



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



**Bollettino Notiziario - A.A. 2020/2021**

## **LAUREA MAGISTRALE IN ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY (ORD. 2019)**

### **Curriculum: Corsi comuni**

### **ASTRO-STATISTICS AND COSMOLOGY**

**Titolare:** Prof. MICHELE LIGUORI

**Mutuato da:** Laurea magistrale in Physics of Data (Ord. 2018)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Probabilità e statistica: definizione di probabilità, distribuzioni di probabilità, valor medio, varianza e covarianza, teorema di Bayes, elementi di teoria degli estimatori statistici, maximum likelihood, intervalli di confidenza, test delle ipotesi. Cosmologia: legge di Hubble, metrica di Robertson-Walker, equazioni di Friedmann-Robertson-Walker. Perturbazioni cosmologiche: instabilità di Jeans, spettro di potenza, fattore di crescita lineare delle strutture.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Dopo aver completato il corso lo studente dovrebbe aver acquisito una chiara comprensione dei concetti di base della statistica Bayesiana, ed essere in grado di applicarli in situazioni concrete, legate all'analisi di dataset astrofisici e cosmologici. In particolare lo studente dovrà avere acquisito competenze che gli permettono di: 1) Costruire estimatori statistici ottimali di parametri astrofisici e cosmologici in svariati contesti pratici. 2) Saper applicare algoritmi di Monte Carlo Markov Chain (MCMC) per inferenza Bayesiana, avendo padronanza di diversi metodi (ad es. Metropolis-Hastings, Gibbs sampling, Hamiltonian sampling) 3) Implementare algoritmi di Bayesian model selection in contesti concreti. 4) Affrontare problemi di experimental design e forecasting, attraverso l'uso della matrice di Fisher 5) Avere un approccio pratico al problema della stima degli errori, considerando le limitazioni e le problematiche legate ai diversi metodi statistici applicabili al problema in esame. Saper valutare l'impatto di effetti sistematici, in semplici situazioni, e produrre strategie per la loro mitigazione.

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

Il corso è organizzato in lezioni, il cui contenuto è presentato alla lavagna. In casi specifici si farà anche uso di trasparenze e immagini. La modalità di presentazione del corso è interattiva, con discussioni e domande in classe. Viene data enfasi alla presentazione casi studio, applicazioni e esempi concreti.

**Contenuti:**

Teorema di Bayes e probabilità Bayesiana. Scelta del prior. Inferenza Bayesiana e Monte Carlo Markov Chain (MCMC): Metropolis-Hastings, Gibbs sampling, Hamiltonian sampling. Joint likelihood. Parameter marginalization. Evidenza Bayesiana, model selection, confronto di modelli, criteri d'informazione. Matrice di Fisher per experimental design e forecasting. Esempi pratici: stima dello spettro di potenza in dataset cosmologici (fondo cosmico di microonde e struttura su grande scala), MCMC e stima di parametri cosmologici, separazione delle componenti, analisi dati per onde gravitazionali, Fisher matrix forecasting per future survey cosmologiche. Alcune parti del programma o scelte di esempi possono subire variazioni, in base alla composizione e alle competenze della classe.

**Modalità di esame:**

L'esame si svolge in due fasi: 1) Risoluzione di esercizi a casa, eventualmente da affrontare in gruppo e consegnare al docente. 3) Prova orale, con discussione sugli argomenti del corso.

**Criteri di valutazione:**

I criteri utilizzati per verificare le conoscenze e le competenze acquisite sono: 1) Comprensione degli argomenti trattati. 2) Capacità critica di collegare le conoscenze acquisite. 3) Completezza delle conoscenze acquisite. 4) Capacità di sintesi e chiarezza nell'esposizione delle conoscenze. 5) Comprensione ed utilizzo corretto della terminologia utilizzata. 6) Capacità di applicare i concetti teorici, le metodologie analitiche e le tecniche computazionali illustrate nel corso, al fine di risolvere problemi realistici di forecasting, analisi dati e stima di parametri in dataset astrofisici e cosmologici.

**Testi di riferimento:**

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Oltre ai libri di consigliati, materiale aggiuntivo di studio (note, esercizi, articoli scientifici) verrà messo a disposizione degli studenti su moodle.

## ASTRONOMICAL INTERFEROMETRY

**Titolare:** Prof. MAURO D'ONOFRIO

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

L'insegnamento richiede la conoscenza delle trasformate di Fourier e una buona conoscenza delle nozioni di analisi matematica.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Lo studente acquisirà le conoscenze avanzate di interferometria astronomica nell'ottico e nel radio e imparerà a ridurre i dati interferometrici ottenuti con l'Atacama Large Millimeter Array (ALMA) e il Very Large Telescope Interferometer (VLTI) dell'European Southern Observatory (ESO).

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

Lezioni frontali ed esercitazioni di riduzione dati interferometrici ottenuti con ALMA e VLTI.

**Contenuti:**

1) Nozioni di base di astronomia ottica e radio. 2) Telescopi ottici e radio telescopi. Risoluzione e tecniche osservative. 3) Elementi di interferometria. 4) Interferometria ottica e radio. 5) Il piano UV. 6) Sintesi di immagine in ottico e radio. 7) Elementi di disturbo e calibrazione delle osservazioni interferometriche. 8) Esercitazioni sulla riduzione dei dati interferometrici in aula informatica.

**Modalità di esame:**

L'esame è orale e consiste in un colloquio sugli argomenti trattati nell'insegnamento.

**Criteri di valutazione:**

Saranno valutate la partecipazione e l'impegno profuso durante le lezioni, la completezza delle conoscenze acquisite, la proprietà di linguaggio, la capacità di analisi e interpretazione dei dati interferometrici.

**Testi di riferimento:**

Thompson, A. Richard; Moran, James M.; Swenson Jr, George W., Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. Berlin: Springer International Publishing, 2017

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Testo di riferimento. Dispense e presentazioni PowerPoint delle lezioni fornite dal docente attraverso il sito Moodle dell'insegnamento raggiungibile dalla piattaforma e-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei" (<https://elearning.unipd.it/dfa/>).

## ASTRONOMICAL SPECTROSCOPY

**Titolare:** Prof. STEFANO CIROI

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Conoscenze di base di Fisica atomica, Astronomia, Astrofisica 1 e 2, Laboratorio di Astronomia.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

L'insegnamento prevede che lo studente acquisisca i concetti fondamentali e indispensabili per la comprensione dei processi fisici che portano alla formazione dello spettro a righe d'emissione. Tali concetti sono il prerequisito per l'analisi e la successiva interpretazione di uno spettro emesso da una regione H II e trovano applicazione in numerosi settori dell'astrofisica osservativa: stelle a righe d'emissione, nebulose gassose, regioni di formazione stellare e nuclei galattici attivi. E' inclusa nel corso una sezione relativa alle righe in assorbimento.

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

L'insegnamento prevede lezioni frontali in aula che includono spiegazioni alla lavagna per la parte teorica e videoproiezioni per mostrare i dati osservativi e il tipo di analisi che si effettua sugli stessi.

**Contenuti:**

1) Breve introduzione alla spettroscopia come tecnica osservativa. 2) Caratteristiche di spettri a righe d'emissione: nebulose gassose, Novae, Supernovae, Resti di Supernova, regioni di formazione stellare, nuclei galattici attivi. 3) Fondamenti di spettroscopia atomica: termini spettroscopici, livelli di energia, diagrammi di Grotrian e regole di selezione. 4) Popolazione dei livelli di energia: equazioni di Boltzmann e Saha, applicazioni ad alcune specie atomiche e confronto con le righe di assorbimento negli spettri stellari. 5) Trasporto radiativo. 6) Righe di assorbimento e principali meccanismi di allargamento. 7) Righe di emissione: transizioni collisionali, equazioni dell'equilibrio statistico, atomo a due livelli, righe di ricombinazione otticamente sottili, estinzione da polveri, righe proibite, atomo a tre livelli. 8) Meccanismi di emissione del continuo: ricombinazione, free-free, sincrotrone. 9) Equilibrio di ionizzazione. 10) Struttura di ionizzazione: la sfera di Stromgren. 11) Equilibrio termico.

**Modalità di esame:**

Esame orale sugli argomenti trattati a lezione.

**Criteri di valutazione:**

La valutazione dell'esame sarà basata sui seguenti criteri: 1) completezza delle conoscenze acquisite; 2) grado di comprensione raggiunto dallo studente; l'esame orale non sarà una semplice esposizione degli argomenti richiesti, ma un colloquio attivo con il docente; l'esame scritto proposto in alternativa per gli studenti stranieri consisterà in domande specifiche che richiedono risposte approfondite e dettagliate; 3) capacità di seguire ragionamenti proposti dal docente durante il colloquio; quest'ultimo criterio valido per l'esame orale verrà utilizzato solo come valore aggiunto per la valutazione finale.

**Testi di riferimento:**

Spitzer, Lyman, Physical processes in the interstellar medium, Wiley, 2004  
Osterbrock, Donald E.; Ferland, Gary, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei, Wiley, 2004  
Osterbrock, Gary J. Ferland, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei, Wiley, 2004  
Emerson, Donald S., Interpreting astronomical spectra, Chichester: J. Wiley and sons, 1996  
Aller, Lawrence Hugh, Physics of thermal gaseous nebulae: physical processes in gaseous nebulae, Wiley, 1989  
Aller, Lawrence H., Physics of thermal gaseous nebulae: physical processes in gaseous nebulae, Wiley, 1989

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Testi di riferimento. Dispense manoscritte dal docente fornite attraverso il sito web dell'insegnamento raggiungibile dalla piattaforma e-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei" (<https://elearning.unipd.it/dfa/>).

**ASTROPARTICLE PHYSICS**

**Titolare:** Prof. ANTONIO MASIERO

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

A parte le nozioni di Relatività e Meccanica Quantistica acquisite nel corso della laurea triennale, il presente corso è autoconsistente in quanto le necessarie nozioni di base di meccanica quantistica relativistica, teoria dei campi e delle particelle elementari, e di cosmologia verranno fornite durante il corso stesso.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Il corso intende fornire un'approfondita e critica comprensione delle prime fasi del nostro Universo (sino ai primi minuti dopo il Big Bang). A tal fine, porterà ad acquisire conoscenze e competenze che si estendono dalla cosmologia ed astrofisica alla fisica delle particelle elementari. Scopo principale del corso è mostrare come la connessione tra questi campi di studio porti a fertili risultati nella sinergia tra studio del primo Universo e attuali ricerche di nuova fisica al di là dei Modelli Standard della cosmologia e della fisica delle particelle: massa dei neutrini, materia oscura, energia oscura, asimmetria cosmica tra materia ed antimateria, inflazione primordiale.

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

Lezioni frontali.

**Contenuti:**

1) INTRODUZIONE: Universo osservabile e sua espansione, materia oscura, resti del Big Bang. 2) MECCANICA QUANTISTICA RELATIVISTICA: equazioni di Dirac e Klein-Gordon; antiparticelle e loro proprietà; simmetrie discrete: P, T, C ed teorema CPT. 3) TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI: campi di Klein-Gordon, Dirac ed elettromagnetico; connessione spin-statistica; teorema di Noether; tensore energia-impulso; interazione radiazione-materia: elettrodinamica quantistica QED; elementi di teoria dello scattering tra particelle elementari: matrice S, propagatori, regole di Feynman, sezioni d'urto e tassi di decadimento. 4) ROTTURA SPONTANEA DI SIMMETRIA (SSB): SSB di simmetrie discrete e globali continue: il teorema di Goldstone; SSB di simmetrie locali continue: meccanismo di Higgs; SSB a temperatura finita. 5) IL MODELLO STANDARD (SM) DELLE PARTICELLE: teoria di Fermi; teoria (V-A) x (V-A); teoria di Yang-Mills; teoria elettrodebole standard; SSB della simmetria elettrodebole; spettro di massa ed interazioni tra particelle; violazione di CP; conservazione dei numeri barionico e leptonico; scoperta del bosone di Higgs ad LHC. 6) FISICA DEL NEUTRINO: masse di Dirac e Majorana; meccanismo see-saw; neutrini massivi nello SM; oscillazione dei neutrini nel vuoto e nella materia; neutrino solari ed atmosferici; violazione di CP; esperimenti di oscillazioni dei neutrini; neutrini da Supernovae. 7) OLTRE IL MODELLO STANDARD: teorie di grande unificazione (GUTs): SSB e gerarchia di Gauge, unificazione delle costanti di accoppiamento, decadimento del protone. 8) RELATIVITÀ GENERALE: principio di equivalenza; spazio-tempo curvo; tensore energia-impulso; equazioni di Einstein, soluzione di Schwarzschild. 9) MODELLI COSMOLOGICI: modello di de Sitter; modello standard cosmologico; metrica FLRW; equazioni di Friedmann; costante cosmologica. 10) TERMODINAMICA DELL'UNIVERSO PRIMORDIALE: equilibrio termodinamico; entropia; temperature di disaccoppiamento. 11) MATERIA OSCURA (MO): evidenze osservative; equazione di Boltzmann; MO fredda e calda; particelle massive debolmente interagenti (WIMPs); candidati di MO in fisica delle particelle; limiti cosmologici sulle masse dei neutrini; ricerche dirette ed indirette di MO. 12) INFLAZIONE: problemi dell'orizzonte, della piattezza e del tempo di vita dell'Universo e dei monopoli del modello BIG BANG standard; meccanismo dell'inflazione; fluttuazioni quantistiche dell'inflazione; modelli di inflazione; energia oscura. 13) BARIOGENESI: condizioni di Sakharov; interazioni che violano i numeri barionico (B) e leptonico (L); asimmetria barionica e masse dei neutrini: leptogenesi.

**Modalità di esame:**

Esame orale.

**Criteri di valutazione:**

La valutazione della prova orale si baserà sul grado di comprensione degli argomenti affrontati a lezione e sulla capacità di esporli in maniera logica e coerente.

**Testi di riferimento:**

Stefano Profumo, An Introduction to Particle Dark Matter. London: World Scientific Publishing Europe, 2017  
Kolb, Edward; Turner, Michael, Early Universe. New York: Westview Press, 1994  
Bergstrom, Lars; Goobar, Ariel, Cosmology and particle astrophysics. Berlin: Springer, 2003  
Gorbunov, Dmitry S.; Rubakov, Valery, Introduction to the theory of the early universe hot big bang theory. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2011  
Perkins, Donald H, Particle astrophysics. Oxford: Oxford University Press, 2009

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Verranno fornite agli studenti note su tutti gli argomenti del corso. In una versione più dettagliata del programma verrà consegnato agli studenti durante lo

## ASTROPHYSICS LABORATORY 1: HIGH ENERGY INSTRUMENTATION

**Titolare:** Prof. EUGENIO ALESSIO BOTTACINI

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

**Tipologie didattiche:** +48E; 6,00

**Prerequisiti:**

Conoscenza di astronomia e/o fisica a livello di laurea triennale

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

La/Lo studentessa/studente apprenderà le basi dell'astrofisica delle alte energie che comprende i meccanismi di radiazione nel contesto astrofisico, lo stato dell'arte e le future tecnologie per i telescopi dell'astrofisica delle alte energie. L'esperienza in laboratorio, fatta in gruppi di due o tre studenti/studentesse, permetterà agli/alle stessi/stesse d'analizzare osservazioni alle alte energie compiute da telescopi spaziali. Gli/Le studenti/studentesse faranno effettiva esperienza di ricerca scientifica compiendo analisi d'immagini, analisi spettrali, analisi di timing, eseguendo fit di dati e simulando osservazioni.

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

Questo corso viene svolto online. Le informazioni per collegarsi a Zoom si troveranno su Moodle. Per le esperienze di laboratorio, gli/le studenti/esse faranno pratica (analisi dati, fit, ecc.) sul proprio computer. Per svolgere gli esercizi pratici, le istruzioni verranno fornite il primo giorno di lezione e anticipatamente su Moodle. Le esperienze in laboratorio sono il pilastro di questo insegnamento. Gli/le studenti/esse faranno le esperienze di laboratorio sul proprio computer. Come tali, il fine ultimo degli studenti è la comprensione dei processi fisici alle alte energie, l'acquisizione d'esperienza dell'analizzare dati e la valutazione critica delle esperienze in laboratorio. Gli esercizi pratici in laboratorio verranno svolti in gruppi da due o tre studenti/studentesse. Teoria e pratica vanno di pari passo ed entrambe verranno svolte in laboratorio. Come parte delle esperienze in laboratorio, gli/le studenti/studentesse produrranno un report sull'analisi di un'osservazione, trattata in laboratorio, alle alte energie. In aula affronteremo le sfide concettuali più importanti discutendo esempi osservativi e facendo calcoli esemplificativi.

**Contenuti:**

1) ottiche dei telescopi alle alte energie: ottiche a focalizzazione, ottiche non focalizzanti, rivelatori 2) missioni spaziali attuali e future, orbite di missioni spaziali, atmosfera terrestre, radiazione di fondo astrofisico e dei telescopi spaziali 3) osservazioni alle alte energie, archivi di dati, analisi dei dati 4) analisi d'immagini, analisi degli spettri, analisi di timing nel loro contesto astrofisico che include buchi neri supermassicci, dischi d'accrescimento, stelle di neutroni, resti di supernova 5) fitting di dati, simulazione dati

**Modalità di esame:**

L'esame orale verterà sugli argomenti trattati a lezione e sul report d'una osservazione alle alte energie analizzata dal gruppo durante l'esperienza in laboratorio.

**Criteri di valutazione:**

La valutazione della performance degli/delle studenti/studentesse si baserà sull'esame orale che comprende anche il report dell'osservazione, analizzata in laboratorio, alle alte energie.

**Testi di riferimento:**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Il materiale usato a lezione sarà la fonte principale delle informazioni per gli/le studenti/studentesse per questo corso. Tuttavia, studenti/studentesse interessati/e a maggiori dettagli su alcuni argomenti possono usare il seguente testo: Malcolm S. Longair, High Energy Astrophysics (3rd edition), Cambridge University Press

## ASTROPHYSICS LABORATORY 1: INFRARED AND OPTICAL INSTRUMENTATION

**Titolare:** Prof. ROBERTO RAGAZZONI

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Conoscenze di base di Fisica e Astronomia.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

L'insegnamento fornisce le conoscenze teoriche e tecnologiche utili a realizzare telescopi e strumentazione astronomica allo stato dell'arte operanti da terra e dallo spazio in particolare nelle bande visibile e infrarossa dello spettro elettromagnetico. Modalità di esame: Esame orale sui contenuti dell'insegnamento discussi a lezione.

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

Lezioni con l'uso di lavagna e presentazioni PowerPoint. Esperimenti in laboratorio di ottica. Osservazioni notturne al telescopio presso l'Osservatorio Astronomico di Asiago per verificare alcune delle esperienze condotte in laboratorio.

**Contenuti:**

1) Ottica di base e sistemi ottici: Riassunto dei principi base dell'ottica e della formazione dell'immagine. Natura della luce e geometria delle lenti sottili e delle sezioni coniche. Concetto di immagine stigmatica e non stigmatica. Copie ottiche e invariante di Lagrange. Importanza della posizione e della dimensione dello stop in un sistema ottico ed relativi effetti sulle proprietà ottiche dell'intero sistema. 2) Telescopi a due specchi: Configurazioni Schwarzschild, Cassegrain, Gregorian e Ritchey-Chretienne. Il problema del fondo per le immagini astronomiche, in particolare nell'infrarosso. Definizione delle porzioni termica e non termica dello spettro infrarosso. Vignettamento e campo di vista nei telescopi di tipo Cassegrain. Sovradimensionamento e

sottodimensionamento dello specchio secondario allo scopo di evitare il background termico prodotto dal suolo. Collimazione e re-imaging della pupilla. Differenza fra immagini prodotte da specchi parabolici e sferici e nel caso di uno schema tipo Arcibo. Esempi di telescopi e strumentazione che applica i diversi concetti studiati. 3) Ottica attiva e adattiva: Definizioni base, turbolenza atmosferica, spettro di Kolmogorov, angolo isoplanatico, parametro di Fried, frequenza di Greenwood Concetto di loop aperto e loop chiuso. Effetti su specchi deformabili e sensori di fronte d'onda. Sensore a quattro quadranti, sensibilità ed effetto del rumore Poissoniano. Sensori per la misura degli alti ordini di aberrazione: sensore di Shack-Hartman, sensore a piramide e sensore a curvatura. Concetto di ottica adattiva multiconiugata. Approcci 'star' e 'layer oriented'. Concetto di ottica adattiva con campi di vista multipli. Specchi deformabili. 4) Rivelatori: Charge Coupled Devices Detectors, principi di funzionamento e parametri base. Efficienza quantica, trasferimento di carica, rumore di lettura. Effetti sul rumore Poissoniano apparente. Concetto di L3CCD. 5) Esperienze in laboratorio di ottica: Esperienza dello spot di Poisson. Simulazione di turbolenza e formazione delle speckles. 6) Esperienza al telescopio Galileo di Asiago: Interferometria speckle allo scopo di aumentare la risoluzione nel caso di stelle binarie non risolte a causa della turbolenza atmosferica.

**Modalità di esame:**

Esame orale sui contenuti dell'insegnamento discussi a lezione.

**Criteri di valutazione:**

Lo studente dovrà dimostrare proprietà di linguaggio, piena conoscenza del programma dell'insegnamento, capacità di ragionamento nel collegare i diversi argomenti trattati a lezione, negli esperimenti in laboratorio di ottica e nelle osservazioni al telescopio e capacità critica nell'applicare le conoscenze acquisite.

**Testi di riferimento:**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Dipense del docente e articoli scientifici specifici forniti attraverso il sito Moodle dell'insegnamento raggiungibile dalla piattaforma e-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei" (<https://elearning.unipd.it/dfa/>).

## ASTROPHYSICS OF THE INTERSTELLAR MEDIUM

**Titolare:** Prof. GIOVANNI CARRARO

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

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

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

L'insegnamento si propone di fornire le conoscenze atte alla interpretazione dei fenomeni radiativi e dinamici del mezzo interstellare. La seconda parte dell'insegnamento riguarda le conoscenze di base della fluidodinamica e della magnetofluidodinamica.

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

Lezioni frontali ed esercitazioni su dati osservativi. Le lezioni sono tenute in italiano.

**Contenuti:**

1) Introduzione. 2) Equazioni della fluidodinamica, turbolenza, equilibrio termico nel mezzo interstellare. 3) Onde di shock, problema di Riemann. 4) Magnetofluidodinamica, onde di Alfvén, Campo magnetico galattico, teorema del virale generalizzato, diffusione ambipolare. 5) Soluzione numerica delle equazioni dell'idrodinamica (metodi euleriani vs metodi lagrangiani). 6) Il mezzo interstellare e i suoi traccianti: H<sub>I</sub>, CO, H<sub>2</sub>, molecole. 7) Teoria della formazione stellare, criterio di Jeans, formazione stellare sequenziale 8) Regioni HII, sfera di Stroemgren. 9) Venti stellari e resti di supernove. 10) Evoluzione chimica del mezzo interstellare.

**Modalità di esame:**

La verifica del profitto avrà luogo mediante un colloquio, eventualmente integrato con la discussione di un elaborato facoltativo prodotto dallo studente su un argomento trattato durante le lezioni e concordato con il docente.

**Criteri di valutazione:**

Verifica della conoscenze relative agli argomenti trattati durante le lezioni e le esercitazioni, della proprietà di linguaggio, della capacità di ragionare con i concetti acquisiti durante l'insegnamento in modo autonomo e critico.

**Testi di riferimento:**

Spitzer, Lyman, Physical Processes in the Interstellar Medium. New York: J. Wiley, 1998 Dyson, John Edward; Williams, David Arnold, Physics of the Interstellar Medium. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1997

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Testi di riferimento e dispense manoscritte del docente fornite attraverso il sito Moodle dell'insegnamento raggiungibile dalla piattaforma e-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei" (<https://elearning.unipd.it/dfa/>).

## CELESTIAL MECHANICS

**Titolare:** Dott. STEFANO CASOTTO

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**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 in 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. Le lezioni sono tenute in lingua inglese.

**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 raddorate e le traiettorie interplanetarie con assistenza gravitazionale. 14) Elementi della teoria delle perturbazioni e il moto di un satellite artificiale terrestre.

**Modalità di esame:**

Valutazione dei compiti per casa, del progetto finale con presentazione orale del rapporto finale e discussione sui risultati del progetto e altri argomenti trattati a lezione.

**Criteri di valutazione:**

La conoscenza degli argomenti dell'insegnamento, la proprietà di linguaggio e la capacità di discutere e collegare insieme più argomenti saranno valutati con:

1) Compiti per casa (40% del voto finale). 2) Progetto finale e presentazione (30% del voto finale). 3) Esame finale orale al momento della presentazione del progetto finale (30% del voto finale).

**Testi di riferimento:**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Dispense del docente "S. Casotto, Lezioni di Meccanica Celeste". I testi di riferimento elencati sono consigliati e non obbligatori. 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, Stamòey 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: Libreria Universitaria, 2016. Curtis, Howard D., Orbital mechanics for engineering students. Amsterdam: Elsevier Butterworth Heinemann, 2013.

**COSMOLOGY OF THE EARLY UNIVERSE**

**Titolare:** Prof. NICOLA BARTOLO

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

In genere le basi utili per seguire questo corso sono fornite dai vari corsi all' interno dei possibili percorsi.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Scopo del corso è quello di offrire allo studente gli strumenti necessari per comprendere e analizzare i principali aspetti che riguardano la fisica dell'universo primordiale, sia da un punto di vista modellistico che osservativo. Particolare attenzione sarà riservata ai temi di ricerca più attuali di questo campo.

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

Lezioni frontali con proposte di esercizi ed esempi

**Contenuti:**

Introduzione generale. Il problema delle condizioni iniziali: perturbazioni di densità primordiali all'origine della formazione delle strutture dell'universo su grande scala. - Brevi richiami ai principali problemi del modello cosmologico standard - Cosmologia inflazionaria nell'universo primordiale come soluzione ai problemi del modello standard Modellistica: - Modelli inflazionari: energia del vuoto e l'inflatone; dinamica di un campo scalare in un universo di Friedmann-Robertson-Walker; possibili realizzazioni dello scenario inflazionario - Modelli cosmologici di inflazione e loro principali caratteristiche (con esempi anche nell'ambito di fisica delle particelle delle alte energie) - Predizioni osservative dei modelli inflazionari: dalle perturbazioni quantistiche in un universo in espansione alle prime perturbazioni di densità primordiali; generazione di onde gravitazionali primordiali e loro osservabilità (effetti osservativi sia di tipo cosmologico che ad interferometri). Fase di reheating e meccanismi di bariogenesi. Formalismo Delta-N e formalismo in-in per lo studio delle perturbazioni cosmologiche. Esempio di applicazione: non-Gaussianità primordiale. Perturbazioni cosmologiche in relatività generale: - perturbazioni scalari, vettoriali e tensoriali - trasformazioni di gauge - equazioni di Einstein perturbate linearmente attorno alla metrica di Robertson-Walker Test osservativi dell'universo primordiale

**Modalità di esame:**

Esame orale

**Criteri di valutazione:**

Apprendimento dei contenuti base del corso, capacità dello studente di elaborare in modo autonomo i concetti acquisiti, capacità di ragionamento e di

applicazione degli strumenti forniti dal corso.

**Testi di riferimento:**

Andrew R Liddle and David H Lyth, The Primordial Density Perturbation. : Cambridge University Press, 2009 Andrew R Liddle and David H Lyth, Cosmological Inflation and Large-Scale Structure. : Cambridge University Press, 2000 Kolb, E.W. and Turner, M.S., The Early Universe. Redwood City: Addison-Wesley, 1990

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Le parti rilevanti del corso saranno chiaramente individuate nei testi di riferimento e per diverse parti del corso saranno a disposizione degli appunti del docente. Per alcuni argomenti saranno indicate anche alcune referenze specifiche della letteratura per possibili approfondimenti.

## EXOPLANETARY ASTROPHYSICS

**Titolare:** Prof. GIAMPAOLO PIOTTO

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Conoscenze di base (a livello di Laurea Triennale) di Fisica, Astronomia e Astrofisica.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Il corso intende dare una panoramica completa e aggiornata sulle attività di ricerca e caratterizzazione degli esopianeti, incluse le loro atmosfere. Alla fine del corso, lo studente avrà appreso le tecniche principali di ricerca degli esopianeti e del software di base per analisi di curve di luce e di velocità radiali per la determinazione dei parametri orbitali e fisici degli esopianeti. Lo studente acquisirà anche competenze di base sugli spettri delle atmosfere degli esopianeti, metodologie di acquisizione degli spettri stessi e analisi. Scopo finale del corso è portare lo studente allo stato dell'arte attuale dello studio degli esopianeti e acquisire le conoscenze di base per poterne seguire gli sviluppi, se interessato.

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

Lezioni frontali o via web. Esercizi di lettura articoli scientifici su esopianeti. Esercizi di consultazione pagine web specifiche per aggiornamento sulla ricerca e caratterizzazione di esopianeti. Esperienza (diretta o virtuale) al telescopio per osservazione del transito di un esopianeta.

**Contenuti:**

Panoramica delle proprietà dei pianeti e satelliti del Sistema Solare. Tecniche di ricerca dei pianeti extrasolari. Programmi di ricerca di pianeti extrasolari, da Terra e dallo spazio, presenti e futuri. Proprietà fisiche generali dei pianeti extrasolari. Esopianeti e sistemi planetari extrasolari di particolare interesse. Progetti di ricerca e caratterizzazione di pianeti extrasolari tramite: velocità radiali, fotometria, astrometria, transiting timing variations e altre tecniche. Ricerca di exomoons. Formazione degli esopianeti. Studio delle atmosfere esoplanetarie: tecniche, progetti presenti e futuri, risultati. Esplorazione diretta pianeti extrasolari. Osservazione diretta al telescopio di un transito di un esopianeta.

**Modalità di esame:**

Esame orale sul programma del corso

**Criteri di valutazione:**

Capacità di esporre in modo adeguato e conoscenza degli argomenti del programma dell'insegnamento. Capacità di collegare i diversi argomenti trattati a lezione. Capacità di apprendimento e sintesi articoli scientifici pubblicati sull'argomento del corso (esopianeti).

**Testi di riferimento:**

Belmonte, Juan Antonio; Deeg, Hans, Handbook of exoplanets. Cham: Springer International Publishing, 2018 Perryman, Michael A. C., >exoplanet handbook Michael Perryman. Cambridge: Cambridge University Press, 2018

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Slides del docente in moodle. Articoli scientifici suggeriti dal docente. Testi di riferimento.

## FINAL EXAMINATION

**Titolare:** da definire

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

**Tipologie didattiche:** ; 42,00

## FLUID AND PLASMA DYNAMICS

**Titolare:** Dott. TOMMASO BOLZONELLA

**Mutuato da:** Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

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

Lezioni frontali.

**Contenuti:**

Il corso presenta, ad un livello avanzato, alcuni tra i principali elementi della fisica dei fluidi neutri e dei plasmi. Il corso ha carattere generale ed interdisciplinare, e vuole fornire gli strumenti per entrare in contatto con problematiche comuni a molteplici sistemi naturali e di laboratorio quali per esempio la turbolenza e i fenomeni di riconnessione magnetica. Durante il corso si fara' riferimento ad esempi ed applicazioni sia in ambito astrofisico che fusionistico. Introduzione generale: fluidi e plasmi in natura ed in laboratorio. Caratteristiche e limiti delle teorie per la descrizione di fluidi e plasmi. L'equazione di Boltzmann non collisionale. Fluidi neutri: l'equazione di Boltzmann collisionale; le equazioni dei momenti e la derivazione della fluidodinamica. Proprietà dei fluidi ideali e derivazione macroscopica delle equazioni della fluidodinamica. Flussi viscosi. Teoria lineare di onde e instabilità. L'approccio perturbativo. Turbolenza nei fluidi neutri, la teoria di Kolmogorov. Plasmi: proprietà fondamentali ed esempi in natura e laboratorio. Teoria delle orbite. Dinamica di un sistema di molte particelle cariche. Modello cinetico per un plasma: la gerarchia BBGKY, l'equazione di Vlasov; . Il modello a due fluidi. Processi non collisionali; lo smorzamento di Landau. Il modello a fluido unico: MHD ideale e resistiva. Processi collisionali nei plasmi. Diffusione e trasporto. Esempi di instabilità MHD. Teoria delle topologie magnetiche: riconnessione magnetica, il modello di Sweet-Parker. L'elicità magnetica ed il teorema di Vortjger. La generazione del campo magnetico: l'effetto dinamo. Dinamo cinetica e dinamo MHD. Esempi di dinamo in astrofisica e laboratorio. Turbolenza MHD.

**Modalità di esame:**

Esame orale.

**Criteri di valutazione:**

Conoscenza del programma svolto e capacità di rielaborazione autonoma del materiale presentato a lezione

**Testi di riferimento:**

CONTENUTO NON PRESENTE

**FUNDAMENTALS OF ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY**

**Titolare:** Prof. SABINO MATARRESE

**Periodo:** l'anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Concetti fondamentali di meccanica quantistica e relatività speciale

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

La capacità di affrontare una classe di fenomeni fisici e astronomici la cui comprensione richiede un approccio basato su strumenti largamente interdisciplinari. La capacità di passare dalla formulazione astratta di alcuni principi fisici acquisiti nei corsi fondamentali del triennio e di strumenti matematici alla loro applicazione in un contesto per molti aspetti diverso da quello dei corsi di base.

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

Lezioni frontali

**Contenuti:**

Concetti fondamentali dell'astrofisica galattica ed extra-galattica • La Classificazione delle galassie • Proprietà statistiche della popolazione galattica • Gruppi e ammassi di galassie  
Concetti fondamentali della Cosmologia • Componenti principali dell'Universo. Evidenza osservativa della presenza di materia oscura ed energia oscura. • Universo in espansione e Principio Cosmologico. • Elemento di linea di Robertson-Walker. Proprietà geometriche. • Costante di Hubble e parametro di decelerazione. • Definizioni di distanza in Cosmologia; redshift e legge di Hubble (trattazione approssimata a bassi redshift). • Deduzione Newtoniana delle equazioni di Friedmann e correzioni relativistiche. • Modelli di Friedmann. • La costante cosmologica: soluzione statica di Einstein e modello di de Sitter. • Soluzioni per il caso piatto e per Universi con curvatura non nulla. • Trattazione esatta della legge di Hubble. Storia termica e Universo primordiale • Densità numerica, densità di energia e pressione per un sistema di particelle in equilibrio termodinamico. • Conservazione dell'entropia in un volume comovente. • Relazione temperatura-tempo in epoche primordiali. • Problemi del modello standard: orizzonte, piattezza, etc.. • "Inflazione" nell'Universo primordiale. Soluzione del problema dell'orizzonte e della piattezza. • Cinematica e dinamica dell'inflazione: l'"inflatone". • Vecchia e nuova inflazione, inflazione caotica; dinamica con lento rotolamento (cenni). • Asimmetria barionica. Bariogenesi (cenni). • Nucleosintesi primordiale degli elementi leggeri. • La ricombinazione dell'idrogeno: equazione di Saha. Disaccoppiamento della radiazione. Radiazione Cosmica alle Microonde. • Definizione generale di "disaccoppiamento". Materia oscura: proprietà generali • Equazione di Boltzmann in cosmologia e relitti cosmici. • Materia oscura calda e fredda: definizione, calcolo dell'abbondanza attuale e proprietà generali in cosmologia. Elementi di astrofisica stellare • Contrazione gravitazionale e condizioni per l'equilibrio idrostatico • Indice adiabatico ed equilibrio. • Condizioni per il collasso gravitazionale • Teoria di Jeans dell'instabilità gravitazionale • Contrazione di una protostella • Formazione stellare e gas degeneri di elettroni. • Il Sole: proprietà generali, diffusione radiativa, fusione termonucleare. • Nucleosintesi stellare • Cicli stellari. \* Diagramma di Hertzsprung-Russell. \* Elementi di struttura stellare. Modello di Clayton. Massa minima e massima per una stella. • Fasi finali dell'evoluzione stellare: nane bianche, stelle di neutroni, massa di Chandrasekhar, buchi neri. La formazione delle strutture cosmiche \* Evoluzione lineare delle perturbazioni nell'Universo in espansione (principi fondamentali). \* Collasso sferico di una protostruttura. \* Funzione di massa delle strutture cosmiche: teoria di Press-Schechter.

**Modalità di esame:**

Esame orale

**Criteri di valutazione:**

L'esame orale mira a sondare la capacità dello studente di elaborare in modo autonomo le varie problematiche affrontate nel corso, partendo da alcuni concetti fondamentali.

**Testi di riferimento:**

Coles P., Lucchin F., Cosmology, The Origin and Evolution of Cosmic Structure.. Chichester: Wiley and Sons, 2002 Kolb E.W., Turner M., The Early Universe. Redwood City: Addison-Wesley, 1990 Phillips A.C., The Physics of Stars. Chichester: Wiley and Sons, 1994 Mo H., van den Bosch F. White S., Galaxy Formation and Evolution. Cambridge: Cambridge University Press, 2010

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Le parti rilevanti per il corso dei testi di riferimento verranno indicate a lezione (e sono deducibili dagli argomenti del programma). Saranno anche forniti appunti del docente su molti argomenti.

## FUNDAMENTALS OF MODERN PHYSICS

**Titolare:** Prof.ssa CHIARA MAURIZIO

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Fondamenti di fisica quantistica e di struttura della materia.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

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

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

Lezioni frontali.

**Contenuti:**

1) Richiami: Equazione di Schroedinger per due particelle, in particolare con potenziale di interazione centrale. Armoniche sferiche e soluzione radiale. Valori di aspettazione notevoli e andamento delle soluzioni. Teorema del viriale per un atomo ad un elettrone. 2) Teoria delle perturbazioni indipendenti dal tempo, caso non degenerare e degenerare. Esempi. Teoria delle perturbazioni dipendenti dal tempo. Perturbazione accesa ad un istante  $t_0$  e poi costante, perturbazione periodica. Frequenza di Rabi. 3) Interazione di un atomo idrogenoide con la radiazione elettromagnetica. Probabilità di transizione, approssimazione di dipolo, sezione d'urto di assorbimento e di emissione stimolata. Emissione spontanea, regole di selezione in approssimazione di dipolo per un atomo idrogenoide. Spin del fotone: esperimento di Beth. Regola della somma. 4) Tempo di vita di uno stato. Profilo di una riga di emissione/assorbimento. Sezione d'urto di assorbimento. Pressure broadening e Doppler broadening. Esempi. Principio di funzionamento e caratteristiche emissive di un laser/maser. Maser ad ammoniaca. Laser a stato solido. Spettroscopie: esempi di spettroscopia sub-Doppler. 5) Effetto fotoelettrico: calcolo della sezione d'urto per emissione dallo stato  $1s$  di un atomo idrogenoide, confronto col dato sperimentale. 6) Scattering: sezione d'urto differenziale, caso anelastico e elastico. Per quest'ultimo limite di bassa (Rayleigh) e alta frequenza (Thomson). Elementi di teoria dello scattering. Sviluppo in onde parziali e calcolo corrispondente di sezioni d'urto. 7) Composizione di momenti angolari. Struttura fine di un atomo idrogenoide: interazione spin-orbita, correzione relativistica, correzione di Darwin. Termine di struttura fine complessivo. Calcolo di alcuni livelli energetici di un atomo idrogenoide. Correzione di Lamb. Struttura iperfine. Riga a  $21\text{ cm}$  dell'idrogeno. 8) Effetto Zeeman 'normale' (caso lineare, campi intensi): esempi, transizioni, condizioni di polarizzazione. Effetto Zeeman (caso lineare, interazione spin-orbita come perturbazione [Paschen-Bach]). Effetto Zeeman 'anomalo' (caso lineare, campi deboli). Effetto Zeeman per campi ultra forti. 9) Effetto Stark-Lo Surdo lineare: stato  $n=1$  e  $n=2$  per un atomo idrogenoide, transizioni  $2s \rightarrow 1s$  di un atomo di idrogeno in presenza di campo elettrico. Effetto Stark-Lo Surdo quadratico (caso  $n=2$ ), polarizzabilità statica. Quenching dello stato  $2s$  dell'idrogeno. Ionizzazione dovuta ad un campo elettrico statico (trattazione qualitativa). 10) Atomi a molti elettroni. Stato di tripletto, di singoletto. Principio di esclusione di Pauli (forma debole e forte). Atomo di elio (elettroni indipendenti, carica efficace). Stato fondamentale di un atomo a 2 elettroni: approccio perturbativo al prim'ordine. Stati eccitati puramente discreti: caso  $(1s, 2s)$ . Metodo variazionale e applicazione allo stato fondamentale di un atomo a 2 elettroni. Effetto Auger per l'elio. 11) Approssimazione di potenziale centrale per un atomo a molti elettroni. Teoria di Hartree, risultati. Determinante di Slater. Metodo di Hartree-Fock (cenni). Risultati, tavola periodica, configurazioni. 12) Correzione al potenziale centrale. Accoppiamento L-S: esempi di configurazione elettronica e degenerazione corrispondente. Accoppiamento  $j-j$ . 13) Molecole: approssimazione di Born Oppenheimer. Molecole semplici:  $H_2^+$  (combinazione lineare di orbitali atomici) e  $H_2$ . Dinamica rotazionale e vibrazionale di molecole. 14) Meccanica Statistica Quantistica. Indice di occupazione. Distribuzioni di Bose-Einstein e Fermi-Dirac. Esempi.

**Modalità di esame:**

Verranno effettuate due prove scritte parziali (una circa a metà corso e una alla fine), che consistono nella risoluzione di esercizi e in domande a risposta aperta. Il superamento di entrambe equivale al superamento dell'esame. L'esame complessivo consiste in una prova scritta e in una prova orale (quest'ultima obbligatoria solo se il voto dello scritto è')

**Criteri di valutazione:**

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

**Testi di riferimento:**

Eisberg, Robert M.; Resnick, Robert, Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles. New York: Wiley, 1985  
Bransden, Brian Harold; Joachain, Charles J., Physics of Atoms and Molecules. Harlow: Prentice Hall, 2003  
Gasiorowicz, Stephen, Quantum Physics. Hoboken: J. Wiley, 2003  
McGervey, John D., Solutions Manual for Introduction to Modern Physics. Orlando: Academic Press, 1984

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Gli argomenti e i contenuti trattati a lezione potranno essere approfonditi e/o integrati sui testi di riferimento.

## GALACTIC DYNAMICS

**Titolare:** Prof. ENRICO MARIA CORSINI

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

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

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Conoscenza della struttura e della distribuzione di massa della Via Lattea e delle altre galassie usando la dinamica stellare per interpretare dati fotometrici

e spettroscopici ottenuti con osservazioni da terra e dallo spazio. Capacità di confrontare predizioni teoriche basate sulle equazioni fondamentali dell'idrodinamica stellare con dati osservativi.

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

Lezioni frontali alla lavagna e con l'aiuto di presentazioni PowerPoint su temi relativi alla struttura e alla dinamica delle galassie. Le lezioni sono in lingua inglese.

**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 su diversi argomenti trattati a lezione.

**Criteri di valutazione:**

Lo studente dovrà dimostrare proprietà di linguaggio nel descrivere la struttura delle galassie e i fenomeni ad essa connessi, completezza delle conoscenze acquisite nel campo della dinamica dei sistemi stellari, capacità di ragionamento quando viene chiamato a collegare i diversi argomenti trattati a lezione, capacità critica nel confronto tra dati sperimentali e predizioni teoriche, capacità di risolvere semplici esercizi utili ad applicare le conoscenze acquisite.

**Testi di riferimento:**

Binney, James; Tremaine, Scott, 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 attraverso il sito web dell'insegnamento raggiungibile dalla piattaforma e-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei" (<https://elearning.unipd.it/dfa/>). Testo di riferimento.

**GENERAL RELATIVITY FOR ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY**

**Titolare:** Prof. MARCO PELOSO

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Conoscenza della Relatività Speciale

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Questo corso coprirà un'introduzione base delle fondamenta teoriche e fenomenologie della teoria della Teoria della Relatività Generale. Alla fine del corso gli studenti dovrebbero padroneggiare le tecniche di base necessarie per trovare e analizzare soluzioni delle equazioni di campo di Einstein

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

Lezioni. Compiti assegnati settimanalmente

**Contenuti:**

1. Preliminari Trasformazioni di Lorentz e somma delle velocità in relatività speciale. Geometria dello spazio-tempo piatto. Dilatazione dei tempi e contrazione delle lunghezze, e relatività della simultaneità. Quadrivettori e cinematica relativistica. Dinamica relativistica e tensore dell'energia-impulso. Principio variazionale per la meccanica Newtoniana e per un moto libero in relatività speciale. Raggi di luce ed effetti Doppler. Osservatori ed osservazioni. 2. Spazio, Tempo, e Gravità in fisica Newtoniana. Sistemi di riferimento inerziali. Il principio di relatività. Gravità Newtoniana. Massa Gravitazionale ed Inerziale. 3. Gravità come Geometria Il principio di equivalenza. Orologi in un campo gravitazionale e redshift gravitazionale. Coordinate, elemento di linea, e la metrica. Coni luce e world lines. Calcolo di lunghezza, area, volume. Vettori in uno spazio-tempo curvo. Ipersuperfici. Gravità Newtoniana in termini dello spazio-tempo (approssimazione di campo debole). 4. Le Equazioni di Einstein Trasporto parallelo e curvatura. Derivata covariante. Tensori di Riemann, Ricci, e di Einstein. La sorgente della curvatura. Equazioni di Einstein e approssimazione di campo debole. 5. Geodetiche L'equazione delle geodetiche. Simmetrie e vettori di Killing. Sistemi di coordinate localmente inerziali e sistemi in caduta libera. 6. Geometria di Schwarzschild Redshift gravitazionale. Orbite di particelle: la precessione del perielio. Orbite di raggi di luce: deflessione e ritardo temporale della luce. Test di relatività generale nel sistema solare. 7. Orizzonti e Sistemi di Coordinate Spazio-tempo di Minkowski in coordinate di Rindler. Buchi neri di Schwarzschild. Coordinate di Eddington-Finkelstein, e di Kruskal-Szekeres. Diagrammi di Kruskal e di Penrose. 8. Rotazioni e geometria di Kerr Precessione geodetica attorno ad un corpo non ruotante, e attorno ad un corpo in rotazione lenta. Metrica di Kerr e la ergosfera. 9. Cosmologia Geometria FLRW. Curvatura delle coordinate spaziali. Evoluzione in presenza di materia, radiazione, e di una costante cosmologica. Redshift cosmologico. Distanza di luminosità e angolare. 10 Onde gravitazionali (tempo permettendo)

**Modalità di esame:**

Domande sugli argomenti presentate a lezione e soluzione di un problema di grado semplice / medio.

**Criteri di valutazione:**

Conoscenza e comprensione degli argomenti del corso. Capacità di risolvere problemi elementari collegati agli argomenti del corso

**Testi di riferimento:**

James B. Hartle, Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity. : Pearson Education (US), James B. Hartle, Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity. : ,

**GRAVITATIONAL PHYSICS**

**Titolare:** Prof. GIACOMO CIANI

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Conoscenze di base di relatività generale sono suggerite, ma non essenziali.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Fondamenti di relatività generale; teoria linearizzata e onde gravitazionali (OG). Meccanismi di generazione di OG e sorgenti astrofisiche. Comprensione dei principi di funzionamento, principali limitazioni e prospettive future dei rivelatori di OG. Elementi di analisi dei segnali gravitazionali. Panoramica sullo stato attuale del campo dell'astronomia con OG.

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

Lezioni frontali con teoria ed esempi

**Contenuti:**

Elementi di relatività generale. Onde gravitazionali (OG) nella teoria linearizzata; TT-gauge e detector frame; interazione con la masse in caduta libera e corpi rigidi. Generazione di OG. Approssimazioni di quadrupolo e post-newtoniana. Perdita di energia e momento per emissione di OG. Esempi di sorgenti di OG: sistemi binari stabili e coalescenti, corpi rigidi rotanti, inspirals con rapporto di massa estremo. Rivelazione di OG. Il sistema di Hulse-Taylor. Fondamenti di segnali stocastici e teoria del rumore. Barre risonanti. Moderni interferometri per OG: principi di base, sorgenti di rumore, limitazioni fondamentali e tecniche. Esperimenti futuri. Cenni di analisi dei dati. Astronomia e scienza con le onde gravitazionali. Osservazioni attuali di collisioni fra buchi e neri e fra stelle di neutroni. Test della relatività generale. Implicazioni astrofisiche. Astronomia multi-messaggero.

**Modalità di esame:**

Esame orale mirato a verificare la comprensione concettuale degli argomenti presentati e l'abilità di affrontare correttamente e analizzare problemi specifici legati alla teoria e rivelazione delle OG.

**Criteri di valutazione:**

Lo studente deve dimostrare la comprensione e l'abilità di valutare criticamente i concetti, meccanismi e problemi legati alla generazione e rivelazione di radiazione gravitazionale.

**Testi di riferimento:**

Maggiore, Michele, Gravitational waves Michele Maggiore. Oxford: Oxford University Press, 2008 Hobson, M. P.; Efstathiou, George Petros, General relativity an introduction for physicists. Cambridge: Cambridge University Press, 2006

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Le lezioni saranno basate su trasparenze preparate dal docente, che saranno rese disponibili agli studenti in anticipo rispetto alla lezione. Porzioni di altre risorse scritte verranno indicate quando utili per parti specifiche del corso.

**HIGH ENERGY ASTROPHYSICS**

**Titolare:** Prof. ALBERTO FRANCESCHINI

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

I corsi fondamentali del I anno Laurea Magistrale in Astronomia

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Conoscenze estese degli aspetti teorici e osservativi della astrofisica delle alte energie.

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

Lezioni frontali ed esercitazioni. Le lezioni sono tenute in italiano.

**Contenuti:**

1) 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). 2) Radiazione Brehmsstrahlung: 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. 3) Dinamica del gas ed effetti sul plasma: Fondamenti di idrodinamica. Equazioni generali e leggi di conservazione. Flussi stazionari isoterme 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. 4) 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. 5) 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. Autoassorbimento 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: quasar e galassie di Seyfert. 6) raggi cosmici: Proprietà osservate dei raggi cosmici. Meccanismi di accelerazione di Fermi del primo e del secondo ordine. 7) 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 sul Compton inverso (parametro Compton, distorsioni spettrali, 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. Blazar. Produzione di Compton inverso da fotoni di altissima energia: emissione Synchrotron-Self Compton e External Compton. Boosting Doppler. Moti super-luminali. 8) 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. 9) 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). 10) Astronomia Cherenkov: Tecniche di rilevazione. Docce atmosferiche. Imaging delle docce. Strumentazione. Cielo extragalattico delle VHE. 11) Opacità fotone-fotone e particella-fotone: Radiazioni e densità di energia del fondo extragalattico. Opacità del fotone.

**Modalità di esame:**

Discussione orale sui contenuti delle lezioni.

**Criteri di valutazione:**

Conoscenze dimostrate dei vari argomenti trattati a lezione e capacità di comprendere le connessioni tra loro e di esprimerle in modo corretto e rigoroso.

**Testi di riferimento:**

Frank, J.; King, A. R., *Accretion Power in Astrophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985 Longair, Malcolm S., *High Energy Astrophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011 Sarazin, Craig L., *X-ray Emission from Clusters of Galaxies*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988 Vietri, Mario, *Astrofisica delle alte energie*. Torino: Bollati Boringhieri, 2006 Rybicki, George B.; Lightman, Alan P., *Radiative Processes in Astrophysics*. Weinheim: Wiley, 2004

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Dispense del docente e testi di riferimento. Le dispense saranno consegnate all'inizio dell'insegnamento.

**MATHEMATICAL AND NUMERICAL METHODS**

**Titolare:** Prof.ssa MICHELA MAPELLI

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Nozioni fondamentali di Analisi Matematica I e II, Algebra Lineare e Geometria. Nozioni fondamentali di Cinematica e Dinamica (Fisica Generale I). Nozioni di base di programmazione (meglio se in python).

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Gli studenti impareranno a risolvere semplici problemi di fisica/astrofisica tramite metodi numerici.

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

Ciascuna lezione consisterà in una parte di teoria e una parte di esercizi direttamente al computer.

**Contenuti:**

Ciascuna lezione consisterà in una parte di teoria e una parte di esercizi. 1. Breve riassunto delle caratteristiche del sistema operativo linux. 2. Breve riassunto delle tecniche di programmazione in python. 3. Soluzione di sistemi di equazioni lineari algebriche (Gauss-elimination, LU decomposition, Gauss-Seidel method). 4. Soluzione di equazioni non lineari (relaxation method, bisection method, Newton Raphson method). 5. Derivate numeriche. 6. Numeri casuali (random generators, uniform deviates, inversion method, rejection method); esempi di generazione di numeri casuali che seguono distribuzioni astrofisiche. 7. Integrazione di funzioni (e.g. metodo Monte Carlo, regola dei trapezi). 8. Integrazione di equazioni differenziali ordinarie (schema di Eulero, Leapfrog, Runge-Kutta, Bulirsh-Stoer, Hermite); esempi: evoluzione di un sistema binario per effetto di emissione di onde gravitazionali; il problema a N-corpi astrofisico. 9. Integrazione di equazioni differenziali parziali (finite difference methods, forward-time centered-space methods). 10. Trasformate di Fourier: the discrete Fourier transform, the fast Fourier transform. 11. Metodi di interpolazione ed estrapolazione (linear, polynomial, cubic spline); loro applicazione ad un campione astrofisico. 12. Metodi per fare i fit. 13. Librerie di python per il trattamento di dati scientifici (e.g. astropy, pandas).

**Modalità di esame:**

Esame scritto (salvo problemi legati all'emergenza covid-19).

**Criteri di valutazione:**

Gli esercizi proposti devono essere svolti in maniera corretta e completa. I partecipanti devono acquisire un'ottima padronanza delle principali tecniche numeriche discusse a lezione.

**Testi di riferimento:**

Mark Newman, *Computational Physics*. : Amazon Digital Services,

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

\* Guido van Rossum: *Python Reference Manual*. May 1995. CWI Report CS-R9525. \* Guido van Rossum: *Python Tutorial*. May 1995. CWI Report CS-R9526. \* Lecture notes \* *Numerical Methods in Engineering with Python*, Jaan Kiusalaas, Cambridge University Press, ISBN-13: 978-1107033856, ISBN-10: 1107033853 \* *Numerical Recipes in C*, W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, Cambridge University Press, ISBN-13: 978-0521431088, ISBN-10: 0521431085 \* *Computational Physics*, Mark Newman, Amazon Digital Services, ISBN-13: 978-1480145511, ISBN-10: 1480145513 \* *Computational Physics*, Rubin H. Landau, Manuel J. Paez, Cristian C. Bordeianu, Wiley-VCH

**MULTIMESSENGER ASTROPHYSICS**

**Titolare:** Prof.ssa ELISA BERNARDINI

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Il corso è indirizzato a studenti con basi di fisica delle particelle elementari e fisica nucleare.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Il corso è un'introduzione all'astrofisica multi-messaggera, da una prospettiva prevalentemente sperimentale. Gli argomenti includono (in Inglese): \* particles' interactions in matter and interactions of astroparticles \* cosmic rays and their interactions \* acceleration of cosmic rays \* propagation of cosmic rays through the galaxy and in extragalactic environments \* interactions of cosmic rays in the atmosphere and production of secondary particles \* direct and indirect measurements of cosmic rays \* cosmic rays at the most extreme energies (UHECR) and their propagation \* candidate sources of cosmic rays \* multi-messenger approach: combining information from different types of particles and waves \* gamma-ray astrophysics \* multi-wavelength observations of astrophysical sources \* neutrino astrophysics \* gravitational waves

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

Lezioni frontali ed esercizi.

**Contenuti:**

Il termine "multi-messaggero" è relativamente nuovo e sempre più in uso in astronomia e astrofisica. Si riferisce alla combinazione delle informazioni ottenute da diverse particelle e onde (messaggeri) per raggiungere una comprensione più esaustiva degli oggetti astrofisici che osserviamo. La luce visibile rivela infatti solo una porzione dei misteri dell'Universo. Osservazioni astronomiche moderne combinano dati ottenuti a varie lunghezze d'onda, dal radio, ottico, fino agli estremi dello spettro elettromagnetico osservato, nei raggi gamma. Sorgenti in grado di emettere raggi gamma delle energie più estreme, sono ritenute in grado di accelerare particelle ad energie che eccedono quelle attualmente raggiungibili ai grandi laboratori per lo studio delle particelle e delle loro interazioni. Alcune di queste particelle accelerate da sorgenti astrofisiche possono raggiungere la Terra sotto forma di raggi cosmici, scoperti oltre 100 anni fa. Tali raggi cosmici possono interagire in prossimità delle sorgenti che li emettono, dando origine ad altre particelle secondarie, quali i neutrini e i raggi gamma. Mentre i raggi cosmici sono deviati dai campi magnetici intergalattici durante il loro cammino, neutrini e raggi gamma, essendo particelle neutre, mantengono memoria della loro direzione di origine. La loro traiettoria può quindi essere utilizzata per identificare le sorgenti astrofisiche che li hanno prodotti. I neutrini sono particelle evanescenti e molto difficili da rivelare. Sono necessari strumenti del volume dell'ordine di un kilometro-cubo per rivelare i neutrini di energie superiori alle decine di GeV. L'anno 2013 ha assistito alla scoperta dei neutrini di origine cosmica per mano dell'esperimento IceCube situato in Antartide, inaugurando una nuova finestra di osservazione dell'Universo. Gli oggetti astrofisici più estremi, legati agli eventi più violenti nel nostro Universo, sono spesso associati a buchi neri o oggetti compatti quali stelle di neutroni. Quando due corpi astrofisici di questo tipo orbitano in un sistema legato, sono ritenuti in grado di emettere onde gravitazionali. L'anno 2015 ha assistito alla prima rivelazione di onde gravitazionali (GW150914) emesse pochi istanti prima della fusione di due buchi neri, misurate dai rivelatori LIGO negli Stati Uniti. La scoperta è stata celebrata dal Premio Nobel per la fisica. L'anno 2017 ha vissuto il trionfo dell'astrofisica multi-messaggera con l'identificazione della prima sorgente di neutrini cosmici, la blazar TXS 0506+056, coadiuvata dalle osservazione elettromagnetiche che hanno risposto alla diffusione delle coordinate di un neutrino di alta energia, IceCube-170922A. Questo evento ha seguito di pochi giorni un'altro trionfo dell'astrofisica multi-messaggera: la rivelazione di onde gravitazionali (GW170817) dovute alla fusione di due stelle di neutroni e associate ad un lampo di raggi gamma (GRB 170817A). Entrambi i risultati dimostrano il potenziale dell'astrofisica multi-messaggera nell'osservare e comprendere i fenomeni più estremi e misteriosi nel nostro Universo. Questo corso ne illustra i fondamenti.

**Modalità di esame:**

Esame orale.

**Criteri di valutazione:**

1 - Capacità di risolvere problemi ed esercizi sugli argomenti trattati nel corso. 2 - Capacità di esporre in modo chiaro e consapevole i temi trattati nel corso.

**Testi di riferimento:**

Perkins, Donald H., Particle astrophysics D.H. Perkins. Oxford: Oxford University Press, 2009  
Spurio, Maurizio, The Probes of Multimessenger Astrophysics. : Springer, 2019  
De Angelis, Alessandro; Pimenta, Mário João Martins, Introduction to particle and astroparticle physics multimessenger astronomy and its particle physics foundations Alessandro De Angelis, Mario Pimenta. Cham: Springer, 2018  
Longair, Malcolm S., High energy astrophysics Malcolm S. Longair. Cambridge: Cambridge University Press, 2011

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Verranno utilizzati prevalentemente i libri di testo sotto indicati. Materiale integrativo (risultati sperimentali in forma grafica, materiale riassuntivo in formato PDF) verrà fornito durante le lezioni.

**NUCLEAR ASTROPHYSICS**

**Titolare:** Prof. ANTONIO CACIOLLI

**Mutuato da:** Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Elementi di meccanica quantistica, fisica nucleare e di fisica generale

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

il corso si propone di fornire una preparazione teorica e sperimentale che consentiranno allo studente di intraprendere attività di ricerca nell'ambito dell'astrofisica nucleare.

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

Lezioni in aula (o su zoom in caso sia necessario)

**Contenuti:**

Reazioni termonucleari. Definizione di sezione d'urto, fattore S astrofisico, tasso di reazione e derivazione del picco di Gamow. Bruciamenti nucleari nelle stelle durante le fasi idrostatiche ed esplosive. Cenni di modellistica stellare. Bruciamento dell'idrogeno: catene p-p, cicli CNO, NeNa, MgAl Bruciamento dell'elio: reazioni 3-alpha e alpha + 12C. Reazioni di bruciamenti nucleari avanzati (C, Ne, O, Si). I processi di cattura neutronica (s e r: lento e rapido). Per ogni argomento verrà data una panoramica dei risultati più rilevanti nella letteratura recente. Calcolo del rateo di reazione in casi specifici (cattura diretta, risonanze strette, risonanza larghe) Come svolgere un esperimento in Astrofisica Nucleare (ogni aspetto del corso verrà discusso in relazione alle strutture sperimentali in attività e legati agli ultimi risultati scientifici prodotti). Cenni sul fondo di radiazione naturale Metodi di schermatura dei rivelatori Perché è utile fare un esperimento in un laboratorio underground. Tecniche di accelerazione per ioni carichi Cenni su tipologie di sistemi di rivelazione (neutroni, gamma, particelle cariche) e tecniche di calibrazione dei rivelatori Derivazione sperimentale della sezione d'urto Tipologie di bersagli, loro caratteristiche pro e contro (gas, jet e solid target). Produzione e studio dei target e come questo influenza la misura sperimentale. Cenni sui metodi indiretti in astrofisica nucleare (THM, ANC, ...).

**Modalità di esame:**

Una presentazione di massimo 10 minuti su un tema astrofisico (sia dal punto di vista teorico che sperimentale) e domande legate alla presentazione e al programma svolto nel corso.

**Criteri di valutazione:**

Accertamento della comprensione e della padronanza degli argomenti trattati.

**Testi di riferimento:**

C. E Rolfs e W. S. Rodney, *Couldrons in the Cosmos*. : The University Chicago Press, 1988 Iliadis C., *Nuclear Physics of Stars*. : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KgaA, 2007

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Diapositive e altro materiale reso disponibile in formato elettronico agli studenti. Articoli su riviste scientifiche presentati nel corso.

## PLANETARY ASTROPHYSICS

**Titolare:** Prof. FRANCESCO MARZARI

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Corsi di base del triennio

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Conoscenza dei meccanismi fisici alla base della formazione ed evoluzione di sistemi planetari.

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

Lezione in aula e approfondimenti su dispense e libri di testo. Nel caso persistessero le condizioni di attuale emergenza, le lezioni verranno erogate in modalità duale, ovvero contemporaneamente in presenza e registrate per la fruizione da remoto.

**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. 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 Yarkovski, gas drag. 7) Il problema a 3 corpi ristretto, punti Lagrangiani (orbite di tipo Troiano) e loro stabilità, sfera di Hill e sue applicazioni (stelle variabili cataclismiche, satelliti di asteroidi) 8) Perturbazioni secolari nei sistemi a molti pianeti. 9) Equazioni della fluidodinamica e loro applicazione ai dischi circumstellari 10) Risonanze in moto medio

**Modalità di esame:**

Esame orale. In caso persistano le condizioni di emergenza attuali l'esame potrà essere svolto in forma telematica (Zoom o Skype).

**Criteri di valutazione:**

Conoscenza degli argomenti trattati e capacità 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, Bertotti, Farinella and Vokroulicki, *Physics of the solar system*. : Kluwer, DePater and Lissauer, *Planetary Sciences*. : Cambridge, Thompson, *An introduction to astrophysical fluid dynamics*. : Imperial college press,

**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)

## SUBNUCLEAR PHYSICS

**Titolare:** Prof.ssa DONATELLA LUCCHESI

**Mutuato da:** Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

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

**Prerequisiti:**

Principi di fisica nucleare e sub-nucleare, principi di meccanica quantistica, dinamica relativistica, teoria dei campi quantistici, grafici di Feynman, radiazione di interazione con la materia.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Metodologie sperimentali per lo studio della fisica sub-nucleare. Fenomenologia del modello standard: interazioni elettromagnetiche, forti e deboli. Elementi della fisica dei neutrini oltre il modello standard e della fisica di Higgs.

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

Lezioni frontali tramite computer da tavolo, utilizzo di animazioni e piccoli film. Possibilità di seminari da parte di esperti.

**Contenuti:**

Introduzione e riepilogo Strumenti per il calcolo Rivelatori per esperimenti di fisica delle particelle Sezione trasversale  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  ed  $e^+e^- \rightarrow h\bar{h}$  Scattering anelastico profondo The Gluon QCD, partoni e getti Interazione Electroweak: introduzione Test sperimentali di interazione Electroweak Teoria di Cabibbo e matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Violazione di CP e T, il sistema del mesone B. Test di CKM Neutrino e modello standard Proprietà di Higgs

**Modalità di esame:**

L'esame si baserà su un compito assegnato in anticipo agli studenti. Sarà costituito da esercizi o domande aperte e da una discussione su argomenti aperti tra quelli discussi durante le lezioni. Durante la discussione possono essere poste domande sugli argomenti della classe.

**Criteri di valutazione:**

The exercises will be evaluated on the basis of correctness and simplicity in the execution. The discussion together with the answers will be evaluated considering the correctness, conciseness and the clarity of exposition.

**Testi di riferimento:**

Peskin, Concepts of elementary particle physics. : Oxford, Martin and Halzen, Quarks and leptons. : John Wiley and son,

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Le lezioni saranno disponibili su Moodle.

**Curriculum: Observations, experiments and interpretation**

**ASTROPHYSICS LABORATORY 2**

**Titolare:** Prof. LUCA MALAVOLTA

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Observations, experiments and interpretation

**Tipologie didattiche:** +48L; 6,00

**Prerequisiti:**

Insegnamenti di base di astronomia e astrofisica. Conoscenze di base di evoluzione stellare. Conoscenze di base di fotometria stellare e spettroscopia.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Capacità di programmare ed eseguire una osservazione al telescopio per ottenere fotometria di alta precisione. Capacità di riduzione e analisi di immagini astronomiche per misure fotometriche di alta precisione. Capacità di analisi di una curva di luce fotometrica e di identificazione di fenomeni variabilità (inclusi transiti planetari) e loro periodicità. Uso di software per fotometria di alta precisione, analisi di curve di luce fotometriche, analisi combinata di curve di luce e velocità radiali per la caratterizzazione di sistemi planetari, trattamento dati astronomici in generale.

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

Lezioni frontali in aula. Esperienza osservativa presso l'Osservatorio di Asiago (in presenza o virtuale a seconda delle disposizioni sanitarie). Esperienze in laboratorio informatico.

**Contenuti:**

A. Lezioni frontali in aula. 1) Principali problemi nell'acquisizione di immagini CCD per fotometria. 2) Tecniche per estrazione di fotometria di alta precisione da immagini digitali, da terra e dallo spazio. 3) Tecniche di estrazione delle velocità radiali di alta precisione ed effetti dell'attività stellare. 4) Metodi di ricerca di pianeti extrasolari. Transiti planetari. Breve riassunto dello stato della ricerca e caratterizzazione dei pianeti extrasolari. Tecniche di analisi di curve di luce per la ricerca di fenomeni di variabilità (inclusi transiti planetari). Tecniche di analisi combinata di fotometria e velocità radiali per la caratterizzazione dei pianeti extrasolari. B. Esperienza osservativa presso l'Osservatorio di Asiago (in presenza o virtuale a seconda delle disposizioni sanitarie) Preparazione ed esecuzione di osservazioni di un transito planetario al telescopio Copernico di 182 cm. I dati saranno poi ridotti ed analizzati durante l'esperienza in laboratorio. C. Esperienze in laboratorio informatico. 1) Riduzione dati del transito planetario. 2) Analisi della curva di luce ottenuta presso l'Osservatorio di Asiago in combinazione con dati provenienti da spazio. 3) Misura dei parametri orbitali e fisici (quali istante centrale del transito, inclinazione dell'orbita, raggio del pianeta, rapporto semiasse orbita/raggio). Inclusione delle velocità radiali per la misura della massa planetaria e confronto della densità planetaria con i modelli di composizione internal.

**Modalità di esame:**

Valutazione delle relazioni sulle esperienze di laboratorio ed esame orale.

**Criteria di valutazione:**

1) Criteri di valutazione delle 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'appropriato contesto scientifico. 2) Criteri di valutazione dell'esame orale: Capacità di preparazione delle osservazioni fotometriche al telescopio. Livello di conoscenza delle tecniche di riduzione e analisi dati per fotometria di alta precisione. Livello di conoscenza del significato e dell'importanza scientifica delle esperienze eseguite. Rigore di linguaggio scientifico.

**Testi di riferimento:**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Tutto il materiale di studio (principalmente pubblicazioni scientifiche) verrà fornito dal docente attraverso il sito Moodle dell'insegnamento raggiungibile dalla piattaforma e-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei"

**ASTROPHYSICS OF GALAXIES**

**Titolare:** Prof. ALESSANDRO PIZZELLA

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Observations, experiments and interpretation

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

**Prerequisiti:**

Conoscenze di base sulla astrofisica extragalattica. In particolare sulla morfologia, profili fotometrici, cinematica delle galassie.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Lo studente acquisirà conoscenze riguardo le moderne frontiere sullo studio della formazione ed evoluzione delle galassie.

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

Lezioni frontali in aula con uso della lavagna e di presentazioni PowerPoint. Alcune esercitazioni sono svolte in aula informatica.

**Contenuti:**

1) Funzione di luminosità delle galassie: Classificazione fotometrica e spettroscopica delle galassie ad alto redshift. Effetti dell'ambiente. Principali survey da terra e dallo spazio. Il Gruppo Locale e l'universo vicino. 2) Cinematica di galassie con spettroscopia a campo integrale. 3) Relazioni di scala per le galassie ellittiche: Piano fondamentale e sua evoluzione in redshift. Relazione di Kormendy. Relazione di Faber-Jackson. Relazione Dn-sigma. 4) Relazioni di scala per le galassie a spirale: Relazione di Tully-Fisher e sua evoluzione in redshift. Dischi ad alta e bassa brillantezza superficiale. 5) Ammassi di galassie e distribuzione della materia oscura: Misura della massa in ammassi di galassie (aloni X e lenti gravitazionali). Proprietà della materia oscura nelle galassie e negli ammassi di galassie. 6) Buchi neri supermassicci nel centro di galassie. 7) Proprietà chimiche delle popolazioni stellari nelle galassie: Evoluzione, arricchimento metallico e gradienti di abbondanza chimica (indici spettrofotometrici, sistema di Lick). Relazione Mg-sigma. Relazione Mg-velocità di fuga. Relazione colore-magnitudine. Tasso di formazione stellare (tipi morfologici, ambiente, redshift). Evoluzione passiva e accrescimento gerarchico.

**Modalità di esame:**

Esame orale volto a valutare la comprensione delle problematiche trattate da parte del candidato

**Criteria di valutazione:**

Verrà valutata la conoscenza degli argomenti trattati a lezione e il livello di assimilazione dei concetti più importanti.

**Testi di riferimento:**

Schneider, Peter, An Introduction to Extragalactic Astronomy and Cosmology. Heidelberg: Springer, 2015

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Dispense del docente e presentazioni Powerpoint forniti attraverso il sito Moodle dell'insegnamento raggiungibile dalla piattaforma e-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei" (<https://elearning.unipd.it/dfa/>). Il testo di riferimento copre solo una parte del programma dell'insegnamento.

**OBSERVATIONAL ASTROPHYSICS**

**Titolare:** Prof. SERGIO ORTOLANI

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Observations, experiments and interpretation

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

**Prerequisiti:**

Conoscenze di base di fisica ed astrofisica.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Scopo dell'insegnamento è di approfondire alcune delle tematiche più significative di carattere osservativo-interpretativo della planetologia e dell'astrofisica stellare, galattica ed extragalattica introdotte negli insegnamenti della triennale.

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

Lezioni frontali con utilizzo di lavagna, lucidi e presentazioni PowerPoint.

**Contenuti:**

Nella prima parte si affrontano le problematiche strumentali e interpretative dei dati osservativi di fotometria. In particolare effetti strumentali e correzioni per reddening da fotometria a larga banda. Segue l'interpretazione dei diagrammi colore-luminosità e colore-colore infrarossi nell'ambito dell'evoluzione

stellare delle popolazioni stellari giovani. Nella seconda parte si studiano le proprietà fisiche dei pianeti con cenni ai pianeti extrasolari. La terza parte riguarda approfondimenti specifici da parte del mezzo interstellare galattico. 1) Richiami di nozioni di base di astrofisica: magnitudini stellari, modulo di distanza, indicatori di metallicità. Misure di distanza. 2) Rapporto segnale-rumore dei dati osservativi. Calibrazione. 3) Effetti dell'arrossamento interstellare. 4) Popolazioni stellari giovani. Diagrammi HR e diagrammi a due colori infrarossi. 5) Generalità e regolarità nel Sistema Solare. 6) Le atmosfere dei pianeti. Meccanismi di perdita di atmosfere. 7) Temperature effettive dei pianeti ed effetto serra. 8) Origine ed evoluzione del Sistema Solare. Teoria di Urey e Lewis. Datazione del Sistema Solare. Formazione della Terra. 9) Caratteristiche generali del pianeta Marte. Confronto con la Terra. 10) Cenni alle tecniche di rivelazione dei pianeti extrasolari. 11) Il gas nella Galassia, riga dell'HI a 21 cm. 12) Resti di supernova ed elementi di base dei modelli evolutivi. 13) Sorgenti maser stellari e interstellari.

**Modalità di esame:**

Esame orale o scritto con domande aperte sugli argomenti trattati a lezione.

**Criteri di valutazione:**

Capacità di analisi e conoscenza delle problematiche trattate durante l'insegnamento. Capacità di esporre con chiarezza e rigore gli argomenti studiati. Capacità di collegare i diversi temi discussi a lezione e di confrontare criticamente i dati osservativi con le interpretazioni teoriche.

**Testi di riferimento:**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Dispense del docente fornite attraverso il sito Moodle dell'insegnamento raggiungibile dalla piattaforma e-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei" (<https://elearning.unipd.it/dfa/>). Sono disponibili anche articoli scientifici su argomenti specifici per eventuali approfondimenti.

<b>OBSERVATIONAL COSMOLOGY</b>
--------------------------------

**Titolare:** Prof. ALBERTO FRANCESCHINI

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Observations, experiments and interpretation

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

**Prerequisiti:**

Il corso è auto-consistente, fatte salve le conoscenze di fisica e matematica delle lauree triennali in Astronomia o Fisica.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Il corso fornisce un quadro riguardante la struttura generale e la storia evolutiva dell'universo e sue componenti, ivi compresi materia ed energia oscura, materia barionica, componenti radiative. Le principali fasi evolutive del cosmo e le principali strutture (struttura su grande scala della materia oscura e storia evolutiva dei barioni) sono oggetti di indagine. Osservabili e modalità osservative fondamentali necessari per raggiungere i principali risultati sono discussi.

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

Lezioni frontali ed esercitazioni.

**Contenuti:**

1) Struttura su grande scala dell'universo. Distribuzione su grande scala delle galassie. Funzioni di correlazione angolari e spaziali. Correlazioni di ordine 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. Mappe 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 Robertson-Walker. 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: 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) Radiazione cosmica nelle microonde (CMB): Scoperta della CMB. Osservazioni da terra e dallo spazio. COBE e WMAP. Origine della CMB. Proprietà spaziali, isotropia della CMB. Strutturazione angolare della radiazione. Origine delle fluttuazioni d'intensità. Processi fisici operanti sulle varie scale. Fluttuazioni sulle scale angolari intermedie. Contributi di sorgenti alle anisotropie sulle piccole scale (effetto Sunyaev-Zeldovich, sorgenti cosmiche). Vincoli dalla CMB sui parametri cosmologici. Spettro fotonico della CMB. Proprietà spettrali, distorsioni spettrali. Effetto Sunyaev-Zeldovich da plasmi caldi. Limiti osservativi alle distorsioni spettrali e loro implicazioni. 7) Cenni all'universo primordiale: Big Bang, transizioni di fase, inflazione. Il problema degli orizzonti cosmici. Singularità del Big Bang, tempo di Planck. Transizioni di fase in cosmologia. Problemi del modello standard a Big Bang. Problema dell'orizzonte e della piattezza. Inflazione cosmica e sue soluzioni dei problemi. Principio Antropico. 8) Origine ed evoluzione della struttura su grande scala. Spettro di potenza primordiale, invariante in scala. Materia oscura calda e fredda. Scale e masse dell'orizzonte. Free-streaming della materia oscura. Stagnazione. Funzione di trasmissione nel regime lineare. Evoluzione non lineare. Teoria di Press-Schechter. 9) L'universo dopo la Ricombinazione. Gas intergalattico diffuso, righe d'assorbimento in spettri di quasar. Nubi Lyman-alpha. Barioni mancanti. Storia della formazione stellare e produzione di elementi. Radiazioni di fondo. Evoluzione di AGN e relazione con l'evoluzione delle galassie. Origine della funzione di massa delle galassie.

**Modalità di esame:**

Colloquio orale

**Criteri di valutazione:**

Si richiede una comprensione dei concetti fisici fondamentali che riguardano le tematiche del corso. Deduzioni fisico/matematiche sono opzionali (pur utili occasionalmente per ricostruire un certo processo). Lo studente dovrebbe dimostrare di poter rappresentare sinteticamente le principali modalità osservative alla base dei risultati.

**Testi di riferimento:**

Longair, Malcolm S., Galaxy Formation. Berlin: Springer, 2008 Schneider, Peter, Extragalactic Astronomy and Cosmology. Heidelberg: Springer, 2015 Peacock, John A., Cosmological Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 2010

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Dispense del docente e testi di riferimento. Le dispense saranno consegnate all'inizio dell'insegnamento.

**STELLAR ASTROPHYSICS**

**Titolare:** Prof. ANTONINO MILONE

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Observations, experiments and interpretation

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

**Prerequisiti:**

Conoscenze di base di astrofisica stellare (fotometria e spettroscopia stellare, astrometria, evoluzione stellare).

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Durante il corso verranno acquisite le principali proprietà delle popolazioni stellari locali, negli ammassi stellari, nella Via Lattea e nelle galassie. Le studentesse e gli studenti del corso impareranno ad interpretare le osservazioni di popolazioni stellari e ad utilizzare queste informazioni per investigare e fare luce sulle principali problematiche dell'astrofisica stellare e della cosmologia.

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

Lezioni frontali. Discussione di alcuni articoli fondamentali della letteratura scientifica su astrofisica e popolazioni stellari.

**Contenuti:**

1) Diagrammi colore-magnitudine: correzioni bolometriche trasformazioni luminosità-magnitudine e temperatura-colore, effetti dell'arrossamento interstellare. 2) Concetto di popolazione stellare: cenni storici, visione moderna. Ammassi stellari e popolazioni stellari semplici. La funzione di massa iniziale. 3) Determinazione dei parametri fisici e strutturali delle stelle e dei parametri principali delle popolazioni stellare (es. età, assorbimento, distanza) tramite fotometria. 4) Composizione chimica delle popolazioni spettrali. Applicazioni: il problema del litio cosmologico, stelle che ospitano pianeti. 5) Binarie, Blue Stragglers, Binarie X, buchi neri ed altri oggetti esotici in ammassi stellari. 6) Stelle di popolazione III. A caccia delle prime stelle dell'universo. 7) L'alone galattico - galassie ultra faint - galassie nane del gruppo locale - ammassi globulari. Popolazioni stellari multiple. Ramo orizzontale elio e il problema del secondo parametro. 8) Il Bulge galattico 9) Il disco galattico Ammassi aperti. Popolazioni stellari multiple in ammassi aperti e il fenomeno del turn off esteso. Popolazioni stellari nei dintorni del sole. 10) Formazione stellare nella Via Lattea e nelle galassie nane.

**Modalità di esame:**

Esame orale sugli argomenti trattati a lezione.

**Criteri di valutazione:**

Conoscenza degli argomenti del programma, capacità di esporli in modo adeguato e con linguaggio scientifico appropriato, atteggiamento critico nel discutere il confronto tra teoria e osservazioni.

**Testi di riferimento:**

Cassisi, Santi; Salaris, Maurizio, Old stellar populations how to study the fossil record of galaxy formation Santi Cassisi and Maurizio Salaris. Weinheim: Wiley-VCH, 2013 Greggio, Laura; Renzini, Alvio, Stellar populations a user guide from low to high redshift risorsa elettronica Laura Greggio and Alvio Renzini. Weinheim: Wiley-VCH, 2011 Greggio, Laura; Renzini, Alvio, Stellar populations a user guide from low to high redshift risorsa elettronica Laura Greggio and Alvio Renzini. Weinheim: Wiley-VCH, 2011

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Testi di riferimento. Materiale didattico del docente fornite attraverso il sito Moodle dell'insegnamento raggiungibile dalla piattaforma e-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei" (<https://elearning.unipd.it/dfa/>).

**Curriculum: Theory and modelling****ADVANCED ASTROPHYSICS**

**Titolare:** Prof.ssa PAOLA MARIGO

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Theory and modelling

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

**Prerequisiti:**

Astrofisica generale, fondamenti di processi radiativi e di evoluzione stellare

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Scopo del corso è di fornire agli studenti una panoramica su argomenti selezionati di frontiera nell'ambito dell'astrofisica stellare, con particolare riferimento alle metodologie di indagine teorica.

**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).

**Contenuti:**

1) Venti stellari: Introduzione. Venti coronali: Caso isoterma. Caso generale. Topologia della soluzione dell'equazione del momento. Venti di tipo "line-driven": Dinamica di base. Accelerazione radiativa per una singola riga. Caso otticamente spesso e caso otticamente sottile. Modelli a molte righe. Formalismo di Castor-Abbott-Klein. Applicazione a stelle calde e luminose. Venti di tipo "dust-driven": Equazioni del momento del gas e della polvere. Velocità di deriva. Forza di trascinamento. Accoppiamento dinamico gas-polvere. Grani di polvere: composizione chimica e proprietà ottiche. Il limite "single scattering". Opacità dei grani di polvere. Sezione d'urto dei grani. Opacità media di Planck (silicati, grafite, carbonio amorfo). Raggio di condensazione e temperatura delle polveri. Effetto della pulsazione nella regione subsonica. Applicazione a stelle giganti rosse. 2) Stelle variabili. Panoramica su storia, osservazione e classificazione. Introduzione alla teoria delle pulsazioni stellari, tempi scala, relazione periodo-densità media, linearizzazione. Approssimazione adiabatica e LAWE. Oscillazioni non-adiabatiche, condizioni di stabilità, approssimazione quasi-adiabatica. Eccitazione: meccanismi  $\epsilon$  e  $\kappa$ + $\gamma$ , opacity bump, fascia di instabilità classica. Variabili RR Lyrae e Cefeidi. Giganti rosse variabili. Cenni su oscillazioni non-radiali e astrosismologia. 3) Morte e destino finale di stelle massicce e molto massicce: electron-capture supernovae, core-collapse supernovae, pair-instability supernovae, kilonovae a seguito della fusione di stelle di neutroni. Fisica delle esplosioni e relative incertezze. Esplosioni riuscite e fallite. I resti compatti (stella di neutroni, buco nero, nessuno). La relazione massa iniziale - massa finale. Nucleosintesi esplosiva.

**Modalità di esame:**

Esame scritto e/o orale

**Criteri di valutazione:**

La prova di esame è volta ad accertare l'acquisizione delle conoscenze di base degli argomenti trattati, le capacità di ragionamento e di spirito critico dello studente.

**Testi di riferimento:**

Hansen, Carl J., Kawaler, Steven D, Trimble, Virginia, Stellar Interiors. : Springer, 2004 Lamers, J. G. L. M.; Cassinelli, Joseph P., Introduction to Stellar Winds. Cambridge: Cambridge University Press, 1999 Aerts, Conny; Christensen-Dalsgaard, Jorgen; Kurtz, Donald W., Asteroseismology. Dordrecht: Springer, 2010

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

Diapositive delle lezioni e altro materiale reso disponibile attraverso il sito Moodle dell'insegnamento raggiungibile dalla piattaforma e-learning del Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei" (<https://elearning.unipd.it/dfa/>). I testi di riferimento sono consigliati e non obbligatori.

**COMPACT OBJECT ASTROPHYSICS**

**Titolare:** Prof. ROBERTO TUROLLA

**Periodo:** Il anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Theory and modelling

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

**Prerequisiti:**

Elettrodinamica, Istituzioni di Astrofisica e Cosmologia, Relatività speciale

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Scopo del corso è di fornire agli studenti una panoramica delle proprietà osservative e della modellistica delle Sorgenti Compatte Galattiche di raggi X

**Contenuti:**

Oggetti Compatti. Fasi finali dell'evoluzione stellare. Core-collapse supernovae. Nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri. Complementi di Relatività Generale. Metrica esterna di Schwarzschild e sue proprietà. Moto geodetico in Schwarzschild. Metrica interna di Schwarzschild, strutture in equilibrio idrostatico, equazione di Tolman-Oppenheimer-Volkoff. Metrica di Kerr (cenni). Gas degeneri. Statistiche quantistiche (richiami). Equazioni di stato per un gas completamente degeneri; limite non-relativistico e ultra-relativistico. Massa di Chandrasekhar. Accrescimento su oggetti compatti. Oggetti compatti isolati ed in sistemi binari. Geometria di Roche. Accrescimento wind- e Roche lobe-fed. Efficienza, limite di Eddington. Accrescimento sferico. Soluzione di Bondi-Hoyle. Dischi di accrescimento. Il modello standard (alpha-disc). Spettro di radiazione per gli alpha-disc. Stelle di neutroni. Campo magnetico e rotazione. Frenamento magneto-rotazionale. Stime del campo magnetico e dell'età da misure del periodo e della derivata del periodo. Il diagramma P-Pdot. Magnetosfera, cilindro di luce. Correnti di Goldreich-Julian.

**Modalità di esame:**

Prova orale

**Criteri di valutazione:**

La prova orale è volta ad accertare l'acquisizione delle conoscenze di base dell'astrofisica relativistica, le capacità di ragionamento e di comprensione dello studente.

**Testi di riferimento:**

Nobili, L., Astrofisica relativistica : fondamenti di relatività generale e fluidodinamica relativistica. Padova: CLEUP, Frank, J., King, A.R., Raine, D.J., Accretion power in astrophysics. Cambridge: Cambridge University Press, Shapiro, S.L., Teukolsky, S.A., Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects. Hamburg: Wiley,

**RADIATIVE PROCESSES IN ASTROPHYSICS**

**Titolare:** Prof. ROBERTO TUROLLA

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Theory and modelling

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

**Prerequisiti:**

Elettrodinamica, relatività speciale, astrofisica generale

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Scopo del corso è di fornire agli studenti i fondamenti dei processi radiativi in un contesto astrofisico

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

Lezioni frontali con esercizi ed esempi

**Contenuti:**

Il campo di radiazione Proprietà fondamentali della radiazione. L'intensità specifica e i suoi momenti. Emissione, assorbimento e scattering. Il trasporto radiativo. Radiazione termica. L'approssimazione di diffusione. Onde e particelle Onde elettromagnetiche piane. Polarizzazione, i parametri di Stokes. Potenziali elettromagnetici; il potenziale di Liènard-Wiechart per una carica. Radiazione da un sistema di cariche non-relativistiche, l'approssimazione di dipolo. Bremsstrahlung Emissione da un singolo elettrone. Emissione da una popolazione di elettroni termici. Assorbimento di Bremsstrahlung. Bremsstrahlung da cariche relativistiche (cenni). Scattering da elettroni liberi Scattering Thomson e Compton. Scattering su cariche in moto. Scattering multipli su elettroni termici non-relativistici. Comptonizzazione, il parametro  $y$  e l'equazione di Kompaneets. Comptonizzazione da cariche in moto ordinato. Radiazione di sincrotrone Potenza emessa per ciclotrone e sincrotrone. Spettro di sincrotrone per una singola carica e per una distribuzione di elettroni a legge di potenza. Polarizzazione della radiazione di sincrotrone. Auto-assorbimento di sincrotrone. Transizioni radiative Trattazione semi-classica. Coefficienti di Einstein e oscillatori. Regole di selezione. Probabilità di transizione, transizioni bound-bound and bound-free per l'idrogeno. Meccanismi di allargamento delle righe spettrali.

**Modalità di esame:**

Prova orale

**Criteri di valutazione:**

La prova orale è volta ad accertare l'acquisizione delle conoscenze di base dei processi radiativi in astrofisica, le capacità di ragionamento e di comprensione dello studente.

**Testi di riferimento:**

Rybicki, G.B., Lightman, A.P., Radiative processes in astrophysics. New York: Wiley, 1985

## THEORETICAL COSMOLOGY

**Titolare:** Prof. SABINO MATARRESE

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Theory and modelling

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

**Prerequisiti:**

Le conoscenze acquisite nel corso di Istituzioni di Astrofisica e Cosmologia.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Scopo del corso e' quello di familiarizzare lo studente con i principali argomenti di ricerca della cosmologia moderna e a fornire i principali strumenti di analisi e di calcolo utilizzati in ambito cosmologico.

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

Lezioni frontali. Dimostrazioni al computer.

**Contenuti:**

Introduzione generale • Equazioni di Friedmann dalle equazioni di Einstein per la metrica di Robertson-Walker La Radiazione Cosmica di Fondo (CMB) • Equazione di Boltzmann e ricombinazione dell'idrogeno: oltre l'equazione di Saha • Equazione di Boltzmann nell'Universo perturbato: la funzione di distribuzione dei fotoni • Trattazione dei termini di collisione • Equazione di Boltzmann per i fotoni in approssimazione lineare • Equazione di Boltzmann per la materia oscura fredda (CDM) in approssimazione lineare • Equazione di Boltzmann per i barioni in approssimazione lineare • Equazione di evoluzione per la funzione di brightness dei fotoni ? • Equazioni di Einstein perturbate al prim'ordine (perturbazioni scalari) • Condizioni iniziali • Evoluzione su scale super-horizon • Oscillazioni acustiche e limite di tight coupling • Free-streaming – ruolo della visibility function • Cenni sull'evoluzione dei potenziali gravitazionali e Silk damping • Espressione per i multipoli dell'anisotropia in temperatura ?! • Spettro angolare dell'anisotropia in temperatura ed effetto Sachs-Wolfe su grande scala • Piccole scale angolari: picchi acustici (cenni sul ruolo dei parametri cosmologici) L'instabilità gravitazionale • Instabilità gravitazionale nell'Universo in espansione • Equazioni di Boltzmann per un sistema di particelle non collisionali e il limite di fluido • Approssimazione di Zel'dovich • Approssimazione dell'Adesione. • Soluzione dell'equazione di Burgers 3D. • Approccio basato sull'eq. di Schroedinger. Metodi statistici in cosmologia • Ipotesi ergodica e di "fair sample" • Funzioni di correlazione a N-punti • Spettro di potenza e teorema di Wiener-Khintchine • Metodi di filtraggio • Up-crossing regions e picchi del campo di densità • Campi random Gaussiani e non-Gaussiani \* Approccio a path-integral alle perturbazioni cosmologiche

**Modalità di esame:**

L'esame può essere svolto con due differenti modalità. 1. Esame orale tradizionale sugli argomenti fondamentali trattati nel corso. 2. (solo per gli studenti che abbiano frequentato il corso) Tesina scritta su un argomento trattato nel corso e concordato con il docente. La tesina dovrà contenere una trattazione approfondita dell'argomento scelto, basata sullo studio di articoli di review e/o capitoli di libri. Il contenuto della tesina, che verrà poi esposto durante un colloquio con il docente, dovrà altresì provare l'acquisizione da parte dello studente della conoscenza dei principali argomenti trattati a lezione.

**Criteri di valutazione:**

Capacità di elaborazione autonoma del materiale trattato a lezione.

**Testi di riferimento:**

Dodelson, S., Modern Cosmology. Amsterdam: Academic Press, 2003 Coles P. and Lucchin F., Cosmology: The Origin and Evolution of Cosmic Structure. Chichester: Wiley and Sons, 2001 Vittorio N., Cosmology. Boca Raton - London - New York: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2018

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio:**

## THEORETICAL PHYSICS

**Titolare:** Prof. STEFANO RIGOLIN

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Theory and modelling

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

**Prerequisiti:**

Meccanica classica e quantistica.

**Conoscenze e abilità da acquisire:**

Il corso offre una prima introduzione alle teorie quantistiche di campo.

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

Lezioni alla lavagna.

**Contenuti:**

1. Classical and quantum mechanics of particles. Lagrangian, action, principle of least action, Hamiltonian, Poisson brackets, Quantization, Symmetries in Quantum Mechanics, Schrodinger, Heisenberg and interaction picture. 2. Classical field theory. Functional derivative. Principle of least action for fields, Hamiltonian, Hamilton equations. 3. Symmetries and conservation laws. Noether's theorem, Spacetime symmetries and conserved quantities, internal symmetries and conserved charges. 4. Scalar field. Classical real scalar field. Klein-Gordon equation and solution. Canonical quantization. Normal ordering. Fock space. Microcausality. Classical and quantum complex scalar field. Internal symmetry and conserved charge. The scalar propagator. 5. Spinors. Lorentz group and its representations. Spinor fields. Lagrangian for a Dirac spinor field. General solution of the Dirac equation. Energy and helicity projectors. Canonical quantization for the Dirac field (and anticommutators). Fermion propagator. Minimal coupling and covariant derivative. Non-relativistic limit, gyromagnetic factor. 6. Vector fields. Classical vector field. Proca equation. Classical electromagnetic field theory. Gauge invariance. Lorentz gauge. Gauge fixing. Lagrangian and Hamiltonian densities in the Feynman gauge. General solution. Covariant quantization. Fock space and indefinite metric. Unphysical polarizations. Gupta-Bleuler condition. Propagator. 7. Interactions. Interactions in a classical field theory. The S-matrix expansion and transition probability. T-products. 8. QED. S-matrix expansion in QED. Feynman diagrams in coordinate space and in momentum space. 2->2 scattering processes. Photon and electron self-energies. The Compton scattering. QED Feynman rules. The cross-section.

**Modalità di esame:**

Scritta. Soluzione di uno o più problemi.

**Criteri di valutazione:**

Conoscenza e comprensione degli argomenti del corso. Capacità di risolvere problemi elementari legati alle tematiche del corso.

**Testi di riferimento:**

Greiner, Reinhardt, Field Quantization. : Springer, 1995 Mandl, Franz; Shaw, Graham, Quantum field theory Franz Mandl, Graham Shaw. Hoboken: John Wiley, 2010