



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**SCUOLA DI SCIENZE**

**Bollettino Notiziario**

Anno Accademico 2017/2018

**Laurea magistrale in Astronomia (Ord.  
2010)**

---

## Curriculum: Corsi comuni

---

---

## Curriculum: AstroMundus

---

### ASTRONOMICAL SPECTROSCOPY

(Titolare: Prof. PIERO RAFANELLI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Astronomia (Ord. 2010)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** AstroMundus  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento:** Dipartimento di Astronomia  
**Aule:** da definire

**Prerequisiti:**

Conoscenze di base di Fisica 1 e 2, Analisi Matematica 1 e 2, Fisica atomica, Astrofisica 1 e 2.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Acquisizione e approfondimento dei concetti Fisici indispensabili per lo studio delle Nebulose Gassose

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento:**

Lezioni frontali

Esercitazioni su dati osservativi

**Contenuti:**

- Caratteristiche dello spettro a righe di emissione di: Nebulose gassose - Nebulose diffuse - Nebulose planetarie - Novae ~ Supernova remnants- Regioni HII extragalattiche- Galassie di Seyfert di tipo I e 2 - QSO's - Star burst galactic nuclei - Liners.

- Eccitazione radiativa, Ionizzazione, Ricombinazione, Fluorescenza: la sfera di Stromgren - Emissione free-free e Bremsstrahlung - Equazione della ionizzazione per atomi complessi - ricombinazione dielettronica - Ionizzazione per collisione - Scambio di carica - Campi di radiazione stellare nel lontano ultravioletto - La fluorescenza di Bowen nello OIII e nello NIII.

- Equilibrio di fotoionizzazione: Fotoionizzazione di una nebula di solo Idrogeno -Fotoionizzazione di una nebula contenente Idrogeno ed Elio - Fotoionizzazione da He+ ad He++

- Equilibrio termico - Aumento di energia per fotoionizzazione - Perdita di energia per ricombinazione - Perdita di energia per radiazione free-free - Perdita di energia da radiazione in righe eccitate collisionalmente - Perdita di energia per eccitazione collisionale dell'Idrogeno.

Calcolo dello spettro Emesso: Righe di ricombinazione - Radiazione nel continuo " Righe e continuo nel dominio radio - Probabilità di fuga di un fotone emesso in una nebula sferica ed omogenea - Effetti di trasporto radiativo nello H1 - Effetti di trasporto radiativo nello HeI ed HeII - Eccitazione collisionale dello HeI.

- Fenomeni correlati alla presenza di polveri: Effetto di estinzione prodotto dalla polvere - Polvere e spettro infrarosso di Nebulae, Galassie di Seyfert etc. - Temperatura e bilancio energetico della polvere - Osservazioni infrarosse, ottiche e ultraviolette di Nebulae, Galassie di Seyfert etc. - Proprietà dei grani di polvere (rapporto polvere gas, polarizzazione lineare, variazione del rapporto  $R = A_E / (B - V)$ ) - Confronto fra le proprietà del mezzo interstellare della nostra galassia e quelle di altre galassie.

- Confronto della Teoria con le osservazioni: Misure di temperatura dalle righe di emissione - Determinazione della temperatura dal continuo ottico e da quello radio - Densità elettronica dalle righe di emissione - Temperature elettroniche e densità elettroniche dalle righe di ricombinazione radio - Radiazione ionizzante di tipo termico e non termico - Abbondanza degli elementi nelle nebulae da righe di ricombinazione e proibite.

**Modalità di esame:**

orale

La verifica del profitto avrà luogo mediante un colloquio, eventualmente con la discussione di un elaborato prodotto dallo studente su un argomento trattato durante le lezioni (facoltativo)

**Criteri di valutazione:**

Valutazione sulla verifica della capacità di ragionare con i concetti acquisiti durante il corso.

**Testi di riferimento:**

Osterbrock, D.E., Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei. ;

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

## CELESTIAL MECHANICS

(Titolare: Dott. STEFANO CASOTTO) - Mutuato da: Laurea magistrale in Astronomia (Ord. 2010)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** AstroMundus  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

### Prerequisiti :

Lo studente deve conoscere i fondamenti della Meccanica Razionale e dell'Analisi Matematica, inclusa la teoria elementare delle Equazioni Differenziali Ordinarie.

Aiuta una buona dose di curiosità relativamente ai fenomeni dinamici osservati nel Sistema Solare e di sistemi planetari in generale, unitamente ad un interesse per la loro modellistica precisa ed il calcolo e il progetto di missioni di esplorazione planetaria.

### Conoscenze e abilità da acquisire :

â€¢ Sviluppare la comprensione dei fenomeni dinamici nei sistemi gravitazionali

â€¢ Applicazione della Meccanica Newtoniana alla soluzione dei problemi fondamentali della Meccanica Celeste dei corpi naturali e artificiali

â€¢ Soluzione dei Problemi Inversi con applicazione alla Determinazione delle Orbite

â€¢ Introduzione alla progettazione di orbite per l'esplorazione planetaria ed interplanetaria

â€¢ Sviluppo di codici di calcolo numerico in Matlab (o linguaggi compilati), inclusa l'integrazione numerica delle equazioni del moto di sistemi gravitanti

â€¢ Introduzione all'uso del sistema di simulazione General Mission Analysis Tool (GMAT)

### Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Lezioni frontali, assegnazione di compiti per casa, sviluppo di codice di calcolo in Matlab (Fortran, C++, ...), attività in laboratorio informatico, studio e analisi di argomenti speciali durante il progetto finale.

### Contenuti :

1. Le equazioni del moto dei sistemi gravitanti

2. Il Problema dei Due Corpi come problema ai valori iniziali (IVP)

3. Il Problema dei Due Corpi come problema ai limiti (BVP)

4. Manovre orbitali

5. Sistemi di riferimento spaziali e temporali

6. Il calcolo delle effemeridi kepleriane

7. Determinazione preliminare delle orbite (IOD)

8. Moto relativo kepleriano e sua generalizzazione

9. Regolarizzazione e formulazione del Problema dei Due Corpi in variabili universali

10. Il Problema dei Due Corpi BVP e il Lambert targeting

11. Il Problema dei Tre Corpi e le soluzioni omografiche

12. Il Problema Ristretto Circolare dei Tre Corpi - L'integrale di Jacobi, superfici di velocità nulla, punti lagrangiani, stabilità, orbite periodiche e loro calcolo

13. La teoria delle coniche raccordate e le traiettorie interplanetarie con assistenza gravitazionale

14. Elementi della teoria delle perturbazioni e il moto di un satellite artificiale terrestre

### Modalità di esame :

Compiti per casa. Progetto finale con presentazione orale del rapporto finale e discussione sui risultati del progetto e altri argomenti trattati a lezione.

### Criteri di valutazione :

Compiti per casa. 40%, Progetto finale 30%, Esame orale 30%

### Testi di riferimento :

Danby, John M. Anthony, *Fundamentals of celestial mechanics*. Richmond (Va.): Willmann-Bell, 1988

Roy, Archie Edmiston, *Orbital motion*. New York: London, Taylor & Francis, 2005

Vallado, David A.; McClain, Wayne D., *Fundamentals of astrodynamics and applications*. Hawthorne: CA, Microcosm press, New York, Springer-Verlag, 2007

Murray, Carl D.; Dermott, Stanley F., *Solar System Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000

Cordani, B., *I cieli in una stanza. Una storia della Meccanica Celeste dagli epicycli di Tolomeo ai tori di Kologorov.. Padova: Libreriauniversitaria.it, 2016*

Curtis, Howard D., *Orbital mechanics for engineering students*. Amsterdam: Elsevier Butterworth Heinemann, 2013

### Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

Casotto, *Lezioni di Meccanica Celeste*

## COSMOLOGY

(Titolare: Prof. ALBERTO FRANCESCHINI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Astronomia (Ord. 2010)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** AstroMundus  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

### Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Lezioni frontali ed esercitazioni.

### Contenuti :

1. Evidenze sulla struttura su grande scala dell'Universo

Proprietà generali e strutturali dell'Universo.

Distribuzione su grande scala delle galassie. Funzioni di correlazione angolari e spaziali. Correlazioni di ordine due e superiore. Relazione di Limber.

Power-spectrum delle strutture cosmiche. Relazioni tra power-spectrum e  $\chi(r)$ . Osservazioni della struttura su grande scala. Spettro iniziale delle perturbazioni. Mapping 3D di galassie e Nuclei Attivi.

Altre statistiche. Counts-in-cells. Cenni alla struttura frattale e topologica dell'Universo.

2. Deviazioni da omogeneità e isotropia nella metrica RW. Effetti del lensing gravitazionale e sue applicazioni.

Risultato newtoniano e correzione relativistica. Potenziali della lente. Lente puntiforme e distribuzioni sferiche isoterme. Raggio di Einstein. Sezioni d'urto di lensing. Effetto del lensing sui ritardi temporali. Caustiche.

Osservazioni del lensing gravitazionale ed applicazioni cosmologiche. Stima delle masse degli ammassi di galassie. Stima della costante  $H_0$ . Effetti della costante cosmologica  $\Lambda$  nelle statistiche del lensing.

3. Evoluzione cosmologica di perturbazioni nel fluido cosmico.

Evoluzione cosmologica di perturbazioni nelle varie componenti del fluido cosmico. Equazioni generali in un universo statico e in uno in espansione. Evoluzione in un universo dominato dalla materia. Hubble drag. Relazione tra perturbazioni e campi di velocità.

Vincoli sui parametri cosmologici dallo studio dei moti su grande scala.

4. Struttura generale dell'Universo: moti peculiari di galassie e strutture.

La legge di Hubble, determinazione delle distanze cosmiche. Deviazioni dalla legge di Hubble, velocità peculiari nel cosmo. Informazioni sulla struttura dal campo di velocità.

Origine dei moti su grande e piccola scala.

5. Breve storia termica dell'Universo

Contenuto di materia e radiazione nell'Universo. Densità di energia. Universi dominati dalla radiazione. Epoche della ricombinazione e dell'equivalenza.

Tempi scala dell'evoluzione cosmica.

Entropia cosmica per barione.

Nucleosintesi primordiale

6. Struttura generale dell'Universo: la Radiazione Cosmica nelle Microonde

Scoperta della CMB. Osservazioni da terra e dallo spazio. COBE & WMAP. Origine della CMB.

Proprietà spaziali, isotropia della CMB. Strutturazione angolare della radiazione.

Origine delle fluttuazioni d'intensità. Processi fisici operanti sulle grandi scale. Fluttuazioni sulle scale angolari intermedie. Contributi di sorgenti alle anisotropie sulle piccole scale (effetto SZ, sorgenti cosmiche).

Vincoli dalla CMB sui parametri cosmologici.

Spettro della CMB. Proprietà spettrali, distorsioni spettrali. Effetto Sunyaev-Zeldovich da plasmi caldi. Limiti osservativi alle distorsioni spettrali e loro implicazioni.

7. Universo primordiale, Big Bang, transizioni di fase, inflazione

Il problema degli orizzonti cosmici. Propagazione dell'informazione e visibilità dell'Universo.

Singularità del Big Bang. Tempo di Planck. Il problema della quantizzazione della gravitazione.

Cenni al modello standard delle particelle elementari. Interazioni fondamentali. Transizioni di fase in cosmologia. L'epoca delle transizioni di fase.

Problemi del modello standard Big Bang. Problema della costante cosmologica. Problema dell'orizzonte. Problema della piattezza.

Inflazione cosmica e sue soluzioni dei problemi.

Cenno al Principio Antropico.

8. Origine ed Evoluzione della Struttura su Grande Scala

Spettro di potenza primordiale.

Componenti di Materia Oscura (DM), calda e fredda. Scale e masse dell'orizzonte. Spettro invariante in scala. Free-streaming della DM.

Stagnazione. Funzione di trasmissione nel regime linear

**Testi di riferimento :**

M. Longair, 2006, Galaxy Formation. : Springer, 2006

P. Schneider, Extragalactic Astronomy and Cosmology. : Springer, 2006

J. Peacock, Cosmological physics. Cambridge: Cambridge Astrophysics, 2002

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Note del docente. Testi pubblicati.

## GALAXY DYNAMICS

(Titolare: Prof. ENRICO MARIA CORSINI)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** AstroMundus

**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia

**Aule :** A

**Prerequisiti :**

Conoscenze di base di Astronomia, Astrofisica, Fisica Generale e Calcolo Numerico.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il tema dell'attività formativa riguarda lo studio della struttura della Via Lattea e delle altre galassie usando la dinamica stellare insieme a dati fotometrici e spettroscopici ottenuti con osservazioni da terra e dallo spazio.

### **Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali su temi relativi alla dinamica delle galassie.

### **Contenuti :**

1. **RICHIAMI SULLE PROPRIETA` DELLE GALASSIE.** Morfologia. Fotometria. Cinematica. Relazioni di scala.

2. **TEORIA DEL POTENZIALE.** Potenziale gravitazionale. Equazione di Poisson. Equazione di Laplace. Teorema di Gauss. Energia Potenziale. Tensore dell'energia potenziale. Sistemi sferici. Teoremi di Newton. Massa puntiforme. Sfera omogenea. Profilo di densita` secondo la legge di Hubble modificata. Profilo di densita` a legge di potenza. Sistemi assisimetrici. Potenziale logaritmico.

3. **ORBITE DELLE STELLE.** Costanti e integrali del moto. Superfici di sezione. Orbite in un potenziale sferico statico. Orbite in un potenziale Kepleriano. Orbite in un potenziale assisimetrico. Moto nel piano meridionale. Orbite quasi circolari: approssimazione epiciclica. Orbite in un potenziale bidimensionale non assisimetrico non rotante. Orbite di tipo "loop" e "box". Orbite stabili e instabili. Orbite in un potenziale bidimensionale non assisimetrico rotante. Integrale di Jacobi. Punti di Lagrange. Corotazione. Famiglie di orbite  $x_1, x_2, x_3, x_4$ . Cenni sulle orbite in un potenziale tridimensionale triassiale.

4. **SISTEMI NON COLLISIONALI.** Urti geometrici. Urti forti. Urti deboli. Tempo di attraversamento. Tempo di rilassamento. Funzione di distribuzione. Equazione non collisionale di Boltzmann. Equazione di continuita`. Equazione di Eulero. Equazioni di Jeans. Applicazioni delle equazioni di Jeans. Ellissoide delle velocita`. Asymmetric drift. Densita` di massa nei dintorni solari. Dispersione di velocita` di un sistema sferico. Degenerazione massa-anisotropia. Sistemi sferoidali con dispersione di velocita` isotropa. Processi di riscaldamento del disco stellare e forma dell'ellissoide delle velocita`. Teorema del viriale. Rapporto massa-luminosita` dei sistemi sferici. Rotazione delle ellittiche. Teorema di Jeans. Applicazione ai sistemi sferici. Sistemi sferici con dispersione di velocita` isotropa. Politropi. Sfera di Plummer. Sfera isoterma. Sfera singolare isoterma. Raggio di King. Metodo di King per determinare il rapporto massa-luminosita`. Modelli di King. Raggio mareale. Parametro di concentrazione. Determinazione della funzione di distribuzione dal profilo di densita`. Equazione di Eddington. Cenni sui sistemi sferici con dispersione di velocita` anisotropa. Modelli di Michie.

### **Modalita' di esame :**

Esame orale.

### **Criteri di valutazione :**

La valutazione della preparazione dello studente si basera` sulla comprensione degli argomenti trattati nel corso delle lezioni e sulla capacita` di applicare le conoscenze acquisite in modo autonomo e consapevole.

### **Testi di riferimento :**

Binney J., Tremaine S., Galactic Dynamics. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1987

### **Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Tutto il materiale didattico presentato durante le lezioni viene messo a disposizione degli studenti sul sito Moodle del corso.

---

## **PROVA FINALE**

(Titolare: da definire)

**Periodo:** Il anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** AstroMundus

**Tipologie didattiche:** ; 30,00 CFU

---

## **STELLAR POPULATION**

(Titolare: Prof. GIOVANNI CARRARO) - Mutuato da: Laurea magistrale in Astronomia (Ord. 2010)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** AstroMundus

**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia

**Aule :** C

### **Prerequisiti :**

Conoscenze di base (almeno a livello di laurea di laurea triennale) di astrofisica stellare. Conoscenza di evoluzione stellare, diagrammi  $c-m$ , fotometria e spettroscopia stellare, astrometria.

### **Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Proprieta' delle popolazioni stellari locali, in ammasso, nella Via Lattea, in galassie. Conoscenze base sugli osservabili e loro interpretazione per popolazioni stellari non risolte.

### **Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali

Esercizi di lettura e presentazione di alcuni articoli fondamentali

### **Contenuti :**

Diagrammi colore-magnitudine

Trasformazioni luminosita'-magnitudine e temperatura-colore

Interstellar reddening effects on the  $cm$  diagrams

The concept of stellar populations: background storico

Popolazioni stellari: visione moderna

Il modello galattico di Eggen, Lynden-Bell e Sandage

Il modello galattico di Searle e Zinn

Popolazioni stellari nelle vicinanze del Sole  
Il mezzo interstellare nelle vicinanze del Sole

Popolazione II

Misura dei parametri principali di una popolazione: reddening, distanza, età, contenuto chimico

Popolazioni stellari in ammassi globulari

Il concetto di popolazioni stellari multiple

Il contenuto di He in stelle di popolazione II

Il ramo orizzontale e il problema del secondo parametro

Popolazione I

Popolazioni stellari nel disco galattico

Popolazioni stellari in ammassi aperti

Popolazioni stellari in galassie nane del Gruppo Locale

La funzione di massa iniziale

Parametri osservativi e loro interpretazione per le popolazioni stellari non risolte

Storia della formazione stellare in Galassie

Principi base dell'evoluzione chimica delle popolazioni stellari

**Modalità di esame :**

Orale

**Criteri di valutazione :**

Capacità di esporre in modo adeguato e con linguaggio scientifico gli argomenti del programma

**Testi di riferimento :**

Salaris, Maurizio; Cassisi, Santi, *Evolution of stars and stellar populations* Maurizio Salaris, Santi Cassisi. Chichester: UK, Wiley, 0  
Greggio, Laura; Renzini, Alvio, *Stellar populations a user guide from low to high redshift* Laura Greggio, Alvio Renzini. Weinheim: Wiley-VCH, 2011

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Materiali informatici del docente

## THEORETICAL ASTROPHYSICS

(Titolare: Prof.ssa PAOLA MARIGO) - Mutuato da: Laurea in Astronomia

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** AstroMundus  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia  
Vicolo dell'Osservatorio 3  
35100 Padova  
**Aule :** Da definire

**Prerequisiti :**

Elementi di trigonometria piana, derivate, integrali, nozioni di base di fisica relative ai corsi precedenti.

Corsi propedeutici: Astronomia I (2 anno) e Astronomia II (mod. A, terzo anno).

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso si propone di fornire agli studenti i fondamenti teorici della struttura e dell'evoluzione delle stelle, dalla loro nascita fino agli stadi finali.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni in aula, con utilizzo sia di metodologia classica (lezioni alla lavagna) che di supporti multimediali (diapositive, filmati, applet, interfacce-web per la generazione in tempo reale di modelli stellari).

**Contenuti :**

1. Introduzione e panoramica del corso.

Vincoli osservativi, il diagramma H-R, relazioni massa-luminosità e massa-raggio, popolazioni stellari e abbondanze chimiche.

2. Idrostatica, energetica e scale di tempo.

Derivazione di tre equazioni della struttura stellare (conservazione di massa, quantità di moto ed energia). Equilibrio idrostatico e termico. Derivazione del teorema del viriale e le sue conseguenze per l'evoluzione stellare. Derivazione delle scale di tempo caratteristiche dell'evoluzione stellare.

3. Equazione di stato (EoS).

Equilibrio termodinamico locale.. Derivazione generale di  $n$ ,  $U$ ,  $P$ , dalla meccanica statistica. Casi limite: gas ideale, degenerazione.

Miscela di gas e radiazione. Processi adiabatici. Ionizzazione (equazione di Saha, conseguenze per le proprietà termodinamiche).

4. Trasporto di energia all'interno delle stelle.

La 4a equazione della struttura stellare: l'equazione del trasporto di energia.

Approssimazione diffusiva del trasporto di radiazione. Il gradiente di temperatura radiativo. Opacità. Luminosità di Eddington.

Convezione.. Derivazione di criteri di stabilità (Schwarzschild, Ledoux). Trasporto di energia convettivo. Teoria della Mixing Length.

5. Reazioni termonucleari.

Produzione di energia nucleare (energia di legame). Derivazione della velocità di reazione termonucleare (sezioni d'urto, effetto tunnel, picco di Gamow). Dipendenza dalla temperatura della velocità di reazione nucleare. Cicli di combustione: bruciamento dell'idrogeno

mediante la catena p-p e il ciclo CNO. Bruciamento dell'elio: reazioni 3-alfa e alfa + C. Reazioni di bruciamenti nucleari avanzati.

6. Le equazioni dell'evoluzione stellare.

Introduzione, derivate rispetto a tempo / spazio, casi limite. Condizioni al contorno e loro effetto sulla struttura stellare. Metodi di soluzione.

7. Modelli stellari semplici. Modelli politropici. Relazioni di omologia: principi, derivazione, applicazione alle fasi di contrazione gravitazionale e alla fase di sequenza principale.

8. Evoluzione schematica dal teorema del viriale (VT).

Evoluzione delle regioni centrali della stella combinando il VT ed EOS: tracce evoluzione in termini di (P, rho) e (T, rho). Evoluzione o meno verso la condizione di degenerazione del gas. La massa di Chandrasekhar, stelle di piccola massa vs stelle massicce. Masse critiche per l'innescio dei bruciamenti, nane brune, cicli di combustione nucleare.

9. Evoluzione dettagliata: verso e sulla sequenza principale (MS).

Semplice derivazione della linea di Hayashi, evoluzione di pre-MS. Proprietà della ZAMS: relazioni M-L e M-R, comparsa delle regioni convettive. Evoluzione durante la MS: cambiamenti strutturali, caratteristiche di stelle di piccola massa vs quelle di massa elevata, effetti di overshooting.

10. Evoluzione di Post-MS. Il limite di Schoenberg-Chandrasekhar, il principio dello specchio. La fase di bruciamento di H in shell: Hertzsprung-gap, la fase di ramo di gigante rossa (RGB), il primo dredge-up. La fase di bruciamento centrale di elio: ramo orizzontale, loop delle Cefeidi. perdita di massa in RGB.

11. Stadi evolutivi avanzati delle stelle di massa piccola e intermedia. La fase di II ramo asintotico (AGB): pulsazioni termiche, secondo e terzo dredge-up, perdita di massa, nucleosintesi. Nane bianche: struttura, effetti non ideali, Descrizione semplificata della teoria del raffreddamento.

12. Evoluzione di pre-supernova di stelle massicce. Importanza della perdita di massa in tutto il diagramma H-R (stelle O, RSG, LBV e WR). Evoluzione del nucleo: cicli di combustione nucleare e perdite di neutrini.

13. Esplosioni di supernova e resti di stelle massicce. Evoluzione del nucleo fino al collasso. Supernovae di tipo Ia.

**Modalità di esame :**

Verifica orale e/o scritta su tutti gli argomenti trattati nel corso.

**Criteri di valutazione :**

Accertamento della comprensione e della padronanza degli argomenti trattati.

**Testi di riferimento :**

M. Salaris & S. Cassisi, *Evolution of Stars and Stellar Populations*. : John Wiley & Sons, 2005

C.J. Hansen, S.D. Kawaler & V. Trimble, *Stellar Interiors*. : Springer-Verlag, 2004

R. Kippenhahn & A. Weigert, *Stellar Structure and Evolution*. : Springer-Verlag, 1990

D. Prialnik, *An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution*. : Cambridge University Press, 2009

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Diapositive e altro materiale reso disponibile in formato elettronico agli studenti.

---

# Curriculum: Astronomia

---

## ASTROBIOLOGIA

---

(Titolare: Prof. GIUSEPPE GALLETTA)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Astronomia

**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Sede dell'insegnamento :** Centro Interdipartimentale Vallisneri

**Aule :** Orario e aula verranno pubblicati in rete sul sito <http://dept.bio.unipd.it/naturali/>

**Prerequisiti :**

Conoscenze elementari di Astronomia, Biologia, Scienze della Terra. Si consiglia fortemente di seguirlo solo dopo aver dato gli esami di base, ovvero al terzo anno della laurea triennale o nella laurea magistrale.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Capacità di analizzare criticamente le ipotesi sull'origine della vita e le ricerche di analoghi su altri pianeti e altrove.

Conoscenza dello stato attuale della ricerca scientifica sul problema dell'esistenza di forme di vita al di fuori del nostro pianeta.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali e supporti multimediali (presentazioni powerpoint). Durante le lezioni un biologo esperto del settore, il Prof. Gianni Tamino, terrà una serie di seminari sull'origine della vita sulla Terra, sugli organismi estremofili e su habitat estremi del nostro pianeta.

**Contenuti :**

Il dibattito sull'universalità della vita: Da Lucrezio a Hoyle; La Panspermia; Il problema del pianeta Marte; L'esobiologia nel ventesimo secolo. La vita extraterrestre nella letteratura ed il cinema. Cenni di Biologia: L'acqua. Importanza del carbonio (C) nelle molecole biologiche. Le principali macromolecole presenti nei sistemi viventi. I carboidrati. I lipidi. Le proteine. Acidi nucleici: DNA ed RNA. La formazione delle proteine. La cellula. La riproduzione. Le proprietà dei viventi. Riproduzione e replicazione. Batteri e altre forme di vita pluricellulari. Virus. Viroidi e Virusoidi. Prioni. Nanobi. Crescita, metabolismo. Le mutazioni ed il caso. La selezione naturale. Molecole e atomi essenziali per le forme di vita. La nascita di stelle. La formazione degli elementi chimici. Il gas interstellare. La formazione di molecole interstellari. La polvere cosmica. Formazione e composizione dei planetesimi. Le meteoriti. I composti organici nelle condriti carbonacee. Le micrometeoriti e la polvere cometaria. Origine ed evoluzione del Sistema Solare. La formazione del disco protoplanetario. La nascita dei pianeti. Nascita della Terra e collisioni primordiali. La formazione delle atmosfere. L'effetto serra. L'origine dell'acqua sui pianeti. Gli ambienti originari della vita. Origine della vita sulla Terra: Gli ingredienti della vita. Un mondo ad RNA? Un mondo a tioesteri? Un mondo a liposomi? Un mondo a coacervati? L'esperimento di Miller: produzione di molecole complesse con il concorso di energia. Dalle micromolecole agli aggregati cellulari. Gli aggregati organici precellulari. Il mondo ad RNA: possibilità e

problemi. Il primo bioma. Ambienti terrestri estremi: Vita intorno ai black smokers. Vita in regioni idrotermali subacquee. Vita tra i clatrati oceanici. Vita sotto i ghiacci. Vita nelle grotte sulfuree. Il Futuro della Terra: gigante rossa, esplosioni di SN, Impatti, eruzioni vulcaniche, estinzioni. Pianeti e dischi protoplanetari intorno ad altre stelle. Zone abitabili circumstellari e galattiche. Ricerca di vita nel Sistema Solare: L'evoluzione dell'ambiente marziano. Gli esperimenti biologici dei Viking. Meteoriti marziane e batteri fossili. Europa. Titano. Viaggi nello spazio: Il problema della propulsione. Sopravvivenza cellulare nello spazio. Cenni ai problemi di adattamento dell'uomo allo spazio. Cenni agli esperimenti di microgravità. La ricerca di intelligenze extraterrestri: L'equazione di Drake. L'evoluzione di civiltà. Comunicazione con civiltà extraterrestri. Il problema del linguaggio. L'impatto tra due civiltà.

**Modalità di esame :**

Discussione orale su più argomenti del corso

**Criteri di valutazione :**

Conoscenza degli argomenti dell'insegnamento.

Capacità di discutere e collegare insieme più argomenti di Astrobiologia in maniera critica.

**Testi di riferimento :**

Galletta, Giuseppe; Sergi, Valentina, *Astrobiologia: le frontiere della vita*. Milano: U. Hoepli, 2005

Kolb, Vera M., *Astrobiology: an evolutionary approach* edited by Vera M. Kolb. Boca Raton: CRC Press, 2015

Longstaff, Alan, *Astrobiology: an introduction*. Boca Raton: CRC Press, 2015

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Presentazioni PowerPoint che saranno consegnate alla fine delle lezioni su supporto digitale o cartaceo

---

## ASTROFISICA DEL MEZZO INTERSTELLARE

(Titolare: Prof. PIERO RAFANELLI)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia  
**Aule :** da definire

**Prerequisiti :**

La comprensione delle lezioni richiede la conoscenza della fisica generale (in particolare termodinamica ed elettromagnetismo) e delle nozioni di base dell'astrofisica e della spettroscopia

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso si propone di fornire le conoscenze atte alla interpretazione dei fenomeni radiativi e dinamici del mezzo interstellare .

La seconda parte del corso riguarda le conoscenze di base della fluidodinamica e della magnetoidrodinamica.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali

Esercitazioni su dati osservativi

**Contenuti :**

- Introduzione

- Come ottenere informazioni sul mezzo interstellare: righe spettrali, radiazione continua, estinzione interstellare  
Processi microscopici nel mezzo interstellare: raffreddamento e riscaldamento del gas interstellare, formazione di molecole  
- Grani interstellari: Evidenza della presenza di grani, ottica dei grani, formazione e distruzione dei grani, proprietà fisiche dei grani, grani come agenti di riscaldamento e raffreddamento del gas interstellare, grani come siti di formazione di molecole  
- Regioni eccitate radiativamente: nebulae di puro idrogeno, nebulae contenenti elementi pesanti, spettri radio di nebulae, struttura fisica delle nebulae

- Introduzione alla dinamica dei gas: equazioni fondamentali dalle leggi di conservazione, onde sonore, onde d'urto adiabatiche, onde d'urto radiative

- Effetti gas dinamici di stelle massicce sul mezzo interstellare: espansione delle nebulae, effetti di venti stellari di stelle massicce sul gas interstellare, esplosioni di supernovae e supernova remnants, conseguenze delle esplosioni di supernovae nel mezzo interstellare di galassie

- Formazione stellare e regioni di formazione stellare

**Modalità di esame :**

orale

La verifica del profitto avrà luogo mediante un colloquio, eventualmente con la discussione di un elaborato prodotto dallo studente su un argomento trattato durante le lezioni (facoltativo)

**Criteri di valutazione :**

Valutazione sulla verifica della capacità di ragionare con i concetti acquisiti durante il corso.

**Testi di riferimento :**

L. Spitzer jr, *Physical processes in the interstellar medium*. : Wiley, 1978

J.E. Dyson, D.A. Williams, *The physics of the interstellar medium*. : IOP, 1997

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Libri di testo e dispense manoscritte del docente

---

## ASTROFISICA DELLE ALTE ENERGIE

(Titolare: Prof. ALBERTO FRANCESCHINI)



**Periodo:** Il anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia  
**Aule :** da definire

**Prerequisiti :**

I corsi fondamentali del I anno Laurea Magistrale in Astronomia

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Conoscenze estese dei vari capitoli, inclusi gli aspetti osservativi della disciplina

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali ed esercitazioni

**Contenuti :**

**FONDAMENTI DI ELETTRODINAMICA CLASSICA:** Elettromagnetismo nel limite classico. Onde elettromagnetiche. Relazione tra cariche elettriche e campi di radiazione (radiazioni da cariche in moto, potenziali di Lienard-Wiebert, equazioni fondamentali, Larmor, emissione di dipolo, contributi multipolo, spettro di radiazione).

**RADIAZIONE BREHMSSTRALUNG:** Limite classico, contributo del dipolo elettrico. Fattore di Gaunt. Bremsstrahlung termica. Raffreddamento di plasmi per emissione di free-free. Trasporto radiativo e auto-assorbimento Bremsstrahlung. Bremsstrahlung non-termico e relativistico. Applicazioni di emissione di free-free termico in plasmi astrofisici.

**DINAMICA DEL GAS ED EFFETTI SUL PLASMA:** Fondamenti di idrodinamica. Equazioni generali e leggi di conservazione. Flussi stazionari isotermi ed adiabatici. Onde sonore. Collisioni tra particelle nei plasmi. Trasferimento di momento tra particelle: viscosità. Trasferimento di energia e conduzione di calore. Onde d'urto. Effetti del campo magnetico.

**PLASMI CALDI IN GALASSIE ED AMMASSI:** Parametri fisici fondamentali. Tempi scala di termalizzazione. Conduzione di calore. Effetti del campo magnetico. Meccanismi di ionizzazione. Ionizzazione collisionale. Righe di emissione. Abbondanze di metalli nel plasma. Modelli di distribuzione dei plasmi. Meccanismi di raffreddamento e riscaldamento. Plasma tra ammassi.

**RADIAZIONE DI SINCROTRONE:** Cariche in campi magnetici. Potenza dell'emissione di sincrotrone. Aberrazione, beaming, distribuzione angolare della radiazione. Spettro di sincrotrone di un singolo impulso e suo spettro. Transizione da spettro di ciclotrone a sincrotrone. Emissione da una distribuzione di elettroni non termica. Trattamento completo. Auto-assorbimento di sincrotrone e cutoff spettrale. Polarizzazione di sincrotrone. Limiti di validità. Perdite di energia elettronica ed evoluzione spettrale del sincrotrone. Radio-galassie e loro emissione di sincrotrone. Energetica dell'emissione di sincrotrone delle radio galassie. Nuclei galattici attivi radio-quiet: quasars e galassie di Seyfert.

**RAGGI COSMICI:** proprietà osservate dei raggi cosmici. Meccanismi di accelerazione di Fermi del primo e del secondo ordine.

**EMISSIONE DI COMPTON INVERSO:** Scattering di elettroni. Effetti quantistici: Klein-Nishina cross-section. Scattering Compton e Compton inverso. Potenza di emissione da un singolo scattering. Emissione da molte particelle. Effetto di scattering multiplo sull'IC (parametro Compton, distorsioni spettrali, la distribuzione di Bose-Einstein, effetto termico e cinetico Sunyaev-Zeldovich). Emissione nei raggi-X di AGN da Comptonizzazione termica. Riflessione Compton. Schema unificato degli AGN e background dei raggi-X. Il fenomeno BLAZAR. Produzione di Compton inverso da fotoni di altissima energia: emissione Synchrotron-Self Compton e External Compton. Boosting Doppler. Moti super-luminali.

**PROCESSI DI ACCRESCIMENTO:** Parametro di compattezza. Limite di Eddington. Regimi critici di accrescimento. Accrescimento di Bondi e a simmetria sferica. Accrescimento in sistemi binari. Viscosità del plasma nei dischi. Accrescimento sottile in dischi. Test osservativi. Accrescimento in AGN.

**PROPAGAZIONE DI RADIAZIONE IN PLASMI:** Propagazione di onde elettromagnetiche attraverso i plasmi. Propagazione attraverso campi magnetici: la rotazione Faraday. Radiazione Cherenkov. Produzione di coppie elettrone-positrone (in plasmi termici e non-termici).

**ASTRONOMIA CHERENKOV:** tecniche di rilevazione. Docce atmosferiche. Imaging delle docce. Strumentazione. Cielo extragalattico delle VHE.

**OPACITÀ FOTONE-FOTONE E PARTICELLA-FOTONE:** Radiazioni e densità di energia del fondo extragalattico. Opacità fotonica, applicazioni a osservazioni.

**Modalità di esame :**

Discussione orale

**Criteri di valutazione :**

Conoscenze dimostrate dei vari argomenti sotto elencati e capacità di comprendere le connessioni tra loro.

**Testi di riferimento :**

Frenk King Raine, Accretion Power in Astrophysics. ;

Longair, High Energy Astrophysics. ;

Sarazin, X-ray emission from clusters of galaxies. : Review of Modern Physics 58, 1,

Ribicki & Lightman, Radiative processes in astrophysics. : Wiley, 2008

M. Vietri, Astrofisica delle Alte Energie. : Feltrinelli, 2006

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense del docente e libri

---

## ASTROFISICA DELLE GALASSIE

(Titolare: Prof. ENRICO MARIA CORSINI)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** ex Dipartimento di Astronomia  
vicolo dell'Osservatorio 3  
**Aule :** Aula C

**Prerequisiti :**

Conoscenze di base di Astronomia, Astrofisica, Fisica Generale e Calcolo Numerico.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il tema dell'attività formativa riguarda lo studio della struttura della Via Lattea e delle altre galassie usando la dinamica stellare insieme

a dati fotometrici e spettroscopici ottenuti con osservazioni da terra e dallo spazio.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali su temi relativi alla dinamica delle galassie.

**Contenuti :**

1. RICHIAMI SULLE PROPRIETÀ DELLE GALASSIE. Morfologia. Fotometria. Cinematica. Relazioni di scala.

2. TEORIA DEL POTENZIALE. Potenziale gravitazionale. Equazione di Poisson. Equazione di Laplace. Teorema di Gauss. Energia Potenziale. Tensore dell'energia potenziale. Sistemi sferici. Teoremi di Newton. Massa puntiforme. Sfera omogenea. Profilo di densità secondo la legge di Hubble modificata. Profilo di densità a legge di potenza. Sistemi assisimetrici. Potenziale logaritmico.

3. ORBITE DELLE STELLE. Costanti e integrali del moto. Superfici di sezione. Orbite in un potenziale sferico statico. Orbite in un potenziale Kepleriano. Orbite in un potenziale assisimetrico. Moto nel piano meridionale. Orbite quasi circolari: approssimazione epicyclica. Orbite in un potenziale bidimensionale non assisimetrico non rotante. Orbite di tipo "loop" e "box". Orbite stabili e instabili. Orbite in un potenziale bidimensionale non assisimetrico rotante. Integrale di Jacobi. Punti di Lagrange. Corotazione. Famiglie di orbite  $x_1, x_2, x_3, x_4$ . Cenni sulle orbite in un potenziale tridimensionale triassiale.

4. SISTEMI NON COLLISIONALI. Urti geometrici. Urti forti. Urti deboli. Tempo di attraversamento. Tempo di rilassamento. Funzione di distribuzione. Equazione non collisionale di Boltzmann. Equazione di continuità. Equazione di Eulero. Equazioni di Jeans. Applicazioni delle equazioni di Jeans. Ellissoide delle velocità. Asymmetric drift. Densità di massa nei dintorni solari. Dispersione di velocità di un sistema sferico. Degenerazione massa-anisotropia. Sistemi sferoidali con dispersione di velocità isotropa. Processi di riscaldamento del disco stellare e forma dell'ellissoide delle velocità. Teorema del viriale. Rapporto massa-luminosità dei sistemi sferici. Rotazione delle ellittiche. Teorema di Jeans. Applicazione ai sistemi sferici. Sistemi sferici con dispersione di velocità isotropa. Politropi. Sfera di Plummer. Sfera isoterma. Sfera singolare isoterma. Raggio di King. Metodo di King per determinare il rapporto massa-luminosità. Modelli di King. Raggio mareale. Parametro di concentrazione. Determinazione della funzione di distribuzione dal profilo di densità. Equazione di Eddington. Cenni sui sistemi sferici con dispersione di velocità anisotropa. Modelli di Michie.

**Modalità di esame :**

Esame orale.

**Criteri di valutazione :**

La valutazione della preparazione dello studente si baserà sulla comprensione degli argomenti trattati nel corso delle lezioni e sulla capacità di applicare le conoscenze acquisite in modo autonomo e consapevole.

**Testi di riferimento :**

Binney J., Tremaine S., Galactic Dynamics. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1987

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Tutto il materiale didattico presentato durante le lezioni viene messo a disposizione degli studenti sul sito Moodle del corso.

---

## C.I. DI ASTROFISICA GENERALE

(Titolare: Prof. SERGIO ORTOLANI)

**Indirizzo formativo:** Astronomia

**Prerequisiti :**

Conoscenze di base di astronomia generale e di fisica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Conoscenze avanzate di astronomia/astrofisica in campo galattico ed extragalattico. Planetologia di base.

**Modalità di esame :**

Valutazione scritta e/o orale.

**Criteri di valutazione :**

Capacità di analisi di problematiche osservative trattate durante il corso. Capacità espositiva.

**Moduli del C.I.:**

Astrofisica Generale (Mod. A)

Astrofisica Generale (Mod. B)

---

## ASTROFISICA GENERALE (MOD. A)

(Titolare: Prof. SERGIO ORTOLANI)

**Periodo:** 1 anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Astronomia

**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia

**Aule :** Aula C, Aula A, Aula I.Rosino

**Contenuti :**

Scopo del corso è di approfondire le tematiche di carattere osservativo-interpretativo già affrontate nei corsi della triennale e di colmare argomenti che nella triennale non trovano spazi adeguati. In una prima parte si affrontano problematiche strumentali e interpretative del dato osservativo, con particolare riferimento alla fotometria stellare.

Questa è completata con l'interpretazione dei diagrammi colore-luminosità e colore-colore (IR) nell'ambito dell'evoluzione stellare, in particolare di popolazioni giovani. Segue una seconda parte sullo studio delle proprietà fisiche dei pianeti (statistiche, formazione, atmosfere, evoluzione) e cenni allo studio dei pianeti extrasolari. La parte finale riguarda approfondimenti specifici di sorgenti legate al mezzo interstellare galattico (riga a 21 cm, resti di supernovae, maser).

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali con utilizzo di lavagna, lucidi, power point.

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense del docente.

Sono disponibili anche articoli specifici per eventuale approfondimento.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

## ASTROFISICA GENERALE (MOD. B)

(Titolare: Prof. ALESSANDRO PIZZELLA)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia  
**Aule :** aula C

**Contenuti :**

- Funzione di luminosità delle galassie, 12 ore
- classificazione ad alto redshift fotometrica e spettroscopica
- effetti dell'ambiente
- principali survey da terra a da spazio
- Il gruppo locale e l'universo vicino
- Cinematica di galassie con spettroscopia a campo integrale, 5 ore
- Relazioni di scala per le galassie ellittiche, 5 ore
- piano fondamentale e sua evoluzione in  $z$
- relazione di Kormendy, Faber-Jackson,  $D_n$ -sigma
- Relazioni di scala per le galassie a spirale, 5 ore
- relazione di Tully-Fisher e sua evoluzione in redshift
- dischi ad alta e bassa brillantezza superficiale (LSB)
- Ammassi di galassie e distribuzione della materia oscura, 5 ore
- misura della massa in ammassi di galassie: aloni X e lensing gravitazionale
- proprietà della materia oscura nelle galassie e negli ammassi di galassie
- Buchi neri supermassicci nel centro di galassie, 4 ore
- Proprietà chimiche delle popolazioni stellari nelle galassie, 4 ore
- evoluzione, arricchimento metallico e gradienti di abbondanza chimica (indici spettrofotometrici - sistema di Lick)
- $Mg$ -sigma,  $Mg$ -velocità di fuga, relazione colore magnitudine
- tasso di formazione stellare (tipi morfologici, ambiente, redshift)
- Evoluzione passiva e accrescimento gerarchico

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni in Aula con alcune esercitazioni in aula computer

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense del docente

Dispense e ausili didattici si trovano nel sito Moodle

**Testi di riferimento :**

Schneider, Peter, *Extragalactic astronomy and cosmology an introduction* Peter Schneider. Heidelberg: Springer, 2015

## C.I. DI ASTROFISICA TEORICA

(Titolare: Prof. ALBERTO FRANCESCHINI)

**Indirizzo formativo:** Astronomia

**Prerequisiti :**

Tutti i contenuti della Laurea in Astronomia e i corsi fondamentali del primo anno della Magistrale.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Conoscenze estese di astrofisica stellare, astrofisica extragalattica e cosmologia.

**Modalità di esame :**

Esami orali

**Criteri di valutazione :**

Conoscenza critica dei vari capitoli e capacità di comprendere le connessioni.

**Moduli del C.I.:**

Astrofisica Teorica (Mod. A)

Astrofisica Teorica (Mod. B)

## ASTROFISICA TEORICA (MOD. A)

(Titolare: Prof.ssa PAOLA MARIGO)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia  
**Aule :** da definire

**Contenuti :**

1. Stelle Nane Bianche.

Interno degenerare. Cristallizzazione.

Involuppo esterno.

Leggi di raffreddamento.

Effetti di diverse stratificazioni chimiche.

2. Venti Stellari.

Introduzione.

Venti Coronali. Caso Isoterma. Caso Generale.

Venti radiativi. Dinamica di base. Modelli a molte righe.

3. Stelle Variabili.

Fondamenti della Teoria delle Pulsazioni.

Trattazione Adiabatica.

Trattazione Non Adiabatica.

Instabilita' da Ionizzazione.

I Pulsatori Radiali.

I Pulsatori Non Radiali.

Elementi di Astrosismologia.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni in aula, con utilizzo sia di metodologia classica (lezioni alla lavagna) che di supporti multimediali (diapositive, filmati, applet, interfacce-web per la generazione in tempo reale di modelli stellari).

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Diapositive e altro materiale reso disponibile in formato elettronico agli studenti.

**Testi di riferimento :**

M. Salaris & S. Cassisi, *Evolution of Stars and Stellar Populations*. : John Wiley & Sons, 2005

H.J.G.L.M. Lamers & J.P. Cassinelli, *Introduction to Stellar Winds*. : Cambridge University Press, 1999

C. Aerts, J. Christensen-Dalsgaard, D.W. Kurtz, *Asteroseismology*. : A&A Library, Springer, 2010

**ASTROFISICA TEORICA (MOD. B)**

(Titolare: Prof. ALBERTO FRANCESCHINI)

**Periodo:**

I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:**

Astronomia

**Tipologie didattiche:**

48A; 6,00 CFU

**Sede dell'insegnamento :**

Dipartimento di Astronomia

**Aule :**

Aula C Dipartimento di Astronomia

**Contenuti :**

1. Evidenze sulla struttura su grande scala dell'universo

Proprietà generali e strutturali dell'universo.

Distribuzione su grande scala delle galassie. Funzioni di correlazione angolari e spaziali. Correlazioni di ordine due e superiore.

Relazione di Limber.

Power-spectrum delle strutture cosmiche. Relazioni tra power-spectrum e  $\xi(r)$ . Osservazioni della struttura su grande scala. Spettro iniziale delle perturbazioni. Mapping 3D di galassie e Nuclei Attivi.

Altre statistiche. Counts-in-cells. Cenni alla struttura frattale e topologica dell'universo.

2. Deviazioni da omogeneità e isotropia nella metrica RW. Effetti del lensing gravitazionale e sue applicazioni.

Risultato newtoniano e correzione relativistica. Potenziali della lente. Lente puntiforme e distribuzioni sferiche isoterme. Raggio di Einstein. Sezioni trasversali di lensing. Effetto del lensing sui ritardi temporali. Caustiche.

Osservazioni del lensing gravitazionale ed applicazioni cosmologiche. Stima delle masse degli ammassi di galassie. Stima della costante  $H_0$ . Effetti della costante cosmologica  $\Lambda$  nelle statistiche del lensing.

3. Evoluzione cosmologica di perturbazioni nel fluido cosmico.

Evoluzione cosmologica di perturbazioni nelle varie componenti del fluido cosmico. Equazioni generali in un universo statico e in uno in espansione. Evoluzione in un universo dominato dalla materia. Hubble drag. Relazione tra perturbazioni e campi di velocità.

Vincoli sui parametri cosmologici dallo studio dei moti su grande scala.

4. Struttura generale dell'universo: moti peculiari di galassie e strutture.

La legge di Hubble, determinazione delle distanze cosmiche. Deviazioni dalla legge di Hubble, velocità peculiari nel cosmo. Informazioni sulla struttura dal campo di velocità.

Origine dei moti su grande e piccola scala.

5. Breve storia termica dell'universo

Contenuto di materia e radiazione nell'universo. Densità di energia. Universi dominati dalla radiazione. Epochen della ricombinazione e dell'equivalenza.

Tempi scala dell'evoluzione cosmica.

Entropia cosmica per barione.

Nucleosintesi primordiale

6. Struttura generale dell'universo: la Radiazione Cosmica nelle Microonde

Scoperta della CMB. Osservazioni da terra e dallo spazio. COBE & WMAP. Origine della CMB.

Proprietà spaziali, isotropia della CMB. Strutturazione angolare della radiazione.

Origine delle fluttuazioni di intensità. Processi fisici operanti sulle grandi scale. Fluttuazioni sulle scale angolari intermedie. Contributi di sorgenti alle anisotropie sulle piccole scale (effetto SZ, sorgenti cosmiche).

Vincoli dalla CMB sui parametri cosmologici.

Spettro della CMB. Proprietà spettrali, distorsioni spettrali. Effetto Sunyaev-Zeldovich da plasmi caldi. Limiti osservativi alle distorsioni spettrali e loro implicazioni.

7. Universo primordiale, Big Bang, transizioni di fase, inflazione

Il problema degli orizzonti cosmici. Propagazione dell'informazione e visibilità dell'universo.

Singularità del Big Bang. Tempo di Planck. Il problema della quantizzazione della gravitazione

Cenni al modello standard delle particelle elementari. Interazioni fondamentali. Transizioni di fase in cosmologia. L'epoca delle transizioni di fase.

Problemi del modello standard Big Bang. Problema della costante cosmologica. Problema dell'orizzonte. Problema della piattezza.

Inflazione cosmica e sue soluzioni dei problemi.

Cenno al Principio Antropico.

8. Origine ed Evoluzione della Struttura su Grande Scala

Spettro di potenza primordiale.

Componenti di Materia Oscura (DM), calda e fredda. Scale e masse dell'orizzonte. Spettro invariante in scala. Free-streaming della DM.

Stagnazione. Funzione di trasmissione nel regime linear

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali ed esercitazioni.

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Note del docente. Testi pubblicati.

**Testi di riferimento :**

M. Longair, 2006, Galaxy Formation. : Springer, 2006

P. Schneider, Extragalactic Astronomy and Cosmology. : Springer, 2006

J. Peacock, Cosmological physics. Cambridge: Cambridge Astrophysics, 2002

## CALCOLO NUMERICO E PROGRAMMAZIONE

(Titolare: Prof. MARCO VIANELLO)

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Astronomia

**Tipologie didattiche:** 40A+24E; 7,00 CFU

**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia

**Aule :** da definire

**Prerequisiti :**

Analisi matematica 1 e 2

Algebra lineare e geometria

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Apprendere le basi del calcolo numerico in vista delle applicazioni in campo scientifico e tecnologico, con particolare attenzione ai concetti di errore, discretizzazione, approssimazione, convergenza, stabilità, costo computazionale

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Sistema-floating point e propagazione degli errori:

errore di troncamento e di arrotondamento, rappresentazione floating-point dei reali, precisione di macchina, operazioni aritmetiche con numeri approssimati, condizionamento di funzioni, propagazione degli errori in algoritmi iterativi per esempi, il concetto di stabilità

Soluzione numerica di equazioni non lineari:

metodo di bisezione, stima dell'errore col residuo pesato; metodo di Newton, convergenza globale, velocità di convergenza, convergenza locale, stima dell'errore, altri metodi di linearizzazione; iterazioni di punto fisso

Interpolazione e approssimazione di funzioni e dati:

interpolazione polinomiale, interpolazione di Lagrange, errore di interpolazione, il problema della convergenza (controesempio di Runge), interpolazione di Chebyshev, stabilità dell'interpolazione; interpolazione polinomiale a tratti, interpolazione spline; approssimazione polinomiale ai minimi quadrati

Integrazione e derivazione numerica:

formule algebriche e composte, convergenza e stabilità, esempi; instabilità dell'operazione di derivazione, calcolo di derivate tramite formule alle differenze; il concetto di estrapolazione

Elementi di algebra lineare numerica:

norme di vettori e matrici, condizionamento di matrici e sistemi; metodi diretti: metodo di eliminazione gaussiana e fattorizzazione LU, calcolo del determinante, calcolo della matrice inversa, fattorizzazione QR, soluzione ai minimi quadrati di sistemi sovradeterminati; metodi iterativi: i metodi di Jacobi e Gauss-Seidel, struttura generale delle iterazioni stazionarie, preconditionamento; metodo delle potenze per il calcolo di autovalori estremali

Introduzione ai metodi alle differenze finite per equazioni differenziali:

i metodi di Eulero esplicito ed implicito, il metodo trapezoidale, convergenza e stabilità, sistemi stiff; equazione di Poisson 1d e 2d;

metodo delle linee per l'equazione del calore

Laboratorio: implementazione e applicazione di codici numerici in Matlab e Python

**Contenuti :**

Sistema floating-point e propagazione degli errori

Soluzione numerica di equazioni non lineari

Interpolazione e approssimazione di dati e funzioni

Integrazione e derivazione numerica

Elementi di algebra lineare numerica

Introduzione ai metodi alle differenze finite per equazioni differenziali

**Modalita' di esame :**

Prova orale

**Criteri di valutazione :**

Prova orale sulla teoria e discussione delle esercitazioni di laboratorio

**Testi di riferimento :**

A. Quarteroni, F. Saleri, *Introduzione al calcolo scientifico*. : Springer,

A. Quarteroni, F. Saleri, *Scientific computing with Matlab and Octave*. : Springer,

G. Rodriguez, *Algoritmi numerici*. : Pitagora,

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

uno dei testi consigliati e dispense online del docente ([www.math.unipd.it/~marcov/studenti.html](http://www.math.unipd.it/~marcov/studenti.html))

---

## FISICA DEI PIANETI

(Titolare: Prof. FRANCESCO MARZARI)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Astronomia

**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia

**Aule :** Aula C

**Prerequisiti :**

Corsi di base del triennio

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Conoscenza della formazione ed evoluzione di sistemi planetari.

**Attivita' di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezione in aula e approfondimenti su dispense e libri di testo.

**Contenuti :**

1) Caratteristiche fisiche e dinamiche dei pianeti del Sistema Solare ed extrasolari.

2) Formazione dei pianeti da dischi circumstellari, migrazione planetaria e planet-planet scattering. Cenni di fluidodinamica e interazione mareale tra disco e pianeta.

3) Campi magnetici planetari, origine e morfologia.

4) Moto di cariche nei campi magnetici dei pianeti, fasce di Van Allen, magnetosfere, vento solare.

5) Interazione mareale pianeta-satellite e pianeta-stella, sincronizzazione spin-orbita, allungamento del giorno terrestre e allontanamento della Luna.

6) Fisica dell'interno dei pianeti, equazioni di stato e struttura.

7) Forze non gravitazionali che agiscono sui precursori dei pianeti: Poyting-Robertson drag, effetto Yarkowski, gas drag.

7) Il problema a 3 corpi ristretto, punti Lagrangiani (orbite di tipo Troiano) e loro stabilita', sfera di Hill e sue applicazioni (stelle variabili cataclismiche, satelliti di asteroidi)

8) Perturbazioni secolari nei sistemi a molti pianeti.

**Modalita' di esame :**

Esame orale

**Criteri di valutazione :**

Conoscenza degli argomenti trattati e capacita' di derivazione analitica dei risultati teorici.

**Testi di riferimento :**

Murray and Dermott, *Solar System Dynamics*. : Cambridge,

Armitage, *Astrophysics of planet formation*. : Cambridge,

Goldston and Rutherford, *Introduction to plasma physics*. : IoP,

Thompson, *An introduction to astrophysical fluid dynamics*. : Imperial college press,

Bertotti, Farinella and Vokroulicki, *Physics of the solar system*. : Kluwer,

DePater and Lissauer, *Planetary Sciences*. : Cambridge,

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Testi di riferimento,

Dispense e lucidi: [www.pd.infn.it/~marzari/teaching](http://www.pd.infn.it/~marzari/teaching)

---

## FISICA MATEMATICA

(Titolare: Prof. MASSIMILIANO GUZZO)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Informazioni in lingua non trovate  
**Aule :** Informazioni in lingua non trovate

**Prerequisiti :**

Algebra lineare ed analisi delle funzioni di più variabili.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso fornisce una introduzione allo studio delle equazioni differenziali ordinarie e a derivate parziali dal moderno punto di vista dei sistemi dinamici. Si considerano esempi di particolare importanza per l'Astronomia e la Fisica.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni teoriche ed esercitazioni in aula.

**Contenuti :**

1. Equazioni differenziali ordinarie: teorema di Cauchy; flusso; dipendenza dalle condizioni iniziali; equazioni lineari; ritratti in fase; integrali primi; punti di equilibrio; linearizzazione; spazio stabile, instabile e centrale.
2. Sistemi integrabili: esempi elementari dalla dinamica delle popolazioni, dalla meccanica e dall'astronomia; integrabilità dei sistemi meccanici, variabili di azione angolo, esempi.
3. Sistemi non integrabili: sistemi discreti, sezione di Poincaré, biforcazioni, esempi elementari. Varietà Stabile ed Instabile, chaos omoclinico; Esponenti di Lyapunov, il pendolo forzato ed altri esempi; Varietà Centrale. Il problema dei tre corpi, gli equilibri lagrangiani, le orbite di Lyapunov, le cosiddette Tube Manifolds.

GLI ARGOMENTI (4) AND (5) SEGUENTI SONO SOLAMENTE NELLA PARTE DELL'ESAME PER LA LAUREA MAGISTRALE IN ASTRONOMIA

4. PDE lineari del primo e del secondo ordine. Problemi ben posti. La corda vibrante, modi normali di vibrazione. Equazione del calore. Serie di Fourier. Equazione delle onde in domini del piano. Laplaciano in coordinate polari. Separazione delle variabili. Funzioni di Bessel. Autofunzioni del laplaciano nel piano.
5. Espressione del laplaciano in variabili sferiche. Separazione in variabili sferiche. Polinomi e funzioni associate di Legendre. Armoniche sferiche. Sviluppi di funzioni in armoniche sferiche. Sviluppi del potenziale elettrostatico. Operatore  $L^2$  e sue autofunzioni. Autofunzioni del laplaciano. Esempi: soluzioni dell'equazione delle onde nello spazio e dell'equazione di Schrodinger per l'atomo di idrogeno.

GLI ARGOMENTI (6) SEGUENTI SONO SOLAMENTE NELLA PARTE DELL'ESAME PER LA LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MATEMATICA

6. Esempi ed Applicazioni: cicli limite; esempi ed analisi di sistemi dinamici con spazio delle fasi di dimensione 3 e 5; il sistema di Lorenz, il problema dei tre corpi; esempi dalla fluido-dinamica, sistemi dinamici non autonomi, indicatori di chaos, strutture Lagrangiane Coerenti.

**Modalità di esame :**

Esame scritto

**Criteri di valutazione :**

Valutazione dell'esame scritto.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense fornite dal docente.

## FISICA SUPERIORE

(Titolare: Prof.ssa CHIARA MAURIZIO)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 56A; 7,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia

**Prerequisiti :**

Fondamenti di fisica quantistica e di struttura della materia.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

L'obiettivo formativo del corso è acquisire competenze di fisica atomica e molecolare e di meccanica statistica quantistica.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali

**Contenuti :**

- Richiami sulla trattazione quantistica degli atomi idrogenoidi, proprietà della soluzione dell'equazione di Schroedinger per un elettrone in un potenziale centrale e in particolare in un potenziale coulombiano.
- Teoria delle perturbazioni indipendenti dal tempo (caso non degenere e degenere). Teoria delle perturbazioni dipendenti dal tempo.
- Esperimento di Stern-Gerlach e spin dell'elettrone. Struttura fine degli atomi idrogenoidi: interazione spin-orbita, correzione

relativistica, termine di Darwin. Stima delle correzioni perturbative. Accenni al Lamb shift e alla struttura iperfine.  
- Particelle identiche. Operatore di scambio. Atomi a  $\pi\text{Å}^1$  elettroni. Atomo di elio. Metodo variazionale. Metodo di Hartree. Struttura elettronica degli atomi.  
- Molecole semplici: ione molecolare  $H_2^+$  e molecola  $H_2$ .  
- Interazione di atomi idrogenoidi con un campo elettrico statico e magnetico statico: effetto Zeeman (normale e anomalo), effetto Paschen-Back, effetto Stark.  
- Probabilità di transizione. Radiazione di dipolo elettrico. Regole di selezione.  
- Laser, maser. Spettroscopie di saturazione e a due fotoni.  
- Elementi di teoria dello scattering. Approssimazione di Born, scattering a bassa energia. Calcolo di sezioni d'urto. Scattering da potenziale centrale.  
- Meccanica Statistica Quantistica. Distribuzioni di Bose-Einstein e Fermi-Dirac. Esempi.

**Modalità di esame :**

Esame orale

**Criteri di valutazione :**

Sarà valutato il grado di comprensione degli argomenti svolti, l'acquisizione dei concetti e dei metodi di approssimazione proposti nel corso e la capacità di applicarli in modo critico e consapevole.

**Testi di riferimento :**

Bransden, Brian Harold; Joachain, Charles J., *Physics of atoms and molecules* B.H. Bransden and C.J. Joachain. Harlow [etc.]: Prentice Hall, 0

Gasiorowicz, Stephen, *Quantum physics* Stephen Gasiorowicz. New York etc.: J. Wiley, 0

Eisberg, Robert M.; Resnick, Robert, *Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei and particles* Robert Eisberg and Robert Resnick. New York etc.: John Wiley & Sons, 0

McGerverey, John D., *Solutions manual for introduction to modern physics* John D. McGerverey. Orlando <etc.>: Academic Press, 0

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Gli argomenti e i contenuti trattati potranno essere approfonditi e/o integrati sui testi indicati nella sezione 'Testi di Riferimento'.

## INTERFEROMETRIA ASTRONOMICA

(Titolare: Dott. MAURO D'ONOFRIO)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Da definire.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Da definire.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Da definire.

**Contenuti :**

Da definire.

**Modalità di esame :**

Da definire.

**Criteri di valutazione :**

Da definire.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Da definire.

## ISTITUZIONI DI ASTRONOMIA E ASTROFISICA

(Titolare: Dott. VALERIO NASCIMBENI)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Laurea triennale in Fisica, o altra laurea triennale dell'area scientifica che fornisca competenze di base di Fisica e Matematica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Conoscenza dei concetti teorici fondamentali dell'astronomia e dell'astrofisica moderna, assieme alle tecniche di indagine scientifica e alle relative tecnologie sviluppate in questo campo. Apprendimento dell'attuale stato delle conoscenze empiriche sull'Universo a diverse scale. Capacità di recuperare in modo efficace informazioni relative alla ricerca astronomica, sia dal punto di vista bibliografico che di archivi di dati.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali ed esercitazioni sul programma.

**Contenuti :**

Nozioni di base dell'astronomia sferica e dei tempi astronomici. Principi di Meccanica Celeste. Telescopi, strumenti e rivelatori per le osservazioni astronomiche. Tecniche di indagine astrofisica: fotometria e spettroscopia. Principi di struttura ed evoluzione stellare.

Struttura e processi fisici dell'Universo a varie scale: dal Sistema Solare alle scale  $\pi\text{Å}^1$  grandi. Strumenti e risorse per la ricerca astronomica: archivi e software.

**Modalità di esame :**

Da definirsi.



**Criteria di valutazione :**

La valutazione dello studente si baserà sull' accertamento delle conoscenze acquisite a lezione e sulla loro comprensione critica.

**Testi di riferimento :**

Karttunen, Hannu, *Fundamental astronomy*. Berlin: Springer, 2007

Carroll, Bradley W.; Ostlie, Dale A., *An introduction to modern astrophysics*. Reading MA: Addison Wesley, 1996

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Le lezioni seguiranno a grandi linee un moderno testo in inglese di astrofisica generale, e verranno eventualmente integrate con dispense del docente.

---

**LABORATORIO DI ASTROFISICA 1**

(Titolare: Dott. ROBERTO RAGAZZONI)

**Periodo:** l'anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 32A+32L; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia  
**Aule :** da definire

**Prerequisiti :**

Conoscenza dei principi basilari di fisica ed astronomia a livello del Corso di Laurea in Astronomia triennale. Conoscenza basilare dell'inglese scientifico.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

L'obiettivo del corso è quello di offrire una panoramica dei concetti basilari dei principali sviluppi tecnologici necessari per ottenere i telescopi astronomici allo stato dell'arte attuale. Questo, sia per quello che riguarda strumentazione da terra che dallo spazio, con enfasi nel dominio ottico e vicino infrarosso.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni con slide ed alla lavagna. Esperimenti ottici sono realizzati in laboratorio mediante piccoli gruppi. Esperienze notturne al telescopio di Asiago dove sono utilizzati uno o due esperimenti realizzati dagli studenti nei laboratori.

**Contenuti :**

Vedi versione in inglese.

**Modalità di esame :**

Prova orale.

**Criteria di valutazione :**

Il candidato deve essere in grado di risolvere semplici problemi di tracciamento dei raggi marginali e principali utilizzando tecniche differenziali. Ad esempio deve essere in grado di tracciare raggi fuori asse provenienti da una sorgente non risolta posta all'infinito in modo differenziale rispetto ai raggi noti per il caso in asse. Deve essere in grado di scrivere semplici relazioni matematiche per descrivere i principali sensori di fronte d'onda. Deve essere in grado di spiegare qualitativamente il funzionamento dei principali rivelatori a basso flusso di luce utilizzati in astronomia.

**Testi di riferimento :**

Daniel J Schroeder, *Astronomical Optics*. San Diego: Academic Press, 2000

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Le lezioni sono principalmente eseguite con slide proiettate. I relativi PDF sono resi disponibili agli studenti.

---

**LABORATORIO DI ASTROFISICA 2**

(Titolare: Prof. GIAMPAOLO PIOTTO)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 32A+32L; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Fisica e Astronomia, vicolo dell'osservatorio 3  
**Aule :** Aula Rosino e Aula informatica

**Prerequisiti :**

Corsi di base di astronomia e astrofisica. Conoscenze di base di evoluzione stellare. Conoscenza dei diagrammi colore-magnitudine e loro interpretazione. Conoscenze di base di fotometria stellare.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Capacità di programmare ed eseguire una osservazione di imaging al telescopio per ottenere fotometria di alta precisione, calibrata ad un sistema di magnitudini standard. Capacità di riduzione e analisi di immagini astronomiche per misure fotometriche e astrometriche di alta precisione. Capacità di analisi di una curva di luce fotometrica e di identificazione di fenomeni variabili (inclusi transiti planetari) loro periodicità. Uso di software per fotometria di alta precisione, analisi di curve di luce fotometriche, trattamento dati astronomici in generale.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali in aula.

Esperienza osservativa ad Asiago.

Esperienze in Laboratorio Informatico.

**Contenuti :**

A. Lezioni in Aula

Diagrammi colore-magnitudine e parametri (osservativi) principali che si possono estrarre da un diagramma colore-magnitudine.

Principali problemi nell'acquisizione di immagini CCDs per fotometria e astrometria stellare.

Tecniche per estrazione di fotometria e astrometria di alta precisione da immagini digitali, da terra e dallo spazio..

Metodi di ricerca di pianeti extrasolari. Transiti planetari. Breve riassunto dello stato della ricerca e caratterizzazione di exoplanets.

Tecniche di analisi di curve di luce per la ricerca di fenomeni di variabilità (inclusi transiti planetari).

Spettroscopia ad alta risoluzione e misura velocità radiali per la conferma e caratterizzazione di candidati pianeti.

## B. Osservazioni ad Asiago

Preparazione ed esecuzione di osservazioni di un transito planetario al telescopio Copernico di 182cm. I dati saranno poi ridotti ed analizzati durante l'esperienza in laboratorio.

Lezioni in laboratorio

1. Riduzione dati del transito planetario. Analisi della curva di luce. Misura dei parametri orbitali e fisici (quali istante centrale del transito  $T_0$ , inclinazione dell'orbita, raggio del pianeta  $R_p$ , rapporto semiasse orbita/raggio  $a/r$ ). Usando una curva di velocità radiale (fornita) ricavare eccentricità ( $e$ ), massa del pianeta ( $M_p$ ), densità del pianeta.

2. Riduzioni dati da archivio ESO (osservazioni da terra) per fotometria di alta precisione e astrometria di stelle di un ammasso globulare. Calibrazione fotometrica. Determinazione dei moti propri (da dati da epoche precedenti di archivio). Determinazione di membership,  $\eta$  e altri parametri dal diagramma moti propri e dal diagramma colore-magnitudine.

3. FACOLTATIVA. Riduzioni dati da archivio Hubble Space Telescope per fotometria di alta precisione e astrometria di stelle di un ammasso globulare. Calibrazione fotometrica. Determinazione dei moti propri (da dati da epoche precedenti di archivio). Determinazione di membership,  $\eta$  e altri parametri dal diagramma moti propri e dal diagramma colore-magnitudine.

### Modalità di esame :

Relazioni sulle esperienze di laboratorio

Esame Orale

### Criteri di valutazione :

RELAZIONI DI LABORATORIO:

Completezza delle relazioni sulle esperienze di laboratorio, rigore metodologico nella riduzione e analisi dei dati, rigore scientifico nella discussione dei risultati e capacità di inserirli nell'appropriateo contesto scientifico.

ESAME ORALE:

Capacità di preparazione delle osservazioni fotometriche al telescopio. Livello di conoscenza delle tecniche di riduzione e analisi dati per fotometria e astrometria di alta precisione. Livello di conoscenza del significato e dell'importanza scientifica delle esperienze eseguite e rigore di linguaggio scientifico.

### Testi di riferimento :

CONTENUTO NON PRESENTE

### Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

Materiale di studio (principalmente pubblicazioni scientifiche) verrà fornito dal docente.

## MECCANICA CELESTE

(Titolare: Dott. STEFANO CASOTTO)

<b>Periodo:</b>	I anno, 2 semestre
<b>Indirizzo formativo:</b>	Astronomia
<b>Tipologie didattiche:</b>	48A; 6,00 CFU
<b>Sede dell'insegnamento :</b>	Dipartimento di Astronomia
<b>Aule :</b>	Da definire

### Prerequisiti :

Lo studente deve conoscere i fondamenti della Meccanica Razionale e dell'Analisi Matematica, inclusa la teoria elementare delle Equazioni Differenziali Ordinarie.

Aiuta una buona dose di curiosità relativamente ai fenomeni dinamici osservati nel Sistema Solare e di sistemi planetari in generale, unitamente ad un interesse per la loro modellistica precisa ed il calcolo e il progetto di missioni di esplorazione planetaria.

### Conoscenze e abilità da acquisire :

1. Sviluppare la comprensione dei fenomeni dinamici nei sistemi gravitazionali

2. Applicazione della Meccanica Newtoniana alla soluzione dei problemi fondamentali della Meccanica Celeste dei corpi naturali e artificiali

3. Soluzione dei Problemi Inversi con applicazione alla Determinazione delle Orbite

4. Introduzione alla progettazione di orbite per l'esplorazione planetaria ed interplanetaria

5. Sviluppo di codici di calcolo numerico in Matlab (o linguaggi compilati), inclusa l'integrazione numerica delle equazioni del moto di sistemi gravitanti

6. Introduzione all'uso del sistema di simulazione General Mission Analysis Tool (GMAT)

### Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Lezioni frontali, assegnazione di compiti per casa, sviluppo di codice di calcolo in Matlab (Fortran, C++, ...), attività in laboratorio informatico, studio e analisi di argomenti speciali durante il progetto finale.

### Contenuti :

1. Le equazioni del moto dei sistemi gravitanti

2. Il Problema dei Due Corpi come problema ai valori iniziali (IVP)

3. Il Problema dei Due Corpi come problema ai limiti (BVP)

4. Manovre orbitali

5. Sistemi di riferimento spaziali e temporali

6. Il calcolo delle effemeridi kepleriane

7. Determinazione preliminare delle orbite (IOD)

8. Moto relativo kepleriano e sua generalizzazione

9. Regolarizzazione e formulazione del Problema dei Due Corpi in variabili universali

10. Il Problema dei Due Corpi BVP e il Lambert targeting
11. Il Problema dei Tre Corpi e le soluzioni omografiche
12. Il Problema Ristretto Circolare dei Tre Corpi - L'integrale di Jacobi, superfici di velocità nulla, punti lagrangiani, stabilità, orbite periodiche e loro calcolo
13. La teoria delle coniche raccordate e le traiettorie interplanetarie con assistenza gravitazionale
14. Elementi della teoria delle perturbazioni e il moto di un satellite artificiale terrestre

**Modalità di esame :**

Compiti per casa. Progetto finale con presentazione orale del rapporto finale e discussione sui risultati del progetto e altri argomenti trattati a lezione.

**Criteri di valutazione :**

Compiti per casa. 40%, Progetto finale 30%, Esame orale 30%

**Testi di riferimento :**

Danby, John M. Anthony, *Fundamentals of celestial mechanics*. Richmond (Va.): Willmann-Bell, 1988

Roy, Archie Edmiston, *Orbital motion*. New York: London, Taylor & Francis, 2005

Vallado, David A.; McClain, Wayne D., *Fundamentals of astrodynamics and applications*. Hawthorne: CA, Microcosm press, New York, Springer-Verlag, 2007

Murray, Carl D.; Dermott, Stanley F., *Solar System Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000

Cordani, B., *I cieli in una stanza. Una storia della Meccanica Celeste dagli epici di Tolomeo ai tori di Kolmogorov..* Padova: Libreriauniversitaria.it, 2016

Libreriauniversitaria.it, 2016

Curtis, Howard D., *Orbital mechanics for engineering students*. Amsterdam: Elsevier Butterworth Heinemann, 2013

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Casotto, *Lezioni di Meccanica Celeste*

## POPOLAZIONI STELLARI

(Titolare: Prof. GIOVANNI CARRARO)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Astronomia  
**Aule :** Aula C

**Prerequisiti :**

Conoscenze di base (almeno a livello di laurea di laurea triennale) di astrofisica stellare. Conoscenza di evoluzione stellare, diagrammi c-m, fotometria e spettroscopia stellare, astrometria.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Proprietà delle popolazioni stellari locali, in ammasso, nella Via Lattea, in galassie. Conoscenze base sugli osservabili e loro interpretazione per popolazioni stellari non risolte.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali

Esercizi di lettura e presentazione di alcuni articoli fondamentali

**Contenuti :**

Diagrammi colore-magnitudine

Trasformazioni luminosità-magnitudine e temperatura-colore

Interstellar reddening effects on the cm diagrams

*The concept of stellar populations: background storico*

*Popolazioni stellari: visione moderna*

*Il modello galattico di Eggen, Lynden-Bell e Sandage*

*Il modello galattico di Searle e Zinn*

*Popolazioni stellari nelle vicinanze del Sole*

*Il mezzo interstellare nelle vicinanze del Sole*

**Popolazione II**

*Misura dei parametri principali di una popolazione II: reddening, distanza, età, contenuto chimico*

*Popolazioni stellari in ammassi globulari*

*Il concetto di popolazioni stellari multiple*

*Il contenuto di He in stelle di popolazione II*

*Il ramo orizzontale e il problema del secondo parametro*

**Popolazione I**

*Popolazioni stellari nel disco galattico*

*Popolazioni stellari in ammassi aperti*

*Popolazioni stellari in galassie nane del Gruppo Locale*

*La funzione di massa iniziale*

*Parametri osservativi e loro interpretazione per le popolazioni stellari non risolte*

*Storia della formazione stellare in Galassie*

**Modalità di esame :**

Orale

**Criteri di valutazione :**

Capacità di esporre in modo adeguato e con linguaggio scientifico gli argomenti del programma

**Testi di riferimento :**

Salaris, Maurizio; Cassisi, Santi, *Evolution of stars and stellar populations* Maurizio Salaris, Santi Cassisi. Chichester: UK, Wiley, 0  
Greggio, Laura; Renzini, Alvio, *Stellar populations a user guide from low to high redshift* Laura Greggio, Alvio Renzini. Weinheim: Wiley-VCH, 2011

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Material informatico del docente

---

## PROVA FINALE

(Titolare: da definire)

**Periodo:** Il anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Astronomia

**Tipologie didattiche:** ; 40,00 CFU

---

## RELATIVITÀ GENERALE

(Titolare: Prof. GIANGUIDO DALL'AGATA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Astronomia

**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento di Fisica e Astronomia  
vicolo dell'Osservatorio, 3/2

**Aule :** Aula C

**Prerequisiti :**

Conoscenze di calcolo differenziale e integrale a una e più variabili. Elementi di algebra lineare. Algebra tensoriale. Conoscenze di base di meccanica e termodinamica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Alla fine dell'insegnamento lo studente avrà appreso i principi alla base della descrizione geometrica della gravità formulata da Einstein. Sarà familiare con i concetti di metrica, connessione, derivata covariante, curvatura, sia nella definizione matematica che nel significato geometrico e fisico. Conoscerà le principali soluzioni delle equazioni di Einstein e le principali applicazioni della Relatività Generale. Saprà descrivere sia in modo rigoroso e matematico che in modo geometrico ed intuitivo tali applicazioni e gli effetti ad esse collegati.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

L'insegnamento verrà svolto con la modalità di Flipped Classroom. Le lezioni in aula saranno condotte usando modalità di apprendimento interattivo, partendo dal lavoro svolto a casa dallo studente, e approfondendo i contenuti in classe. In classe sono previste attività individuali e di gruppo, scritte ed orali.

**Contenuti :**

Ripasso di Relatività Speciale:

Sistemi di riferimento inerziali. Principio di Relatività. Gravità Newtoniana. Principio variazionale ed equazioni di Eulero-Lagrange. Esperimento di Michelson-Morley. Relatività della simultaneità. Intervalli spaziotemporali. Coni luce. Dilatazione dei tempi e contrazione delle lunghezze. Paradosso dei gemelli. Cenni di meccanica relativistica. Lagrangiana per una particella libera. Aberrazione classica e relativistica, beaming relativistico. Effetto Doppler classico e relativistico. Distorsione di oggetti in moto relativistico. Moti superluminali. Getti relativistici.

Relatività Generale:

Principi di Mach, di Equivalenza, di General Covarianza, di Accoppiamento gravitazionale minimo, di Corrispondenza. Orologi in un campo gravitazionale. Redshift gravitazionale. Metrica della gravità Newtoniana. Spazio-tempo curvo. Sistemi di base coordinati e ortonormali. Trasformazioni generali di coordinate. Teorema della piatezza locale. Integrali in Relatività Generale. Derivata Covariante. Connessione. Trasporto parallelo. Tensore di torsione e connessione metrica. Equazione geodetica. Introduzione alla curvatura. Curvatura dal trasporto parallelo, dal commutatore delle derivate, dalla deviazione geodetica. Simmetrie del tensore di curvatura. Tensori di Ricci e di Weyl. Vettori come derivate direzionali. Forze mareali newtoniane e limite newtoniano della deviazione geodetica. Simmetrie dello spazio-tempo e leggi di conservazione in Relatività Generale. Vettori ed equazione di Killing. Tensore energia-impulso per un fluido perfetto. Equazioni di Einstein e loro interpretazione. Metrica di Schwarzschild. Potenziale effettivo. Redshift gravitazionale. Orbite esterne per la metrica di Schwarzschild. Precessione dei pericentri. Deflessione della luce. Shapiro time delay. Metrica di Robertson-Walker, equazioni di Friedmann. Giroscopi in Relatività Generale, precessione geodetica, effetto Lense-Thirring. Produzione e propagazione delle onde gravitazionali deboli.

**Modalità di esame :**

La verifica del profitto consiste in una serie di homework da realizzare durante il corso (legati alla lettura delle dispense prima delle lezioni), da una prova finale scritta e da una prova orale su tutto il programma. Per essere ammessi alla prova finale è richiesta la partecipazione ad almeno il 75% degli homework (tipicamente 9 su 12).

**Criteri di valutazione :**

Frequenza alle lezioni e completamento degli homework. Conoscenza del programma; comprensione dei meccanismi fisici alla base dei fenomeni descritti e della loro interpretazione geometrica; capacità di collegare argomenti diversi attraverso similitudini o diversità;

capacità di sintesi sul programma; elaborazione personale dei concetti appresi; pensiero originale.

**Testi di riferimento :**

S. Carroll, *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. : Addison-Wesley, 2003

A. Zee, *Einstein Gravity in a Nutshell*. : Princeton University Press, 2013

F. de Felice, C.J.S. Clarke, *Relativity on curved manifolds*. : Cambridge University Press, 1992

S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*  $\hat{e}$ ™. : Wiley, 1972

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Le dispense del corso e altro materiale didattico sono disponibili agli studenti iscritti all'insegnamento sulla piattaforma di E-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia.

Testi di riferimento oltre alle dispense:

- Hartle: *Gravity, an Introduction to Einstein's General Relativity*
- Carroll: *An Introduction to General Relativity, Spacetime and Geometry*
- Schutz: *A first course in General Relativity*
- D'Inverno: *Introducing Einstein's Relativity*
- Ohanian-Ruffini: *Gravitazione e Spazio-Tempo*
- Gron, Hervik: *Einstein's General Theory of Relativity*
- Misner, Thorne, Wheeler: *Gravitation*
- Varie risorse dalla rete

## SPETTROSCOPIA ASTRONOMICA

(Titolare: Prof. PIERO RAFANELLI)

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Astronomia  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU  
**Sede dell'insegnamento :** Dipartimento Astronomia  
**Aule :** da definire

**Prerequisiti :**

Conoscenze di base di Fisica 1 e 2, Analisi Matematica 1 e 2, Fisica atomica, Astrofisica 1 e 2.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Acquisizione e approfondimento dei concetti Fisici indispensabili per lo studio delle Nebulose Gassose

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali

Esercitazioni su dati osservativi

**Contenuti :**

- Caratteristiche dello spettro a righe di emissione di: Nebulose gassose - Nebulose diffuse - Nebulose planetarie - Novae ~ Supernova remnants- Regioni HII extragalattiche- Galassie di Seyfert di tipo I e 2 - QSO's - Star burst galactic nuclei - Liners.

- Eccitazione radiativa, Ionizzazione, Ricombinazione , Fluorescenza: la sfera di Stromgren - Emissione free-free e Bremsstrahlung - Equazione della ionizzazione per atomi complessi - ricombinazione dielettronica - Ionizzazione per collisione - Scambio di carica - Campi di radiazione stellare nel lontano ultravioletto - La fluorescenza di Bowen nello OIII e nello NIII.

- Equilibrio di fotoionizzazione: Fotoionizzazione di una nebula di solo Idrogeno -Fotoionizzazione di una nebula contenente Idrogeno ed Elio - Fotoionizzazione da He+ ad He++

- Equilibrio termico - Aumento di energia per fotoionizzazione - Perdita di energia per ricombinazione - Perdita di energia per radiazione free-free - Perdita di energia da radiazione in righe eccitate collisionalmente - Perdita di energia per eccitazione collisionale dell'Idrogeno.

Calcolo dello spettro Emesso: Righe di ricombinazione - Radiazione nel continuo  $\hat{e}$ “ Righe e continuo nel dominio radio - Probabilità di fuga di un fotone emesso in una nebula sferica ed omogenea - Effetti di trasporto radiativo nello H1 - Effetti di trasporto radiativo nello He1 ed He11 - Eccitazione collisionale dello He1.

- Fenomeni correlati alla presenza di polveri: Effetto di estinzione prodotto dalla polvere - Polvere e spettro infrarosso di Nebulae, Galassie di Seyfert etc. - Temperatura e bilancio energetico della polvere - Osservazioni infrarosse, ottiche e ultraviolette di Nebulae, Galassie di Seyfert etc. - Proprietà dei grani di polvere (rapporto polvere gas, polarizzazione lineare, variazione del rapporto  $R = A E (B-V)$  - Confronto fra le proprietà del mezzo interstellare della nostra galassia e quelle di altre galassie.

- Confronto della Teoria con le osservazioni : Misure di temperatura dalle righe di emissione - Determinazione della temperatura dal continuo ottico e da quello radio - Densità elettronica dalle righe di emissione - Temperature elettroniche e densità elettroniche dalle righe di ricombinazione radio - Radiazione ionizzante di tipo termico e non termico - Abbondanza degli elementi nelle nebulae da righe di ricombinazione e proibite.

**Modalità di esame :**

orale

La verifica del profitto avrà luogo mediante un colloquio, eventualmente con la discussione di un elaborato prodotto dallo studente su un argomento trattato durante le lezioni (facoltativo)

**Criteri di valutazione :**

Valutazione sulla verifica della capacità di ragionare con i concetti acquisiti durante il corso.

**Testi di riferimento :**

Osterbrock, D.E., *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei.* :

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

*Libro di testo e dispense manoscritte del docente*