO, Cenni ai maser.
- Regioni HII (Harwit):
  - Tasso di ionizzazione e di ricombinazione.
  - Raggio di Stromgren.
  - Cenni ai processi di riscaldamento e di raffreddamento del gas.
  - Stima della velocità di espansione della regione HII dovuta alla differenza di pressione con la regione esterna non ionizzata.
- Gas coronale.
- Emissione di bremsstrahlung termica: emissività, emissività totale, coefficiente di emissione.

Astronomia extragalattica

- Introduzione all'astronomia extragalattica.
- Classificazione morfologica delle galassie.
- Distribuzione spaziale delle stelle nelle galassie:
  ? Legge di de Vaucouleurs per le galassie ellittiche.
  ? Legge di Freeman per le galassie a spirale.
- Caratteristiche fisiche e cinematiche delle galassie:
  ? Relazione di Faber-Jackson per le galassie ellittiche.
  ? Curve di rotazione e relazione di Tully-Fisher per le galassie a spirale.
- Cenni alla materia oscura.
- Legge di Hubble.
- Cenni agli ammassi di galassie e alla distribuzione su grande scala.

Bibliografia e materiale didattico

Il libro di testo adottato è:
• Arnab Rai Choudhuri “Astrophysics for Physicists”, Cambridge University Press
Come dettagliato nel programma, alcuni argomenti sono stati approfonditi seguendo, oltre al libro adottato, i testi seguenti:

- D. D. Clayton “Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis”, University of Chicago Press
- R. Kippenhahn & A. Weigert “Stellar Structure and Evolution”, Springer
- S. L. Shapiro & S. A. Teukolsky “Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars”, Wiley
- G. B. Rybicki & A. P. Lightman “Radiative Processes in Astrophysics”, Wiley
- M. Harwit “Astrophysical Concepts”, Springer

- K. R. Lang "Essential Astrophysics", Springer

Modalità d'esame

L'esame consiste in una prova orale, ossia in un colloquio tra il candidato e il docente. Durante il colloquio al candidato verranno fatte domande su vari argomenti trattati nel corso.

Ultimo aggiornamento 20/08/2022 14:59