



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**SCUOLA DI SCIENZE**

**Bollettino Notiziario**

Anno Accademico 2017/2018

**Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)**

---

# Curriculum: Corsi comuni

---

---

## Curriculum: NuPhys - Nuclear Physics

---

### ADVANCED PHYSICS LABORATORY A

(Titolare: Prof. GIAMPAOLO MISTURA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** NuPhys - Nuclear Physics  
**Tipologie didattiche:** 16A+32L; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Laboratori degli anni precedenti e conoscenze di base di elettronica e ottica.

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Capacit  di progettare e realizzare autonomamente un apparato sperimentale di misura. Capacit  di analizzare criticamente i risultati per individuare possibili cause di errori sistematici. Capacit  di utilizzare le conoscenze acquisite nel percorso di studi per analizzare i dati e ottenere una misura affidabile di una data grandezza fisica.

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

Il corso ha un carattere prettamente sperimentale. Gli studenti partecipanti saranno ripartiti in gruppi da 2 - 3 persone ai quali sar  affidata la realizzazione di una esperienza di fisica da scegliere a piacere fra quattro tipologie di esperimenti: elettronica, ottica, fisica delle particelle, fisica nucleare e fisica dello stato solido. Sono previste anche delle lezioni frontali nelle quali verranno dati elementi generali di fisica sperimentale.

**Contenuti :**

Tecniche generali di fisica sperimentale moderna. In particolare saranno approfonditi elementi di elettronica, ottica, criogenia e tecnica del vuoto.

**Modalita' di esame :**

Relazione scritta ed esame orale.

**Criteri di valutazione :**

Autonomia nello svolgimento dell'esperienza, capacit  di analisi critica dei risultati. Saranno inoltre valutate positivamente soluzioni originali proposte dallo studente al fine di condurre o migliorare le esperienze proposte.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense scritte dai responsabili del corso scaricabili dal web.

---

### INTRODUCTION TO MANY BODY THEORY

(Titolare: Prof. PIER LUIGI SILVESTRELLI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** NuPhys - Nuclear Physics  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Metodi Matematici

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Il corso si propone di illustrare le tecniche, fondate sulla teoria quantistica dei campi non relativistici, che permettono di determinare il comportamento meccanico-statistico-quantistico della materia.

**Contenuti :**

Formalismo della seconda quantizzazione.

Operatori di particella singola e doppia in seconda quantizzazione.

L'hamiltoniano dei sistemi coulombiani.

Funzioni di Green a due punti: valore medio di un operatore di particella singola, energia dello stato fondamentale, rappresentazione di Lehmann.

Teorema adiabatico e determinazione perturbativa dello stato fondamentale.

Teorema di Wick e grafici di Feynman per i sistemi fermionici a  $T=0$ .

Self-energia, grafici di polarizzazione (interazione efficace),

equazioni di Dyson.

Energia dello stato fondamentale del gas di elettroni degeneri ("jellium" model) nella ring approximation (RPA).

Teoria della risposta lineare; applicazioni:

schermaggio della carica elettrica (oscillazioni di Friedel),

oscillazioni di plasma, sezione d'urto differenziale per lo

scattering anelastico di elettroni (cenni).

Sistemi Bosonici interagenti a  $T=0$  (cenni).

Funzioni di Green a temperatura finita: teorema di Wick Matsubara e relativi grafici di Feynman.

**Modalità di esame :**

Orale più eventuali esercizi in itinere.

**Criteri di valutazione :**

Conoscenze teoriche di base e capacità di applicazione del formalismo in casi di interesse fisico.

**Testi di riferimento :**

A.L. Fetter, J.D. Walecka, Quantum theory of many-particle system. New-York: McGraw-Hill,

## INTRODUCTION TO RADIATION DETECTORS

(Titolare: Prof. ROBERTO STROILI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** NuPhys - Nuclear Physics

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

**Prerequisiti :**

Conoscenza dei fenomeni elettromagnetici, incluse onde elettromagnetiche.

Nozioni di base di relatività ristretta e di meccanica quantistica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Principi e metodi di rivelazione di particelle e della radiazione elettromagnetica. Come si misurano posizione, energia, quantità di moto, e velocità. Tecniche di accelerazione di particelle cariche.

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

Durante il corso verranno presentati mediante lezioni frontali gli argomenti riportati nella sezione "contenuti". Gli argomenti affrontati verranno corredati da esempi ed esercizi per una migliore comprensione le modalità di applicazione dei concetti esposti.

**Contenuti :**

A. Descrizione dei fenomeni fisici considerati: introduzione sulle grandezze misurate negli esperimenti di fisica nucleare, subnucleare e astroparticellare. Perdita di energia di particelle cariche. La formula di Bethe-Block, discussione e applicazioni quantitative ai rivelatori. Identificazione di particelle.

Diffusione Colombiana multipla. Bremsstrahlung, lunghezza di radiazione, spettro della radiazione.

Interazioni fotoni-materia, coefficiente di assorbimento, effetto fotoelettrico, effetto Compton, produzione di coppie.

Radiazione Cerenkov. Cenni alla radiazione di transizione.

Interazioni nucleari.

Scintillazione nei materiali inorganici ed organici. Perdita di energia in un gas, diffusione, effetto di un campo elettrico, velocità di deriva, effetto di un campo magnetico. Perdita di energia in un semiconduttore.

B. Requisiti di rivelatori costruiti in base agli effetti descritti: contatori a scintillazione, contatori Cerenkov, contatori a ionizzazione.

Camere a fili proporzionali, camere a deriva e TPC. Tubi a streamer limitati, RPC. Rivelatori a semiconduttore. Cenni all'elettronica di trigger e di lettura.

Misura dell'energia e misura della quantità di moto. Struttura generale dei rivelatori attuali.

C. Gli acceleratori di particelle. Acceleratori elettrostatici. Acceleratori lineari. Ciclotrone. Il sincrotrone: stabilità trasversa, focalizzazione debole, oscillazioni di betatrone, matrici di trasporto, focalizzazione forte, quadrupoli e funzioni separate. Cenni all'emittanza, stabilità di fase, oscillazioni di sincrotrone, diagrammi di fase, struttura a pacchetti. Cenni alla radiazione di sincrotrone. Anelli di accumulazione: luminosità, accumulazione di antiprotoni, raffreddamento stocastico.

**Modalità di esame :**

Orale.

**Criteri di valutazione :**

Verranno valutati il livello di apprendimento degli argomenti in programma e la capacità di applicazione a casi pratici.

**Testi di riferimento :**

S. Tavernier, Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics. : Springer, 2010

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

E' a disposizione degli studenti copia delle trasparenze usate nel corso.

## NUCLEAR ASTROPHYSICS

(Titolare: Dott. ANTONIO CACIOLLI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** NuPhys - Nuclear Physics

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

**Prerequisiti :**

Elementi di meccanica quantistica e di fisica generale

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

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

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

Lezioni in aula.

**Contenuti :**

Reazioni termonucleari.

Definizione di sezione  $\sigma$ , fattore  $S$  astrofisico, tasso di reazione e derivazione del picco di Gamow.

Brucciamenti nucleari nelle stelle durante le fasi idrostatiche ed esplosive.

Cenni di modellistica stellare.

Brucciamento dell'idrogeno: catene p-p, cicli CNO, NeNa, MgAl

Brucciamento dell'elio: reazioni 3-alpha e  $\alpha + ^{12}\text{C}$ .

Reazioni di bruciamenti nucleari avanzati (C, Ne, O, Si).

I processi di cattura neutronica (s e r: lento e rapido).

Per ogni argomento verra' data una panoramica dei risultati piu' rilevanti nella letteratura recente.

Calcolo del rate di reazione in casi specifici (cattura diretta, risonanze strette, risonanza larghe)

Come svolgere un esperimento in Astrofisica Nucleare (ogni aspetto del corso verrÃ discusso in relazione alle facility sperimentali in attivita' e legati agli ultimi risultati scientifici prodotti)

Cenni sul fondo di radiazione naturale

Metodi di schermatura dei rivelatori

PerchÃ 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  $\sigma$

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,  $\alpha$ !)

**Modalita' di esame :**

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

**Criteri di valutazione :**

Accertamento della comprensione e della padronanza degli argomenti trattati.

**Testi di riferimento :**

C. E. Rolfs and W. S. Rodney, *Couldrons in the Cosmos*. : The Chicago University Press, 1988

C. Iliadis, *Nuclear Physics of Stars*. : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2007

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

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

## NUCLEAR PHYSICS

(Titolare: Prof.ssa SILVIA MONICA LENZI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:**

1 anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:**

NuPhys - Nuclear Physics

**Tipologie didattiche:**

48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Meccanica quantistica.

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Lo studente approfondira' alcuni degli argomenti visti nel corso di Istituzioni di Fisica Nucleare della Laurea Triennale e sara' introdotto a nuovi argomenti sia sulle reazioni nucleari, sia sulla struttura del nucleo. Il corso fornisce una buona conoscenza delle proprieta' del nucleo atomico che implica l'utilizzo di modelli a molti corpi. Inoltre verranno presentati e discussi i problemi piu' attuali della Fisica Nucleare. Lo studente sara' in grado di interpretare le diverse proprieta' e modi di eccitazione dei nuclei.

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

Le lezioni si svolgono con l'ausilio di slides.

**Contenuti :**

Programma di Fisica Nucleare 2017/2018

Parte prima: Struttura del nucleo e modelli nucleari

Dall'interazione nucleone-nucleone all'interazione efficace nel nucleo.

Grandezze conservate

Simmetrie nella struttura dei nuclei

Metody sperimentali per la struttura nucleare

Modelli nucleari:

1) Modelli collettivi:

Modello della goccia liquida, Modello a gas di Fermi: applicazioni, Deformazione nucleare,

Eccitazioni collettive,

Moti vibrazionali,

Moti rotazionali,

Energy Density Functional

2) Modello Microscopici:

Modello di Hartree Fock,  
Modello a shell interattivo,  
Modello di Nilsson.

## Parte Seconda: Reazioni nucleari

Introduzione: proprietà del nucleo

- energia di legame
- equazione semiempirica di massa
- proprietà elettromagnetiche statiche dei nuclei: Momenti di multipolo

Le forze nucleari e il potenziale nucleare

- interazione nucleone-nucleone
- Il deutone
- isospin
- diffusione nucleone-nucleone
- proprietà delle forze nucleari

Reazioni Nucleari

- considerazioni generali: Cinematica delle collisioni a due corpi
- tipi di reazione e le osservabili coinvolte
- diffusione elastica e sezione d'urto di reazione
- reazioni di nucleo composto
- reazioni di Knock-out

Reazioni con Ioni Pesanti

- reazioni di trasferimento quasi-elastico di nucleoni
- aspetti fenomenologici delle reazioni nucleari alla barriera Coulombiana,
- fusione completa, formazione e decadimento del nucleo composto
- reazioni di fusione di interesse astrofisico
- tecniche sperimentali

Verranno considerati come esempi e argomenti di discussione gli aspetti che riguardano la formazione di nuclei  $\alpha$  e superpesanti, le reazioni con nuclei instabili.

### Modalità di esame :

L'esame consiste in una prova orale con eventuale presentazione di un lavoro di ricerca su argomenti diversi proposti dal docente.

### Criteri di valutazione :

Buon dominio dei principali argomenti del corso.

### Testi di riferimento :

Kris Heyde, *Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1999

### Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

I libri di testo e le slides messe a disposizione dai docenti nel sito moodle. Inoltre verrà messo a disposizione altro materiale di rassegna di carattere didattico sugli argomenti più attuali della fisica nucleare teorica, sperimentale e applicata.

## PHYSICS LABORATORY

(Titolare: Dott. FRANCESCO RECCHIA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** 1 anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** NuPhys - Nuclear Physics  
**Tipologie didattiche:** 16A+48L; 6,00 CFU

### Prerequisiti :

Laboratori della Laurea Triennale.

### Conoscenze e abilità da acquisire :

Scopo del Corso è di addestrare all'uso di strumentazione per esperimenti di Fisica delle Interazioni fondamentali, Materia e Astrofisica e degli strumenti di analisi dati. Lo studente sarà in grado di gestire autonomamente un apparato di misura, acquisire ed analizzare i dati e valutare l'accuratezza dei risultati ottenuti.

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

Lezioni introduttive per la descrizione delle esperienze (16 ore, 2 CFU). Saranno poi formati gruppi di 3 studenti. Ciascun gruppo realizzerà 3 esperimenti.

### Contenuti :

Questo corso presenta agli studenti alcuni esperimenti di Fisica Moderna che permettono l'approccio a tecniche di misura utilizzate nella pratica attuale della Ricerca Scientifica in di Fisica delle Interazioni fondamentali, Materia e Astrofisica. Ogni studente svolgerà tre esperimenti.

Gli esperimenti proposti sono i seguenti: 1) Raggi Cosmici 2) Scattering Compton 3) Decadimento del positronio 4) Imaging con raggi gamma 5) Timing rapido 6) Fisica dei plasmi 7) Fluorescenza X 8) Radioattività naturale & Radon Counting. Nei primi cinque esperimenti gli studenti impareranno ad usare vari tipi di scintillatori per la rivelazione di particelle e raggi gamma e dell'elettronica associata. Verranno costruiti eventi multiparametrici tramite l'uso di tecniche di coincidenze. Gli eventi saranno processati utilizzando un software evoluto (ROOT) per arrivare alla definizione del risultato finale. Nell'esperimento di Fisica dei Plasmi gli studenti studieranno le condizioni che permettono di innescare un plasma a partire da una piccola quantità di gas neutro e studieranno le caratteristiche fisiche

del plasma tramite misure elettriche. Gli studenti entreranno a contatto con le tecniche di vuoto e di misura del gas residuo. Gli esperimenti di Fluorescenza X e di radioattività naturale saranno realizzati con rivelatori a semiconduttori ad alta risoluzione (Silici ed HPGe) ed addestreranno gli studenti alla spettroscopia della radiazione X-gamma ed alle tecniche analitiche ad essa connesse.

**Modalità di esame :**

Relazione scritta di gruppo sulle tre esperienze realizzate. Colloquio individuale con presentazione di una delle esperienze e possibili brevi domande sulle altre due. La presentazione prevede la descrizione del fenomeno fisico da esplorare, l'apparato strumentale con elettronica associata, le modalità di acquisizione ed analisi dati.

**Criteri di valutazione :**

Valutazione della capacità mostrata dallo studente in laboratorio. Valutazione delle relazioni scritte e dell'abilità dello studente nel presentare e discutere le esperienze realizzate.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense disponibili in rete.

## RADIOACTIVITY AND NUCLEAR MEASUREMENTS

(Titolare: Prof. LASZLO SAJO BOHUS)

**Periodo:** 1 anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** NuPhys - Nuclear Physics  
**Tipologie didattiche:** 32A+16E; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

CONTENUTO NON PRESENTE

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

CONTENUTO NON PRESENTE

**Contenuti :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Modalità di esame :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Criteri di valutazione :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

CONTENUTO NON PRESENTE

## SUBNUCLEAR PHYSICS

(Titolare: Prof. FRANCO SIMONETTO) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** NuPhys - Nuclear Physics  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Istituzioni di fisica nucleare e subnucleare, istituzioni di meccanica quantistica, dinamica relativistica, teoria quantistica dei campi, grafici di Feynman, interazione radiazione materia

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Fondamenti e metodologie sperimentali per lo studio della Fisica Subnucleare. Fenomenologia del Modello Standard: interazioni forti, elettromagnetiche, deboli, organizzazione delle particelle elementari, spettroscopia adronica. Capacità di stimare, almeno per ordini di grandezza, le frequenze e le sezioni d'urto dei processi di maggiore interesse. Stato dell'arte e prospettive.

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

Lezioni frontali alla lavagna. Esercizi numerici. Lezioni con proiettore.

**Contenuti :**

Richiami dei concetti fondamentali : classificazione delle particelle elementari sulla base dei numeri quantici dettati da simmetrie e leggi di conservazione. Vita media. Risonanze e distribuzione di Breit Wigner.

QED, richiami di teoria, processi a livello albero e ordini superiori. Running coupling constant. Verifiche sperimentali: successi e problemi.

Interazioni deboli di leptoni e quark. Costante di Fermi ( $G_f$ ), bosoni intermedi massivi, relazione tra  $G_f$  e MW. Decadimenti del muone e del tau: universalità leptonica. Violazione di P e C nei processi deboli. Altri decadimenti deboli: beta decay di nuclei, barioni e mesoni: soppressione "per elicità". Interazioni di neutrini. Rottura spontanea di simmetria e bosone di Higgs. Misure a LEP e a LHC. Stato e prospettive

QCD. Struttura degli adroni. Annichilazione ee in adroni. Deep inelastic scattering e funzioni di struttura.

Fisica del sapore adronico: cenni sulla matrice CKM. Oscillazioni di sapore e violazione di CP. Stato e prospettive.

**Modalità di esame :**

Esame scritto: soluzione di esercizi numerici, domande a risposta multipla, discussione su temi aperti; esame orale: a scelta interrogazione aperta sull'intero programma svolto, oppure discussione specifica su di un articolo pertinente scelto dallo studente tra quelli proposti a lezione.

**Criteria di valutazione :**

scritto : 10 punti (minimo 5) ; orale 20 punti (minimo 10) ; minimo complessivo 18.

**Testi di riferimento :**

Bettini, Alessandro, *Introduction to elementary particle physics* Alessandro Bettini. Cambridge: Cambridge University Press, 2014  
 Halzen, Francis; Martin, Alan Douglas, *Quarks and leptons an introductory course in modern particle physics* Francis Halzen, Alan D. Martin. New York [etc.]: J. Wiley, 0  
 Perkins, Donald H., *Introduction to high energy physics* Donald H. Perkins. Menlo Park: CA [etc.], Addison-Wesley, 0  
 De Angelis, Alessandro; Pimenta, Mário João Martins, *Introduction to particle and astroparticle physics questions to the Universe* Alessandro De Angelis, Mário João Martins Pimenta. Milan [etc.]: Springer, 2015

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Appunti dalle lezioni, libri di testo. Si potranno scaricare da moodle copie delle diapositive mostrate.

**THEORETICAL PHYSICS**

(Titolare: Prof. STEFANO RIGOLIN) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** NuPhys - Nuclear Physics  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Istituzioni di Fisica Teorica

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Conoscenza e comprensione degli strumenti principali per la descrizione di una teoria quantistica di campo.

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

Lezioni frontali di teoria e esercizi

**Contenuti :**

Introduzione alla teoria dei gruppi: gruppi e algebre di Lie e loro rappresentazioni. Gruppo di Lorentz e di Poincaré e loro rappresentazioni. Equazioni d'onda relativistiche. Introduzione alla teoria di campo classica: Lagrangiana e principio variazionale, teorema di Noether, teoria di campo di Schroedinger, Klein-Gordon, Dirac e Elettromagnetica. Quantizzazione canonica di una teoria di campo libera: esempi relativistici e non-relativistici. Teoria quantistica di campo interagente: espansione di matrice e regole di Feynman.

**Modalità di esame :**

Esame scritto e orale

**Criteria di valutazione :**

Verifica della comprensione dei contenuti del corso e della capacità di svolgere esercizi ad esso attinenti

**Testi di riferimento :**

J. Cornwell, *Group theory in physics : an introduction.* : Academic Press, 1997  
 B.C. Hall, *Lie groups, Lie algebras and Representations. An elementary introduction..* : Springer-Verlag, 2004  
 R. D'Áuria , M. Trigiante, *From Special Relativity to Feynman Diagrams.* : Springer, 2011  
 F. Mandl , G. Shaw, *Quantum Field Theory (2nd edition).* : John Wiley and Sons, 2010  
 C. Itzykson , J.B. Zuber, *Quantum Field Theory.* : McGraw-Hill, 1980

**THEORETICAL PHYSICS OF THE FUNDAMENTAL INTERACTIONS**

(Titolare: Prof. PIERPAOLO MASTROLIA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** NuPhys - Nuclear Physics  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Il corso richiede una conoscenza di base in fisica teorica e teoria quantistica dei campi, per campi liberi.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Come interagiscono le particelle.

Diagrammi di Feynman, Ampiezze e Sezioni d'urto.

Elettrodinamica quantistica.

Principi di Correzioni Radiative e Rinormalizzazione.

Teorie di gauge Abelian e non-Abelian.

Cromodinamica quantistica.

Unificazione Elettrodebole.

Meccanismo di Higgs e Modello Standard.

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

Lezioni frontali ed esercizi

**Contenuti :**

Programma:

1. Elettrodinamica Quantistica.

Regole di Feynman e processi di scattering a livello di albero: diffusione di Rutherford, diffusione di Compton, Bhabha scattering, Bremsstrahlung.

2. Fondamenti di Correzioni radiative e Rinormalizzazione.

3. Teorie di gauge non-Abelian: derivate covarianti e campi di gauge, termini cinetici per i campi di gauge e autointerazione.

4. La teoria di gauge SU(3) e la Cromodinamica Quantistica.

L'algebra del "colore".

Regole di Feynman ed ampiezze di scattering per gluoni e quarks ad ordine albero.

5. Introduzione all'interazione Debole.

Teoria di Fermi: regole di Feynman e decadimento del muone.

La teoria di gauge SU(2) x U(1) e l'unificazione elettrodebole.

6. Rottura spontanea di una simmetria: rotture di una simmetria discreta; rottura di una simmetria U(1) globale; teorema di Goldstone; il meccanismo di Higgs.

7. Rottura spontanea della simmetria elettrodebole e doppietto di Higgs.

8. La Lagrangiana del Modello Standard.

**Modalità di esame :**

Prova scritta e prova orale

**Criteri di valutazione :**

Il superamento della prova scritta e' necessario per l'ammissione alla prova orale.

**Testi di riferimento :**

M.D. Schwartz, Quantum Field Theory and the Standard Model. : Cambridge University Press, 2014

M.E. Peskin, D.V. Schroeder, An Introduction to Quantum Field Theory. : Addison-Wesley Publishing Company,

F. Mandl and G. Shaw, Quantum Field Theory. : Wiley,

---

## Curriculum: Physics of matter

---

### ADVANCED PHYSICS LABORATORY A

(Titolare: Prof. GIAMPAOLO MISTURA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of matter  
**Tipologie didattiche:** 16A+32L; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Laboratori degli anni precedenti e conoscenze di base di elettronica e ottica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Capacità di progettare e realizzare autonomamente un apparato sperimentale di misura. Capacità di analizzare criticamente i risultati per individuare possibili cause di errori sistematici. Capacità di utilizzare le conoscenze acquisite nel percorso di studi per analizzare i dati e ottenere una misura affidabile di una data grandezza fisica.

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

Il corso ha un carattere prettamente sperimentale. Gli studenti partecipanti saranno ripartiti in gruppi da 2 - 3 persone ai quali sarà affidata la realizzazione di una esperienza di fisica da scegliere a piacere fra quattro tipologie di esperimenti: elettronica, ottica, fisica delle particelle, fisica nucleare e fisica dello stato solido. Sono previste anche delle lezioni frontali nelle quali verranno dati elementi generali di fisica sperimentale.

**Contenuti :**

Tecniche generali di fisica sperimentale moderna. In particolare saranno approfonditi elementi di elettronica, ottica, criogenia e tecnica del vuoto.

**Modalità di esame :**

Relazione scritta ed esame orale.

**Criteri di valutazione :**

Autonomia nello svolgimento dell'esperienza, capacità di analisi critica dei risultati. Saranno inoltre valutate positivamente soluzioni originali proposte dallo studente al fine di condurre o migliorare le esperienze proposte.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense scritte dai responsabili del corso scaricabili dal web.

---

### BIOLOGICAL PHYSICS

(Titolare: Prof. MARIO BORTOLOZZI)



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

**Prerequisiti :**

Non previsti

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso si propone di illustrare agli studenti alcune delle più stimolanti sfide culturali e scientifiche lanciate dalla biologia moderna e di mostrare loro come i metodi fisici possano permettere di dare risposte e sviluppare nuovi modelli e nuove teorie.

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

Lezioni frontali ed esercizi in aula.

**Contenuti :**

Acidi nucleici, proteine e lipidi: struttura della cellula vivente, il dogma centrale della biologia, struttura primaria del DNA, la struttura a doppia elica.

Forze molecolari nelle strutture biologiche: origine elettrica delle energie di interazione, interazioni tra cariche e dipoli permanenti, dipoli indotti, forze di dispersione, legami idrogeno, repulsione sterica.

Proprietà elementari degli ioni in soluzione: random walk, elettrodiffusione, equazione di Nernst-Planck, sfere di idratazione e coefficienti di diffusione di piccoli ioni.

Proprietà elementari dei canali: la membrana come capacitore, conduttanza di singolo canale e selettività ionica. Il canale  $K^+$ .

Permeabilità selettiva delle membrane: le equazioni di Goldman-Hodgkin-Katz, permeabilità dei canali a ioni diversi, il potenziale d'azione dei neuroni.

Permeabilità selettiva dei canali: modelli a singolo e multi ione, applicazioni ai canali  $Na^+$  e  $K^+$ .

Meccanismi di apertura-chiusura dei canali: modelli ed esperimenti di patch-clamp. Agenti bloccanti dei canali.

Simulazioni numeriche al livello atomico: algoritmi generali di simulazione, condizioni periodiche al contorno, termostati e barostati.

Configurazione energetica: minimizzazione dell'energia, interazioni e forze field, potenziale Lennard Jones, interazioni elettrostatiche, legami chimici, polarizzazioni.

Dinamica delle proteine: analisi delle traiettorie, deviazioni, fluttuazioni, correlazioni. Ponti salini.

Tecniche avanzate: calcoli di energie libere, potenziale di forza media.

Struttura e funzione dei canali di membrana: calcolo di conduttanze e permeabilità di singolo canale di connessina.

**Modalità di esame :**

La verifica finale consiste in una prova orale nella quale può essere richiesta anche la soluzione di qualche specifico problema.

**Criteri di valutazione :**

La prova d'esame mira ad accertare l'acquisizione delle conoscenze di base fornite dal corso, nonché la capacità di ragionamento e di comprensione dello studente.

**Testi di riferimento :**

M. Daune, *Molecular Biophysics*. : Oxford University Press, 1999

Meyer B. Jackson, *Molecular and Cellular Biophysics*. : Cambridge University Press, 2006

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Slide Power Point e dispense fornite dal docente.

## COMPUTATIONAL METHODS IN MATERIAL SCIENCE

(Titolare: Prof. FRANCESCO ANCILOTTO) - Mutuato da: Laurea magistrale in Scienza dei Materiali (Ord. 2015)

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

**Prerequisiti :**

Fisica quantistica e dello stato solido, chimica fisica. Non sono richieste conoscenze di programmazione.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso si propone di fornire agli studenti le basi per la comprensione dei metodi computazionali usati nell'ambito della scienza dei materiali. Questo permetterà allo studente:

- di comprendere come i metodi computazionali possano essere usati per capire e predire il comportamento dei materiali e la relazione tra le proprietà macroscopiche e la struttura microscopica della materia;
- di riconoscere le tecniche numeriche adatte per le diverse scale spaziali e temporali;
- di valutare le assunzioni e delle approssimazioni che stanno alla base delle diverse tecniche di calcolo.

Alla fine del corso lo studente sarà in grado di giudicare in maniera critica potenzialità e limiti dei metodi computazionali usati per lo studio dei materiali e di valutare la qualità delle simulazioni riportate in letteratura. Inoltre avrà raggiunto una maggiore comprensione dell'origine microscopica del comportamento fisico della materia. Infine avrà acquisito le nozioni di base per l'impiego di alcuni comuni pacchetti di calcolo.

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

Il corso verrà tenuto dal prof. Francesco Ancilotto e dalla prof. Alberta Ferrarini.

Il corso prevede lezioni d'aula ed esercitazioni al computer.

**Contenuti :**

Richiami di termodinamica e meccanica statistica classica.

Simulazioni di Dinamica Molecolare classica; integrazione numerica delle equazioni di Newton.

Metodi Monte-Carlo; algoritmo di Metropolis. Simulazioni in diversi ensemble statistici.

Aspetti comuni dei metodi di simulazione: condizioni iniziali e condizioni al contorno; calcolo delle interazioni tra particelle.

Calcolo di grandezze termodinamiche e di proprietà di trasporto.

Interazioni intermolecolari; campi di forze (force fields); modelli atomistici e 'coarse grained'.

Metodi variazionali per la soluzione di equazioni di Schrodinger.

Teoria di Hartree e Hartree-Fock.

Elementi di Teoria del Funzionale Densita' (DFT).

Simulazioni "da principi primi".

I diversi metodi verranno discussi in relazione ad applicazioni a problemi di interesse per la scienza dei materiali (cristalli, superfici, soft matter, materiali nanostrutturati).

Il corso e' integrato da esercitazioni al computer.

Nelle esercitazioni lo studente effettuera' semplici simulazioni usando pacchetti di calcolo impegnanti nell'ambito dello studio dei materiali, e imparera' a interpretare e a presentare i risultati.

**Modalita' di esame :**

Esame orale in cui lo studente discuterà un elaborato scritto, nel quale vengono riportati i risultati di semplici simulazioni numeriche.

**Criteri di valutazione :**

Comprensione dei principali concetti che stanno alla base di metodi per la simulazione numerica di proprieta' della materia condensata.

Capacita' di interpretare e presentare i risultati di simulazioni fatte al computer.

**Testi di riferimento :**

M. P. Allen, D. J. Tildesley, *Computer simulation of liquids*. Oxford: Oxford University Press, 1987

D. Frenkel, B. Smit, *Understanding Molecular Simulations*, 2nd edition. San Diego: Academic Press, 2002

R. LeSar, *Introduction to Computational Materials Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Materiale didattico verra' fornito dai docenti.

## GENERAL RELATIVITY

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

**Periodo:** 1 anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Physics of matter

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

**Prerequisiti :**

Si consiglia Fisica Teorica.

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Il corso fornisce una introduzione alle basi teoriche e fenomenologiche della Relativita' Generale. Lo studente dovrà anche appropriarsi delle tecniche di base per costruire e studiare le proprieta' delle soluzioni delle equazioni di Einstein.

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

Lezioni frontali. Esercitazioni settimanali.

**Contenuti :**

Geometria Riemanniana; Forme differenziali; Il principio di equivalenza; Equazioni di Einstein; Soluzione di Schwarzschild, limite Newtoniano; test sperimentali; spazi massimamente simmetrici; Buchi neri (Diagrammi di Penrose, buchi neri carichi e rotanti); Termodinamica dei buchi neri.

**Modalita' di esame :**

Orale con domande su argomenti svolti a lezione e soluzione di un problema.

**Criteri di valutazione :**

Conoscenza e comprensione dei contenuti del corso, abilita' nella soluzione di problemi elementari legati ai contenuti del corso.

**Testi di riferimento :**

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

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

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

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

## INTRODUCTION TO MANY BODY THEORY

(Titolare: Prof. PIER LUIGI SILVESTRELLI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Physics of matter

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

**Prerequisiti :**

Metodi Matematici

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Il corso si propone di illustrare le tecniche, fondate sulla teoria quantistica dei campi non relativistici, che permettono di determinare il comportamento meccanico-statistico-quantistico della materia.

**Contenuti :**

Formalismo della seconda quantizzazione.

Operatori di particella singola e doppia in seconda quantizzazione.

L'hamiltoniano dei sistemi coulombiani.

Funzioni di Green a due punti: valore medio di un operatore di particella

singola, energia dello stato fondamentale, rappresentazione di Lehmann.

Teorema adiabatico e determinazione perturbativa dello stato fondamentale.

Teorema di Wick e grafici di Feynman per i sistemi fermionici a  $T=0$ .  
Self-energia, grafici di polarizzazione (interazione efficace),  
equazioni di Dyson.  
Energia dello stato fondamentale del gas di elettroni degeneri  
("jellium" model) nella ring approximation (RPA).  
Teoria della risposta lineare; applicazioni:  
schermaggio della carica elettrica (oscillazioni di Friedel),  
oscillazioni di plasma, sezione d'urto differenziale per lo  
scattering anelastico di elettroni (cenni).  
Sistemi Bosonici interagenti a  $T=0$  (cenni).  
Funzioni di Green a temperatura finita: teorema di Wick Matsubara e  
relativi grafici di Feynman.

**Modalità di esame :**

Orale più eventuali esercizi in itinere.

**Criteri di valutazione :**

Conoscenze teoriche di base e capacità di applicazione del formalismo in casi di interesse fisico.

**Testi di riferimento :**

A.L. Fetter, J.D. Walecka, Quantum theory of many-particle system. New-York: McGraw-Hill,

## INTRODUCTION TO NANOPHYSICS

(Titolare: Prof. GIOVANNI MATTEI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Scienza dei Materiali (Ord. 2015)

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of matter  
**Tipologie didattiche:** 40A+12L; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Fisica Quantistica, Fisica dello Stato Solido

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso si prefigge i seguenti obiettivi formativi:

- Fornire le basi per la comprensione delle proprietà chimiche e fisiche dei materiali nanodimensionali che sono alla base delle loro potenziali applicazioni nel campo delle nanotecnologie.

- Presentare alcune tecniche di sintesi e caratterizzazione di nanostrutture confinate (nanocluster) con applicazioni nanotecnologiche in fotonica, in plasmonica e nel magnetismo.

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

Il corso prevede lezioni frontali tenute dal Prof. G. Mattei (Modulo A) e dai Prof. S. Agnoli e Prof. M. Meneghetti (Modulo B).

Il Modulo A prevede esercitazioni di laboratorio come applicazione dei contenuti visti a lezione (sintesi, caratterizzazione ottica e simulazione con la teoria di Mie di nanoparticelle metalliche in soluzione e loro caratterizzazione con microscopia elettronica).

**Contenuti :**

Modulo A (4 CFU)

- Classificazione, caratteristiche e proprietà generali dei materiali nanostrutturati: confinamento quantico e proprietà elettroniche. Equazioni di taglia.

Proprietà termodinamiche di nanostrutture: effetto di taglia termodinamico, nucleazione (equazione di Gibbs-Thomson) e crescita di nanostrutture (regimi di aggregazione limitata dalla diffusione e Ostwald ripening)

Nanostrutture in matrice solida: impianto ionico per la sintesi e la modifica di nanostrutture metalliche. Verifica dei regimi di nucleazione e crescita.

Proprietà ottiche di nanostrutture: (i) proprietà plasmoniche di nanostrutture metalliche (Teoria di Mie e sue estensioni); (ii) confinamento quantico e fotoluminescenza in semiconductor quantum dots.

Proprietà magnetiche di nanostrutture: super-paramagnetismo

Tecniche di caratterizzazione di nanostrutture: la microscopia elettronica in trasmissione (TEM) e in scansione (SEM).

Modulo B (4 CFU)

- Panoramica sui metodi di preparazione delle nanostrutture (sia top-down che bottom-up, con particolare enfasi sulle seconde). Aspetti strutturali ed energetici delle nanostrutture e metodi per la loro stabilizzazione. Difetti nei materiali nanodimensionali. Solidi a porosità controllata. Forme delle nanoparticelle: aspetti termodinamici e cinetici. Nanoparticelle core-shell. Autoassemblaggio ed autoorganizzazione. Metodo colloidale. Effetto templante. Preparazione di nanoparticelle, nanowires, nanotubes, films ultrasottili. Self-assembled Monolayers. Films di Langmuir e Langmuir-Blodgett. Interfacce coerenti, semi-coerenti, epitassiali e pseudomorfe. Metodi per crescita di films ultrasottili: CVD, MBE, PVD, ALE e PLD.

- Richiamo delle equazioni fondamentali per la descrizione della dinamica di elettroni e fotoni. Proprietà della materia che consentono il confinamento di elettroni e fotoni. Densità degli stati per sistemi confinati in una, due o tre dimensioni.

Proprietà di nanostrutture di carbonio a bassa dimensionalità: grafene e nanotubi. Descrizione tight binding delle loro proprietà di conduzione, ottiche (assorbimento ed emissione) e di scattering Raman (Kataura plots).

Modelli per il confinamento elettronico in quantum dots nel regime di debole e forte confinamento.

Confinamento di elettroni in nano particelle metalliche e proprietà plasmoniche. Condizione di Froehlich e proprietà ottiche a campo prossimo e lontano. Effetto SERS con nano strutture plasmoniche.

Cenni al confinamento di fotoni in cristalli fotonici.

**\*\*\* MUTUAZIONE \*\*\***

Fondamenti di NanoFisica "Laurea Magistrale in Fisica (6 CFU)

Il Modulo A del presente corso viene mutuato da parte del corso di 'Fondamenti di NanoFisica' della LM in Fisica. Per tale corso sono previsti 2 CFU addizionali con i seguenti contenuti:

- Richiamo delle equazioni fondamentali per la descrizione della dinamica di elettroni e fotoni;
- Confinamento di elettroni e fotoni in sistemi nanostrutturati:
  - (i) Confinamento di fotoni in cristalli fotonici;
  - (ii) Confinamento di elettroni in nanoparticelle metalliche;
  - (iii) Confinamento di elettroni in quantum dots.

Sono inoltre previste delle attività pratiche: (i) sintesi di nanoparticelle sferiche di Au in soluzione; (ii) misura del loro spettro di trasmittanza UV-VIS; (iii) simulazione degli spettri misurati tramite la teoria di Mie; (iv) caratterizzazione tramite microscopia elettronica.

**Modalità di esame :**

Prova Scritta

**Criteri di valutazione :**

La valutazione della preparazione si baserà sulla comprensione degli argomenti svolti e sulla capacità di fare collegamenti fra diversi argomenti.

Si valuteranno anche le relazioni scritte presentate sulla parte di esercitazione pratica.

**Testi di riferimento :**

- R. Kelsall, I. Hamley, M. Geoghegan, *Nanoscale Science and Technology*. : J.Wiley& Sons, 2005
- G. Cao, *Nanostructures and Nanomaterials*. : Imperial College Press, 2004
- S. Maier, *Plasmonics, fundamentals and applications*. : Springer, 2007
- C. Bohren, D. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*. : Wiley-Interscience, 2004
- P. Prasad, *Nanophotonics*. : Wiley-Interscience, 2004

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Verranno fornite dispense da parte dei Docenti. Gli argomenti e i contenuti trattati potranno essere approfonditi e/o integrati sui testi indicati nella sezione 'Testi di Riferimento'.

---

## INTRODUCTION TO RESEARCH ACTIVITIES

(Titolare: Prof. ALBERTO CARNERA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

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

**Prerequisiti :**

Non è richiesto alcun requisito specifico

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Lo studente acquisirà esperienza sull'organizzazione, svolgimento, presentazione e discussione dei risultati di una attività di ricerca.

**Contenuti :**

Lo studente parteciperà ad uno stage estivo della durata di circa 150 ore in un gruppo di ricerca del Dipartimento o di un laboratorio associato o presso una struttura esterna approvata.

La lista delle attività proposte sarà disponibile nel sito del "Corso di Laurea Magistrale" per la fine della primavera e gli studenti potranno scegliere fra le proposte pubblicate. L'attività verrà svolta sotto la supervisione di un tutor.

**Modalità di esame :**

Orale. Presentazione e discussione dei risultati della ricerca

**Criteri di valutazione :**

Verranno valutati la chiarezza, la capacità di sintesi e la comprensione del contesto scientifico dell'attività svolta

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

---

## MATHEMATICAL PHYSICS

(Titolare: Prof. ANTONIO PONNO)

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

**Prerequisiti :**

Conoscenze della meccanica hamiltoniana di base, a livello del corso di meccanica analitica (terzo anno, laurea in fisica).

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Lo studente, al superamento della prova di profitto, avrà acquisito conoscenze tali da metterlo in grado di comprendere alcuni articoli originali sugli argomenti trattati nel corso.

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

Il corso viene erogato tramite lezioni frontali alla lavagna.

**Contenuti :**

Proprietà generali. Strutture di Poisson ed estensione del formalismo canonico. Elementi di teoria Hamiltoniana delle perturbazioni: principio della media (classico e quantistico). Sistemi di Lie-Poisson e loro connessione con i gruppi di Lie e le relative algebre. Formalismo lagrangiano e hamiltoniano per sistemi infinito-dimensionali. Equazioni alle derivate parziali lineari e non lineari di interesse per la fisica. Struttura hamiltoniana della meccanica quantistica.

**Modalita' di esame :**

Esame scritto sul programma del corso.

**Criteri di valutazione :**

La valutazione dello studente si basera' sulla verifica di comprensione degli argomenti "astratti" e sulla conseguente capacita' di risolvere eventuali esercizi.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Le dispense del docente coprono la maggior parte degli argomenti trattati a lezione.

## NUCLEAR PHYSICS

(Titolare: Prof.ssa SILVIA MONICA LENZI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

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

**Prerequisiti :**

Meccanica quantistica.

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Lo studente approfondira' alcuni degli argomenti visti nel corso di Istituzioni di Fisica Nucleare della Laurea Triennale e sara' introdotto a nuovi argomenti sia sulle reazioni nucleari, sia sulla struttura del nucleo. Il corso fornisce una buona conoscenza delle proprieta' del nucleo atomico che implica l'utilizzo di modelli a molti corpi. Inoltre verranno presentati e discussi i problemi piu' attuali della Fisica Nucleare. Lo studente sara' in grado di interpretare le diverse proprieta' e modi di eccitazione dei nuclei.

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

Le lezioni si svolgono con l'ausilio di slides.

**Contenuti :**

Programma di Fisica Nucleare 2017/2018

Parte prima: Struttura del nucleo e modelli nucleari

Dall'interazione nucleone-nucleone all'interazione efficace nel nucleo.

Grandezze conservate

Simmetrie nella struttura dei nuclei

Metodi sperimentali per la struttura nucleare

Modelli nucleari:

1) Modelli collettivi:

Modello della goccia liquida, Modello a gas di Fermi: applicazioni, Deformazione nucleare,

Eccitazioni collettive,

Moti vibrazionali,

Moti rotazionali,

Energy Density Functional

2) Modello Microscopici:

Modello di Hartree Fock,

Modello a shell interattivo,

Modello di Nilsson.

Parte Seconda: Reazioni nucleari

Introduzione: proprieta' del nucleo

-energia di legame

-equazione semiempirica di massa

-proprieta' elettromagnetiche statiche dei nuclei: Momenti di multipolo

Le forze nucleari e il potenziale nucleare

- interazione nucleone-nucleone

- Il deutone

- isospin

- diffusione nucleone-nucleone

- proprieta' delle forze nucleari

Reazioni Nucleari

- considerazioni generali: Cinematica delle collisioni a due corpi

- tipi di reazione e le osservabili coinvolte

- diffusione elastica e sezione d'urto di reazione

- reazioni di nucleo composto

- reazioni di Knock-out

Reazioni con Ioni Pesanti

- reazioni di trasferimento quasi-elastico di nucleoni

- aspetti fenomenologici delle reazioni nucleari alla barriera Coulombiana,
- fusione completa, formazione e decadimento del nucleo composto
- reazioni di fusione di interesse astrofisico
- tecniche sperimentali

Verranno considerati come esempi e argomenti di discussione gli aspetti che riguardano la formazione di nuclei  $\alpha$  superpesanti, le reazioni con nuclei instabili.

**Modalita' di esame :**

L'esame consiste in una prova orale con eventuale presentazione di un lavoro di ricerca su argomenti diversi proposti dal docente.

**Criteri di valutazione :**

Buon dominio dei principali argomenti del corso.

**Testi di riferimento :**

Kris Heyde, *Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1999

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

I libri di testo e le slides messe a disposizione dai docenti nel sito moodle. Inoltre verrà messo a disposizione altro materiale di rassegna di carattere didattico sugli argomenti più attuali della fisica nucleare teorica, sperimentale e applicata.

## PHYSICS LABORATORY

(Titolare: Dott. FRANCESCO RECCHIA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of matter  
**Tipologie didattiche:** 16A+48L; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Laboratori della Laurea Triennale.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Scopo del Corso è di addestrare all'uso di strumentazione per esperimenti di Fisica delle Interazioni fondamentali, Materia e Astrofisica e degli strumenti di analisi dati. Lo studente sarà in grado di gestire autonomamente un apparato di misura, acquisire ed analizzare i dati e valutare l'accuratezza dei risultati ottenuti.

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

Lezioni introduttive per la descrizione delle esperienze (16 ore, 2 CFU). Saranno poi formati gruppi di 3 studenti. Ciascun gruppo realizzerà 3 esperimenti.

**Contenuti :**

Questo corso presenta agli studenti alcuni esperimenti di Fisica Moderna che permettono l'approccio a tecniche di misura utilizzate nella pratica attuale della Ricerca Scientifica in di Fisica delle Interazioni fondamentali, Materia e Astrofisica. Ogni studente svolgerà tre esperimenti.

Gli esperimenti proposti sono i seguenti: 1) Raggi Cosmici 2) Scattering Compton 3) Decadimento del positronio 4) Imaging con raggi gamma 5) Timing rapido 6) Fisica dei plasmi 7) Fluorescenza X 8) Radioattività naturale & Radon Counting. Nei primi cinque esperimenti gli studenti impareranno ad usare vari tipi di scintillatori per la rivelazione di particelle e raggi gamma e dell'elettronica associata.

Verranno costruiti eventi multiparametrici tramite l'uso di tecniche di coincidenze. Gli eventi saranno processati utilizzando un software evoluto (ROOT) per arrivare alla definizione del risultato finale. Nell'esperimento di Fisica dei Plasmi gli studenti studieranno le condizioni che permettono di innescare un plasma a partire da una piccola quantità di gas neutro e studieranno le caratteristiche fisiche del plasma tramite misure elettriche. Gli studenti entreranno a contatto con le tecniche di vuoto e di misura del gas residuo. Gli esperimenti di Fluorescenza X e di radioattività naturale saranno realizzati con rivelatori a semiconduttori ad alta risoluzione (Silici ed HPGe) ed addestreranno gli studenti alla spettroscopia della radiazione X-gamma ed alle tecniche analitiche ad essa connesse.

**Modalita' di esame :**

Relazione scritta di gruppo sulle tre esperienze realizzate. Colloquio individuale con presentazione di una delle esperienze e possibili brevi domande sulle altre due. La presentazione prevede la descrizione del fenomeno fisico da esplorare, l'apparato strumentale con elettronica associata, le modalità di acquisizione ed analisi dati.

**Criteri di valutazione :**

Valutazione della capacità mostrata dallo studente in laboratorio. Valutazione delle relazioni scritte e dell'abilità dello studente nel presentare e discutere le esperienze realizzate.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense disponibili in rete.

## SOLID STATE PHYSICS

(Titolare: Prof. FRANCESCO ANCILOTTO)

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

**Prerequisiti :**

Conoscenze di elementi di Meccanica Quantistica di base  
 Conoscenze di elementi di Meccanica Statistica di base

(funzioni di distribuzioni, ensemble Canonico e gran Canonico, medie statistiche).

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Concetti fondamentali della fisica dei solidi e relazione tra le leggi microscopiche e le proprietà misurabili sperimentalmente.

Capacità di risolvere problemi che coinvolgono le proprietà della materia condensata.

Capacità di applicare a sistemi reali semplici modelli predittivi che incorporano proprietà della materia su scala microscopica.

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

Lezioni in aula con uso di lavagna convenzionale e proiettore per trasparenze.

Settimanalmente verranno proposti agli studenti dei problemi inerenti argomenti trattati a lezione nei giorni immediatamente precedenti, da risolvere per conto proprio.

**Contenuti :**

Legami chimici nei solidi;

La struttura dei cristalli;

Reticoli di Bravais e basi;

Strutture cristalline semplici;

Reticolo reciproco;

Diffrazione da strutture periodiche e tecniche sperimentali;

Leggi di Bragg e di Laue;

Fattore di forma atomico e di struttura,

Approssimazione adiabatica;

Dinamica reticolare;

Approssimazione armonica,

Matrice Dinamica;

Fononi;

Catene lineari monoatomiche e diatomiche;

Spettroscopia dei fononi;

Proprietà termiche dei cristalli;

Calore specifico reticolare;

Effetti anarmonici: espansione termica, conducibilità termica degli isolanti;

Elettroni "liberi";

Calore specifico elettronico;

"Screening" elettrostatico in un gas di Fermi.;

Teorema di Bloch;

Struttura a bande;

Approssimazione di elettroni "quasi liberi";

Approssimazione "tight binding";

Esempi di struttura a bande;

Fenomeni di trasporto;

Modello di Drude;

Effetto Hall nei metalli;

Modello semiclassico;

Concetto di "buca";

Conducibilità elettrica e termica nei metalli;

Legge di Wiedemann e Franz;

Semiconduttori;

Risonanza di ciclotrone;

Portatori nei semiconduttori intrinseci ed estrinseci;

"Drogaggio" e stati di drogante;

Mobilità ;

Conducibilità elettrica nei semiconduttori;

Effetto Hall nei semiconduttori;

La superficie di Fermi nei metalli reali.

La superconduttività.

**Modalità di esame :**

Esame orale sul programma svolto a lezione.

**Criteri di valutazione :**

Adeguate comprensione e visione di insieme di concetti e argomenti svolti a lezione.

**Testi di riferimento :**

C.Kittel, "Introduzione alla Fisica dello Stato Solido". : ,

N.Ashcroft e D.Mermin, "Solid State Physics". : ,

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Vengono fornite le fotocopie (in formato pdf) delle slides mostrate a lezione.

# STATISTICAL MECHANICS

(Titolare: Prof. ENZO ORLANDINI)

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

## Prerequisiti :

Istituzioni di Meccanica Statistica.

## Conoscenze e abilità da acquisire :

Termodinamica delle transizioni di fase.

Tecniche di campo medio di matrice di trasferimento, di scaling e di gruppo di rinormalizzazione per modelli statistici di sistemi interagenti a multi corpi.

## Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Lezioni frontali di teoria e esercizi su problemi inerenti al corso.

## Contenuti :

Termodinamica delle transizioni di fase. Punti critici, parametro d'ordine ed esponenti critici. Transizioni di fase e rottura spontanea di simmetria. Argomenti entropia-energia e definizione di dimensione critica inferiore. Modello di Ising. Tecniche di risoluzione esatta per modelli unidimensionali: matrice di trasferimento. Approssimazione di campo medio, principio variazionale. Formulazione funzionale del problema delle transizioni di fase e approssimazione di Landau. Funzioni di correlazione e funzioni di risposta. Scattering e funzioni di correlazione. Singolarità critiche. Relazioni di scala fra esponenti critici. Omogeneità e scaling di Kadanoff. Gruppo di rinormalizzazione nello spazio reale. Universality. Rottura spontanea di simmetria per simmetrie continue e teorema di Goldstone.

## Modalità di esame :

Prova scritta con problemi da risolvere e domande di teoria.

Orale.

## Criteri di valutazione :

La valutazione della preparazione dello studente si baserà sia sulla comprensione dei concetti di base del corso sia sulla capacità di risolvere problemi in modo autonomo e consapevole basandosi sulle metodologie e tecniche analitiche illustrate durante il corso.

## Testi di riferimento :

L. Peliti, *Statistical Mechanics in a Nutshell*. : Princeton,

K. Huang, *Meccanica Statistica*. : Zanichelli,

## Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

Appunti del corso verranno distribuiti durante le lezioni.

# STRUCTURE OF MATTER

(Titolare: Prof. LUCA SALASNICH)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of matter  
**Tipologie didattiche:** 40A+8E; 6,00 CFU

## Prerequisiti :

I corsi della laurea triennale in Fisica.

## Conoscenze e abilità da acquisire :

Seconda quantizzazione del campo elettromagnetico. Transizioni elettromagnetiche. Sistemi quantistici a molti corpi interagenti.

Seconda quantizzazione del campo di materia non relativistico.

## Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

36 ore di lezioni teoriche e 12 ore di esercizi.

## Contenuti :

1. Seconda quantizzazione del campo elettromagnetico. Proprietà del campo elettromagnetico classico nel vuoto. Gauge di Coulomb. Espansione in onde piane del potenziale vettore. Oscillatori quantistici e quantizzazione del campo elettromagnetico. Stati di Fock e stati coerenti del campo elettromagnetico. Energia di punto zero ed effetto Casimir. Campo elettromagnetico a temperatura finita.

2. Transizioni elettromagnetiche. L'atomo in presenza del campo elettromagnetico. La regola d'oro di Fermi. Approssimazione di dipolo. Assorbimento ed emissione spontanea e stimolata della radiazione: i coefficienti di Einstein. Regole di selezione. Tempi di vita degli stati atomici e larghezza di riga. Inversione di popolazione e luce laser.

3. Sistemi quantistici a molti corpi. Particelle identiche. Bosoni e condensazione di Bose-Einstein. Fermioni e principio di esclusione di Pauli. Approssimazioni di Hartree per i bosoni e l'equazione di Gross-Pitaevskii. Approssimazione di Hartree-Fock per i fermioni. Teoria del funzionale densità: teoremi di Hohenberg-Kohn, funzionale densità di Thomas-Fermi-Dirac-Von Weizsacker e funzionale densità di Kohn-Sham.

4. Seconda quantizzazione del campo di Schrodinger. Operatori di campo bosonici e fermionici. Stati di Fock e stati coerenti del campo bosonico di Schrodinger. Campo di Schrodinger a temperatura finita per bosoni e fermioni. Campo di materia per bosoni e fermioni interagenti. Bosoni in doppia buca di potenziale e modello di Bose-Hubbard a due siti.

## Modalità di esame :

Esame orale di circa 30 minuti.

## Criteri di valutazione :

Conoscenze acquisite e capacità espositiva.

## Testi di riferimento :

L. Salasnich, *Quantum Physics of Light and Matter*. Berlin: Springer, 2014

B.H. Bransden and C.J. Joachain, *Physics of Atoms and Molecules*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003

## Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

Libro scritto dal docente.



# THE PHYSICAL UNIVERSE

(Titolare: Prof. SABINO MATARRESE) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

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

## Prerequisiti :

Si richiede la conoscenza dei concetti fondamentali di meccanica quantistica e di relatività ristretta.

## 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 di base 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.

• Deduzione Newtoniana delle equazioni di Friedmann.

• 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.

## 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.

• Asimmetria barionica. Bariogenesi (cenni).

• 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

• Nucleosintesi primordiale degli elementi leggeri.

• Contrazione gravitazionale e condizioni per l'equilibrio idrostatico

• Indice adiabatico ed equilibrio.

• Condizioni per il collasso gravitazionale

• Teoria di Jeans dell'instabilità gravitazionale

• Teoria lineare delle perturbazioni nell'Universo in espansione (cenni)

• Collasso sferico di una protostruttura cosmica.

• La funzione di massa delle strutture cosmiche: teoria di Press & Schechter.

• Contrazione di una protostella

• Formazione stellare e gas degeneri di elettroni.

• Il Sole: proprietà generali, diffusione radiativa, fusione termonucleare.

• Nucleosintesi stellare

• Cicli stellari.

\* Elementi di struttura stellare. Massa minima e massima per una stella.

• Fasi finali dell'evoluzione stellare: nane bianche, stelle di neutroni, buchi neri.

• Diagramma di Hertzsprung-Russell.

## 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. and Lucchin, F., *Cosmology, The Origin and Evolution of Cosmic Structure*. Chichester: Wiley and Sons., 2002

Phillips, A.C., *The Physics of Stars*. Chichester: Wiley and Sons., 1994

Kolb, E.W. and Turner, M.S., *The Early Universe*. Redwood City,: Addison-Wesley, 1990

## 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.

# THEORETICAL PHYSICS

(Titolare: Prof. STEFANO RIGOLIN) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

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

## Prerequisiti :

Istituzioni di Fisica Teorica

## Conoscenze e abilità da acquisire :

Conoscenza e comprensione degli strumenti principali per la descrizione di una teoria quantistica di campo.

## Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Lezioni frontali di teoria e esercizi

## Contenuti :

Introduzione alla teoria dei gruppi: gruppi e algebre di Lie e loro rappresentazioni. Gruppo di Lorentz e di Poincaré e loro rappresentazioni. Equazioni d'onda relativistiche. Introduzione alla teoria di campo classica: Lagrangiana e principio variazionale, teorema di Noether, teoria di campo di Schroedinger, Klein-Gordon, Dirac e Elettromagnetica. Quantizzazione canonica di una teoria di campo libera: esempi relativistici e non-relativistici. Teoria quantistica di campo interagente: espansione di matrice e regole di Feynman.

## Modalità di esame :

Esame scritto e orale

## Criteri di valutazione :

Verifica della comprensione dei contenuti del corso e della capacità di svolgere esercizi ad esso attinenti

## Testi di riferimento :

J. Cornwell, *Group theory in physics : an introduction.* : Academic Press, 1997

B.C. Hall, *Lie groups, Lie algebras and Representations. An elementary introduction..* : Springer-Verlag, 2004

R. D'Áuria, M. Trigiante, *From Special Relativity to Feynman Diagrams.* : Springer, 2011

F. Mandl, G. Shaw, *Quantum Field Theory (2nd edition).* : John Wiley and Sons, 2010

C. Itzykson, J.B. Zuber, *Quantum Field Theory.* : McGraw-Hill, 1980

# THEORETICAL PHYSICS OF THE FUNDAMENTAL INTERACTIONS

(Titolare: Prof. PIERPAOLO MASTROLIA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

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

## Prerequisiti :

Il corso richiede una conoscenza di base in fisica teorica e teoria quantistica dei campi, per campi liberi.

## Conoscenze e abilità da acquisire :

Come interagiscono le particelle.

Diagrammi di Feynman, Ampiezze e Sezioni d'urto.

Elettrodinamica quantistica.

Principi di Correzioni Radiative e Rinormalizzazione.

Teorie di gauge Abelian e non-Abelian.

Cromodinamica quantistica.

Unificazione Elettrodebole.

Meccanismo di Higgs e Modello Standard.

## Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Lezioni frontali ed esercizi

## Contenuti :

Programma:

1. Elettrodinamica Quantistica.

Regole di Feynman e processi di scattering a livello di albero: diffusione di Rutherford, diffusione di Compton, Bhabha scattering, Bremsstrahlung.

2. Fondamenti di Correzioni radiative e Rinormalizzazione.

3. Teorie di gauge non-Abelian: derivate covarianti e campi di gauge, termini cinetici per i campi di gauge e autointerazione.

4. La teoria di gauge SU(3) e la Cromodinamica Quantistica.

L'algebra del "colore".

Regole di Feynman ed ampiezze di scattering per gluoni e quarks ad ordine albero.

5. Introduzione all'interazione Debole.

Teoria di Fermi: regole di Feynman e decadimento del muone.

La teoria di gauge SU(2) x U(1) e l'unificazione elettrodebole.

6. Rottura spontanea di una simmetria: rotture di una simmetria discreta; rottura di una simmetria U(1) globale; teorema di Goldstone; il meccanismo di Higgs.

7. Rottura spontanea della simmetria elettrodebole e doppietto di Higgs.

## 8. La Lagrangiana del Modello Standard.

### **Modalità di esame :**

Prova scritta e prova orale

### **Criteri di valutazione :**

Il superamento della prova scritta e' necessario per l'ammissione alla prova orale.

### **Testi di riferimento :**

M.D. Schwartz, *Quantum Field Theory and the Standard Model.* : Cambridge University Press, 2014

M.E. Peskin, D.V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory.* : Addison-Wesley Publishing Company,

F. Mandl and G. Shaw, *Quantum Field Theory.* : Wiley,

---

# Curriculum: Physics of the fundamental interactions

---

## ADVANCED PHYSICS LABORATORY A

(Titolare: Prof. GIAMPAOLO MISTURA)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 16A+32L; 6,00 CFU

### **Prerequisiti :**

Laboratori degli anni precedenti e conoscenze di base di elettronica e ottica.

### **Conoscenze e abilità da acquisire :**

Capacità di progettare e realizzare autonomamente un apparato sperimentale di misura. Capacità di analizzare criticamente i risultati per individuare possibili cause di errori sistematici. Capacità di utilizzare le conoscenze acquisite nel percorso di studi per analizzare i dati e ottenere una misura affidabile di una data grandezza fisica.

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

Il corso ha un carattere prettamente sperimentale. Gli studenti partecipanti saranno ripartiti in gruppi da 2 - 3 persone ai quali sarà affidata la realizzazione di una esperienza di fisica da scegliere a piacere fra quattro tipologie di esperimenti: elettronica, ottica, fisica delle particelle, fisica nucleare e fisica dello stato solido. Sono previste anche delle lezioni frontali nelle quali verranno dati elementi generali di fisica sperimentale.

### **Contenuti :**

Tecniche generali di fisica sperimentale moderna. In particolare saranno approfonditi elementi di elettronica, ottica, criogenia e tecnica del vuoto.

### **Modalità di esame :**

Relazione scritta ed esame orale.

### **Criteri di valutazione :**

Autonomia nello svolgimento dell'esperienza, capacità di analisi critica dei risultati. Saranno inoltre valutate positivamente soluzioni originali proposte dallo studente al fine di condurre o migliorare le esperienze proposte.

### **Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

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

Dispense scritte dai responsabili del corso scaricabili dal web.

---

## APPLIED ELECTRONICS

(Titolare: Dott. GIANMARIA COLLAZUOL)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

### **Conoscenze e abilità da acquisire :**

Assimilazione dei fondamenti dell'elettronica analogica e digitale

Capacità di decifrare un circuiti analogici e digitali individuandone i blocchi funzionali principali

Capacità di base nel disegnare circuiti analogici

Capacità di base nel disegnare circuiti digitali in dispositivi logica programmabile

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

Lezioni frontali ed esercitazioni numeriche

### **Contenuti :**

Parte I. ELETTRONICA E STRUMENTAZIONE ANALOGICA

1. Richiami elettronica analogica di base
2. Richiami Feedback
3. Amplificatori operazionali (reali, comportamento in freq.)
  - Applicazioni Op.Amp. lineari e non lineari
4. Generazione di segnali e oscillatori
  - Alimentatori
  - Generatori di riferimenti tensione/corrente
  - Oscillatori
5. Rumore e recupero segnale analogico
  - Rumore in circuiti elettronici (analogici)(rumore e spettro di potenza, tipi di rumore (termico, shot, 1/f), rumore nei dispositivi (transistors, operazionali), calcolo ENC, effetto della reazione sul rumore)
  - Amplificatori a basso rumore (amplificatore di Radeka  $\hat{f}$  in carica, altri amplificatori front-end  $\hat{f}$  rumore in Ampl. transimpedenza)
  - Filtri analogici e tecniche di recupero del segnale (approssimazione ed implementazione, filtri a capacità commutate, filtri in dominio delle frequenze o dei tempi)
  - Tecniche estrazione segnale dal rumore (shaping per misure di  $\hat{f}$  energia o  $\hat{f}$  tempi e filtri ottimali, Lock-in, media del segnale, filters, mixing)

## PARTE II. ELETTRONICA, DISPOSITIVI DIGITALI, CONVERSIONE AD/DA

6. Invertitori e porte logiche (TTL, ECL, MOS,  $\hat{f}$ )
  - Invertitori e porte logiche (funzione porte logiche, invertitore bipolare e MOS, invertitori e porte TTL, ECL, MOS)
  - circuiti fondamentali (operazioni combinatoriali e sequenziali, flip-flop multiplexer, adder, shift registers, memorie)
7. Conversione A/D e D/A
  - Strumenti (z-transform) e rumore (rumore di quantizzazione)
  - Digital-to-Analogue (convertitori Nyquist rate ,DAC based on Resistors / Capacitors / Current sources)
  - Analogue-to-Digital (convertitori Nyquist rate, accuratezza in tempo, ADC Flash, a due step, interpolanti, approssimazioni successive, campionatori)
  - Alcuni circuiti per la conversione in dettaglio (sample & hold, switched emitter follower,...)
  - Oversampling  $\hat{f}$  sigma-delta
  - Tecniche di processamento del segnale e filtraggio digitale
  - Esempi di misure di ampiezze e tempi
8. Complementi
  - Microprocessori, Microcontrollori e FPGA
  - Bus Dati
9. Laboratorio Digitale  $\hat{f}$  introduzione a VHDL

### Modalità di esame :

Esame orale

### Criteri di valutazione :

I criteri per la valutazione della prova orale tengono conto della correttezza dei contenuti, della chiarezza argomentativa e delle capacità di analisi critica e di rielaborazione

### Testi di riferimento :

A. Laicata, Circuiti elettronici. : ,  
 T.H.Wilmshurst, Analog Circuit Techniques. : ,  
 W.Kleitz, Digital Electronics - A Practical Approach with VHDL. : ,

### Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

Slides delle lezioni (vedere Moodle relativo al Corso)

## ASTROPARTICLE PHYSICS

(Titolare: Prof. PARIDE PARADISI)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

### Prerequisiti :

Il corso  $\hat{f}$  autoconsistente in quanto le necessarie basi di meccanica quantistica relativistica, teoria dei campi e relatività generale verranno fornite durante il corso.

### Conoscenze e abilità da acquisire :

Una piena comprensione delle primissime fasi del nostro Universo durante i primi secondi dopo il Big Bang, richiede non soltanto conoscenze di cosmologia ed astrofisica ma anche di fisica delle particelle elementari. Scopo del corso e' fornire una visione di insieme di queste discipline attraverso un' introduzione dei Modelli Standard cosmologico e delle particelle elementari.

### 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; limite non-relativistico; 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: derivata covariante e QED; teoria dello scattering: matrice S, funzioni di Green, 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; matrice CKM; meccanismo GIM; violazione di CP; gruppo di sapore dello SM: conservazione dei numeri barionico e leptonico (di famiglia); scoperta del bosone di Higgs ad LHC.
- 6) **FISICA DEL NEUTRINO:** masse di Dirac e Majorana; meccanismo see-saw; neutrini massivi nello SM; matrice PMNS; meccanismo GIM e tasso di decadimento di  $\mu \rightarrow e \gamma$ ; doppio decadimento beta senza neutrini; oscillazione dei neutrini nel vuoto e nella materia: effetto MSW; 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); modello SU(5): SSB e gerarchia di Gauge, unificazione delle costanti di accoppiamento, decadimento del protone, masse ed angoli di mescolamento fermionici; SO(10) ed il meccanismo see-saw.
- 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; congelamento e MO; equazione di Boltzmann; MO fredda, bollente 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 dei monopoli del modello BIG BANG standard; meccanismo dell'inflazione; fluttuazioni quantistiche dell'inflatone; modelli di inflazione; energia oscura.
- 13) **BARIOGENESI:** condizioni di Sakharov; interazioni che violano i numeri barionico (B) e leptonico (L); violazione di B e L nello SM via anomalie; conservazione di B-L nello SM; meccanismo elettrodebole; violazione di B in GUTs; generazione di asimmetrie in decadimenti di particelle; 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 :**

Perkins, Donald H., *Particle astrophysics*. Oxford: Oxford University Press, 2009

Gorbunov, Dmitry S.; Rubakov, Valery, *Introduction to the theory of the early universe hot big bang theory*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2011

Kolb, Edward; Turner, Michael, *Early Universe*. New York: Westview Press, 1994

Bilenchik, Samoil, *Introduction to the physics of massive and mixed neutrinos*. Berlin: Springer, 2010

Giunti, Carlo; Kim, Chung Wook, *Fundamentals of neutrino physics and astrophysics*. Oxford: Oxford University Press, 2007

Cheng, Ta-Pei; Li, Ling-Fong, *Gauge theory of elementary particle physics*. Oxford: Clarendon Press, 1984

Schwartz, Matthew Dean, *Quantum field theory and the standard model*. Cambridge: Cambridge univ. press, 2014

Peskin, Michael E.; Schroeder, Daniel V., *An introduction to quantum field theory*. Reading: Mass., Addison-Wesley, 1995

Bjorken, James D.; Drell, Sidney D., *Relativistic quantum mechanics*. New York: McGraw-Hill, 1964

Bergstrom, Lars; Goobar, Ariel, *Cosmology and particle astrophysics*. Berlin: Springer, 2003

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Verranno fornite agli studenti dettagliate note su tutti gli argomenti del corso. In una versione più dettagliata del programma, che verrà consegnato agli studenti ad inizio corso, saranno indicati i paragrafi o capitoli dei testi di riferimento dove la trattazione dei vari argomenti del corso ha preso maggiormente spunto.

## GENERAL RELATIVITY

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

**Periodo:** 1 anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Si consiglia Fisica Teorica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso fornisce una introduzione alle basi teoriche e fenomenologiche della Relatività Generale. Lo studente dovrà anche appropriarsi delle tecniche di base per costruire e studiare le proprietà delle soluzioni delle equazioni di Einstein.

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

Lezioni frontali. Esercitazioni settimanali.

**Contenuti :**

Geometria Riemanniana; Forme differenziali; Il principio di equivalenza; Equazioni di Einstein; Soluzione di Schwarzschild, limite Newtoniano; test sperimentali; spazi massimamente simmetrici; Buchi neri (Diagrammi di Penrose, buchi neri carichi e rotanti); Termodinamica dei buchi neri.

**Modalità di esame :**

Orale con domande su argomenti svolti a lezione e soluzione di un problema.

**Criteri di valutazione :**

Conoscenza e comprensione dei contenuti del corso, abilità nella soluzione di problemi elementari legati ai contenuti del corso.

**Testi di riferimento :**

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

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

## INTRODUCTION TO MANY BODY THEORY

---

(Titolare: Prof. PIER LUIGI SILVESTRELLI)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Metodi Matematici

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso si propone di illustrare le tecniche, fondate sulla teoria quantistica dei campi non relativistici, che permettono di determinare il comportamento meccanico-statistico-quantistico della materia.

**Contenuti :**

Formalismo della seconda quantizzazione.  
Operatori di particella singola e doppia in seconda quantizzazione.  
L'hamiltoniano dei sistemi coulombiani.  
Funzioni di Green a due punti: valore medio di un operatore di particella singola, energia dello stato fondamentale, rappresentazione di Lehmann.  
Teorema adiabatico e determinazione perturbativa dello stato fondamentale.  
Teorema di Wick e grafici di Feynman per i sistemi fermionici a  $T=0$ .  
Self-energia, grafici di polarizzazione (interazione efficace), equazioni di Dyson.  
Energia dello stato fondamentale del gas di elettroni degeneri ("jellium" model) nella ring approximation (RPA).  
Teoria della risposta lineare; applicazioni:  
schermaggio della carica elettrica (oscillazioni di Friedel),  
oscillazioni di plasma, sezione d'urto differenziale per lo scattering anelastico di elettroni (cenni).  
Sistemi Bosonici interagenti a  $T=0$  (cenni).  
Funzioni di Green a temperatura finita: teorema di Wick Matsubara e relativi grafici di Feynman.

**Modalità di esame :**

Orale piú eventuali esercizi in itinere.

**Criteri di valutazione :**

Conoscenze teoriche di base e capacità di applicazione del formalismo in casi di interesse fisico.

**Testi di riferimento :**

A.L. Fetter, J.D. Walecka, *Quantum theory of many-particle system*. New-York: McGraw-Hill,

## INTRODUCTION TO RADIATION DETECTORS

---

(Titolare: Prof. ROBERTO STROILI)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Conoscenza dei fenomeni elettromagnetici, incluse onde elettromagnetiche.

Nozioni di base di relatività ristretta e di meccanica quantistica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Principi e metodi di rivelazione di particelle e della radiazione elettromagnetica. Come si misurano posizione, energia, quantità di moto, e velocità. Tecniche di accelerazione di particelle cariche.

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

Durante il corso verranno presentati mediante lezioni frontali gli argomenti riportati nella sezione "contenuti". Gli argomenti affrontati verranno corredati da esempi ed esercizi per una migliore comprensione le modalità di applicazione dei concetti esposti.

**Contenuti :**

A. Descrizione dei fenomeni fisici considerati: introduzione sulle grandezze misurate negli esperimenti di fisica nucleare, subnucleare e astroparticellare. Perdita di energia di particelle cariche. La formula di Bethe-Block, discussione e applicazioni quantitative ai rivelatori. Identificazione di particelle.

Diffusione Colombiana multipla. Bremsstrahlung, lunghezza di radiazione, spettro della radiazione.

Interazioni fotoni-materia, coefficiente di assorbimento, effetto fotoelettrico, effetto Compton, produzione di coppie.

Radiazione Cerenkov. Cenni alla radiazione di transizione.

Interazioni nucleari.

Scintillazione nei materiali inorganici ed organici. Perdita di energia in un gas, diffusione, effetto di un campo elettrico, velocità di deriva, effetto di un campo magnetico. Perdita di energia in un semiconduttore.

B. Requisiti di rivelatori costruiti in base agli effetti descritti: contatori a scintillazione, contatori Cerenkov, contatori a ionizzazione.

Camere a fili proporzionali, camere a deriva e TPC. Tubi a streamer limitato, RPC. Rivelatori a semiconduttore. Cenni all'elettronica di

trigger e di lettura.

Misura dell'energia e misura della quantità di moto. Struttura generale dei rivelatori attuali.

C. Gli acceleratori di particelle. Acceleratori elettrostatici. Acceleratori lineari. Ciclotrone. Il sincrotrone: stabilità trasversa, focalizzazione debole, oscillazioni di betatrone, matrici di trasporto, focalizzazione forte, quadrupoli e funzioni separate. Cenni all'emittanza, stabilità di fase, oscillazioni di sincrotrone, diagrammi di fase, struttura a pacchetti. Cenni alla radiazione di sincrotrone. Anelli di accumulazione: luminosità, accumulazione di antiprotoni, raffreddamento stocastico.

**Modalità di esame :**

Orale.

**Criteri di valutazione :**

Verranno valutati il livello di apprendimento degli argomenti in programma e la capacità di applicazione a casi pratici.

**Testi di riferimento :**

S. Tavernier, *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics.* : Springer, 2010

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

E' a disposizione degli studenti copia delle trasparenze usate nel corso.

---

## INTRODUCTION TO RESEARCH ACTIVITIES

(Titolare: Prof. ALBERTO CARNERA)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions

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

**Prerequisiti :**

Non è richiesto alcun requisito specifico

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Lo studente acquisirà esperienza sull'organizzazione, svolgimento, presentazione e discussione dei risultati di una attività di ricerca.

**Contenuti :**

Lo studente parteciperà ad uno stage estivo della durata di circa 150 ore in un gruppo di ricerca del Dipartimento o di un laboratorio associato o presso una struttura esterna approvata.

La lista delle attività proposte sarà disponibile nel sito del "Corso di Laurea Magistrale" per la fine della primavera e gli studenti potranno scegliere fra le proposte pubblicate. L'attività verrà svolta sotto la supervisione di un tutor.

**Modalità di esame :**

Orale. Presentazione e discussione dei risultati della ricerca

**Criteri di valutazione :**

Verranno valutati la chiarezza, la capacità di sintesi e la comprensione del contesto scientifico dell'attività svolta

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

---

## NUCLEAR ASTROPHYSICS

(Titolare: Dott. ANTONIO CACIOLLI)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions

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

**Prerequisiti :**

Elementi di meccanica quantistica 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.

**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.

Buciamento 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 rate 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 facility 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  $d\sigma/d\Omega$  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,  $\alpha$ !)

**Modalita' di esame :**

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

**Criteri di valutazione :**

Accertamento della comprensione e della padronanza degli argomenti trattati.

**Testi di riferimento :**

C. E. Rolfs and W. S. Rodney, *Couldrons in the Cosmos*. : The Chicago University Press, 1988

C. Iliadis, *Nuclear Physics of Stars*. : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2007

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

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

## NUCLEAR PHYSICS

(Titolare: Prof.ssa SILVIA MONICA LENZI)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Meccanica quantistica.

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Lo studente approfondira' alcuni degli argomenti visti nel corso di Istituzioni di Fisica Nucleare della Laurea Triennale e sara' introdotto a nuovi argomenti sia sulle reazioni nucleari, sia sulla struttura del nucleo. Il corso fornisce una buona conoscenza delle proprieta' del nucleo atomico che implica l'utilizzo di modelli a molti corpi. Inoltre verranno presentati e discussi i problemi piu' attuali della Fisica Nucleare. Lo studente sara' in grado di interpretare le diverse proprieta' e modi di eccitazione dei nuclei.

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

Le lezioni si svolgono con l'ausilio di slides.

**Contenuti :**

Programma di Fisica Nucleare 2017/2018

Parte prima: Struttura del nucleo e modelli nucleari

Dall'interazione nucleone-nucleone all'interazione efficace nel nucleo.

Grandezze conservate

Simmetrie nella struttura dei nuclei

Metody sperimentali per la struttura nucleare

Modelli nucleari:

1) Modelli collettivi:

Modello della goccia liquida, Modello a gas di Fermi: applicazioni, Deformazione nucleare,

Eccitazioni collettive,

Moti vibrazionali,

Moti rotazionali,

Energy Density Functional

2) Modello Microscopici:

Modello di Hartree Fock,

Modello a shell interattivo,

Modello di Nilsson.

Parte Seconda: Reazioni nucleari

Introduzione: proprieta' del nucleo

-energia di legame

-equazione semiempirica di massa

-proprieta' elettromagnetiche statiche dei nuclei: Momenti di multipolo

Le forze nucleari e il potenziale nucleare

- interazione nucleone-nucleone

- Il deutone

- isospin

- diffusione nucleone-nucleone

- proprieta' delle forze nucleari

Reazioni Nucleari

- considerazioni generali: Cinematica delle collisioni a due corpi

- tipi di reazione e le osservabili coinvolte

- diffusione elastica e sezione  $d\sigma/d\Omega$  urto di reazione



- reazioni di nucleo composto
- reazioni di Knock-out

#### Reazioni con Ioni Pesanti

- reazioni di trasferimento quasi-elastico di nucleoni
- aspetti fenomenologici delle reazioni nucleari alla barriera Coulombiana,
- fusione completa, formazione e decadimento del nucleo composto
- reazioni di fusione di interesse astrofisico
- tecniche sperimentali

Verranno considerati come esempi e argomenti di discussione gli aspetti che riguardano la formazione di nuclei  $\llcorner$ superpesanti $\lrcorner$ , le reazioni con nuclei instabili.

#### Modalità di esame :

L'esame consiste in una prova orale con eventuale presentazione di un lavoro di ricerca su argomenti diversi proposti dal docente.

#### Criteri di valutazione :

Buon dominio dei principali argomenti del corso.

#### Testi di riferimento :

Kris Heyde, *Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1999

#### Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

I libri di testo e le slides messe a disposizione dai docenti nel sito moodle. Inoltre verrà messo a disposizione altro materiale di rassegna di carattere didattico sugli argomenti più attuali della fisica nucleare teorica, sperimentale e applicata.

## PHYSICS LABORATORY

(Titolare: Dott. FRANCESCO RECCHIA)

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions

**Tipologie didattiche:** 16A+48L; 6,00 CFU

#### Prerequisiti :

Laboratori della Laurea Triennale.

#### Conoscenze e abilità da acquisire :

Scopo del Corso è di addestrare all'uso di strumentazione per esperimenti di Fisica delle Interazioni fondamentali, Materia e Astrofisica e degli strumenti di analisi dati. Lo studente sarà in grado di gestire autonomamente un apparato di misura, acquisire ed analizzare i dati e valutare l'accuratezza dei risultati ottenuti.

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

Lezioni introduttive per la descrizione delle esperienze (16 ore, 2 CFU). Saranno poi formati gruppi di 3 studenti. Ciascun gruppo realizzerà 3 esperimenti.

#### Contenuti :

Questo corso presenta agli studenti alcuni esperimenti di Fisica Moderna che permettono l'approccio a tecniche di misura utilizzate nella pratica attuale della Ricerca Scientifica in Fisica delle Interazioni fondamentali, Materia e Astrofisica. Ogni studente svolgerà tre esperimenti.

Gli esperimenti proposti sono i seguenti: 1) Raggi Cosmici 2) Scattering Compton 3) Decadimento del positronio 4) Imaging con raggi gamma 5) Timing rapido 6) Fisica dei plasmi 7) Fluorescenza X 8) Radioattività naturale & Radon Counting. Nei primi cinque esperimenti gli studenti impareranno ad usare vari tipi di scintillatori per la rivelazione di particelle e raggi gamma e dell'elettronica associata.

Verranno costruiti eventi multiparametrici tramite l'uso di tecniche di coincidenze. Gli eventi saranno processati utilizzando un software evoluto (ROOT) per arrivare alla definizione del risultato finale. Nell'esperimento di Fisica dei Plasmi gli studenti studieranno le condizioni che permettono di innescare un plasma a partire da una piccola quantità di gas neutro e studieranno le caratteristiche fisiche del plasma tramite misure elettriche. Gli studenti entreranno a contatto con le tecniche di vuoto e di misura del gas residuo. Gli esperimenti di Fluorescenza X e di radioattività naturale saranno realizzati con rivelatori a semiconduttori ad alta risoluzione (Silici ed HPGe) ed addestreranno gli studenti alla spettroscopia della radiazione X-gamma ed alle tecniche analitiche ad essa connesse.

#### Modalità di esame :

Relazione scritta di gruppo sulle tre esperienze realizzate. Colloquio individuale con presentazione di una delle esperienze e possibili brevi domande sulle altre due. La presentazione prevede la descrizione del fenomeno fisico da esplorare, l'apparato strumentale con elettronica associata, le modalità di acquisizione ed analisi dati.

#### Criteri di valutazione :

Valutazione della capacità mostrata dallo studente in laboratorio. Valutazione delle relazioni scritte e dell'abilità dello studente nel presentare e discutere le esperienze realizzate.

#### Testi di riferimento :

CONTENUTO NON PRESENTE

#### Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

Dispense disponibili in rete.

## QUANTUM FIELD THEORY

(Titolare: Prof. MARCO MATONE)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Meccanica quantistica relativistica. Equazione di Klein-Gordon. Equazione di Dirac. Quantizzazione canonica del campo scalare e del campo fermionico.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso è incentrato sulla formulazione perturbativa della teoria quantistica dei campi. In particolare, le competenze e abilità da acquisire riguardano una buona conoscenza della formulazione path-integral della teoria dei campi, sia nel caso scalare che fermionico. Parte del corso riguarda la formulazione path-integral dell'elettrodinamica quantistica e la teoria della rinormalizzazione.

Oltre a tali conoscenze lo studente dovrà essere in grado di calcolare i contributi fino a 2-loop nel caso scalare ( $\phi^4$ ) e a 1-loop nel caso dell'elettrodinamica quantistica.

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

Il metodo d'insegnamento è basato su una presentazione consequenziale "ab-initio" della formulazione path-integral della teoria dei campi quantistici.

**Contenuti :**

INTRODUZIONE. Aspetti generali delle teorie di campo quantistiche. Formulazioni perturbative e non perturbative. Teoremi di Wigner e di von Neumann, rottura spontanea di simmetria. Teorema di Elitzur. Formulazione minkowskiana e euclidea.

Cenni sulla formulazione assiomatica: assiomi di Wightman, funzioni di Wightman, teorema di ricostruzione di Wightman. Funzioni di Schwinger e teorema di ricostruzione di Osterwalder e Schroeder.

FORMALISMO OPERATORIALE. Covarianza dell'equazione di Dirac. Teorema Spin statistica. Teorema PCT. Formula di riduzione di Lehman, Symanzik e Zimmerman.

PATH-INTEGRAL IN MECCANICA QUANTISTICA. Articolo di Dirac alla base dell'idea di Feynman. Oscillatore armonico forzato. Ampiezza vuoto-vuoto. Rotazione di Wick. Lagrangiane quadratiche. Effetto Bohm-Aharonov.

PATH-INTEGRAL PER LE TEORIE SCALARI. Derivata funzionale. Proprietà generali dell'integrale sui cammini per le teorie scalari. Metodi di convergenza. Propagatore di Feynman. Funzioni di Green. Azione effettiva. Equazione di Schwinger-Dyson. Il caso  $\phi^4$ . Linked-cluster theorem. Formulazione nell'euclideo. Tecniche di calcolo dei determinanti funzionali, l'equazione del calore. Proprietà di scaling della costante d'accoppiamento, dei determinanti e anomalia sotto dilatazioni. Regole di Feynman. Calcolo di alcuni diagrammi di Feynman per  $\phi^4$ . Funzioni proprie di vertice e teorema di Jona-Lasinio.

RINORMALIZZAZIONE. Divergenze ultraviolette e infrarosse. Regolarizzazione dimensionale. Teorie super-rinormalizzabili, rinormalizzabili e non-rinormalizzabili. Controtermini. Relazione tra le funzioni proprie di vertice rinormalizzate e nude. Prescrizioni di rinormalizzazione. La funzione beta. Polo di Landau. Punti fissi ultravioletti e infrarossi. Libertà asintotica e confinamento.

PATH-INTEGRAL FERMIONICO. Integrazione su variabili grassmanniane.

Integrale sui cammini per i campi fermionici liberi. Regole di Feynman per campi spinoriali. Determinanti fermionici.

ELETTRODINAMICA QUANTISTICA. Simmetrie di gauge. Regole di Feynman per il campo di gauge. Gauge fixing. Calcolo dei diagrammi di Feynman a 1-loop della QED. Identità di Ward. Momento magnetico anomalo dell'elettrone. Rinormalizzazione della QED.

**Modalità di esame :**

L'esame consiste in una prova orale sul programma svolto. La prova inizia con il calcolo esplicito di un diagramma di Feynman ( $\phi^4$  o QED) scelto dallo studente.

**Criteri di valutazione :**

Si valuterà il grado di conoscenza e padronanza della materia raggiunto dallo studente. Dovrà mostrare di aver acquisito una buona conoscenza della formulazione path-integral delle teorie di campo quantistiche. Cià<sup>2</sup> riguarda sia la struttura logica generale, che gli aspetti matematici e le motivazioni fisiche.

**Testi di riferimento :**

Pierre Ramond, *Field Theory: A Modern Primer*, 2nd Edition. : Addison-Wesley, 1989

Itzykson, Claude; Zuber, Jean-Bernard, *Quantum field theory* Claude Itzykson and Jean-Bernard Zuber. Mineola: Dover, 2005

S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields. Vol I.* : Cambridge University Press, 2005

Peskin, Michael E.; Schroeder, Daniel V., <<An >>introduction to quantum field theory Michael E. Peskin, Daniel V. Schroeder. Reading: Mass. [etc.], Addison-Wesley, 0

M. Matone & Studenti, Note su alcune parti del corso di Teoria dei Campi 1. <http://www.pd.infn.it/~matone/>, 2017

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Caratteristica del corso è quella di fornire, per quanto possibile e senza inessenziali formalismi, una derivazione step-by-step di tutti i passaggi necessari per una consistente formulazione path-integral della teoria dei campi quantistici. Per questo saranno forniti dettagli sugli aspetti più delicati e dimostrati teoremi non sempre trattati in letteratura. A tal fine, oltre ai testi indicati, nel sito

sono disponibili delle note informali e tutt'altro che complete, alla cui stesura hanno contribuito gli stessi studenti. Gli studenti sono incoraggiati a fornire ulteriori contributi.

## SOLID STATE PHYSICS

(Titolare: Prof. FRANCESCO ANCILOTTO) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

### Prerequisiti :

Conoscenze di elementi di Meccanica Quantistica di base  
Conoscenze di elementi di Meccanica Statistica di base  
(funzioni di distribuzioni, ensemble Canonico e gran Canonico, medie statistiche).

### Conoscenze e abilita' da acquisire :

Concetti fondamentali della fisica dei solidi e relazione tra le leggi microscopiche e le proprieta' misurabili sperimentalmente.  
Capacita' di risolvere problemi che coinvolgono le proprieta' della materia condensata.  
Capacita' di applicare a sistemi reali semplici modelli predittivi che incorporano proprieta' della materia su scala microscopica.

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

Lezioni in aula con uso di lavagna convenzionale e proiettore per trasparenze.  
Settimanalmente verranno proposti agli studenti dei problemi inerenti argomenti trattati a lezione nei giorni immediatamente precedenti, da risolvere per conto proprio.

### Contenuti :

Legami chimici nei solidi;  
La struttura dei cristalli;  
Reticoli di Bravais e basi;  
Strutture cristalline semplici;  
Reticolo reciproco;  
Diffrazione da strutture periodiche e tecniche sperimentali;  
Leggi di Bragg e di Laue;  
Fattore di forma atomico e di struttura,  
Approssimazione adiabatica;  
Dinamica reticolare;  
Approssimazione armonica,  
Matrice Dinamica;  
Fononi;  
Catene lineari monoatomiche e diatomiche;  
Spettroscopia dei fononi;  
Proprietà termiche dei cristalli;  
Calore specifico reticolare;  
Effetti anarmonici: espansione termica, conducibilità termica degli isolanti;  
Elettroni "liberi";  
Calore specifico elettronico;  
"Screening" elettrostatico in un gas di Fermi.;  
Teorema di Bloch;  
Struttura a bande;  
Approssimazione di elettroni "quasi liberi";  
Approssimazione "tight binding";  
Esempi di struttura a bande;  
Fenomeni di trasporto;  
Modello di Drude;  
Effetto Hall nei metalli;  
Modello semiclassico;  
Concetto di "buca";  
Conducibilità elettrica e termica nei metalli;  
Legge di Wiedemann e Franz;  
Semiconduttori;  
Risonanza di ciclotrone;  
Portatori nei semiconduttori intrinseci ed estrinseci;  
"Drogaggio" e stati di drogante;  
Mobilità;  
Conducibilità elettrica nei semiconduttori;  
Effetto Hall nei semiconduttori;

La superficie di Fermi nei metalli reali.

La superconduttività.

**Modalità di esame :**

Esame orale sul programma svolto a lezione.

**Criteri di valutazione :**

Adeguata comprensione e visione di insieme di concetti e argomenti svolti a lezione.

**Testi di riferimento :**

C.Kittel, "Introduzione alla Fisica dello Stato Solido". : ,

N.Ashcroft e D.Mermin, "Solid State Physics". : ,

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Vengono fornite le fotocopie (in formato pdf) delle slides mostrate a lezione.

## STANDARD MODEL

---

(Titolare: Prof. FERRUCCIO FERUGLIO)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions

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

**Prerequisiti :**

Gli studenti dovranno essere famigliari con gli aspetti fondamentali della teoria dei campi, l'elettrodinamica quantistica e il calcolo delle ampiezze per i processi fisici tramite i diagrammi di Feynman.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Famigliarità con i principali aspetti delle interazioni elettrodeboli alla luce dei più recenti risultati sperimentali.

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

Lezioni frontali con illustrazione della teoria elettrodebole mediante problemi svolti ed esercizi. Seminari tematici da parte di esperti.

**Contenuti :**

Riepilogo costruzione Lagrangiana per il Modello Standard; interazioni Yukawiane e fisica del sapore; aspetti della fisica del mesone B; termini di massa per i neutrini, mescolamento leptonic e oscillazioni dei neutrini; anomalie e il decadimento del pione in due fotoni; tests di precisione del Modello Standard; produzione e decadimento del bosone di Higgs.

**Modalità di esame :**

Esame orale

**Criteri di valutazione :**

L'esame orale è volto a valutare la assimilazione da parte dello studente delle proprietà delle Interazioni Elettrodeboli e la loro corretta applicazione nel contesto di semplici problemi.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Appunti dalle lezioni.

## STATISTICAL MECHANICS

---

(Titolare: Prof. ENZO ORLANDINI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions

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

**Prerequisiti :**

Istituzioni di Meccanica Statistica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Termodinamica delle transizioni di fase.

Tecniche di campo medio di matrice di trasferimento, di scaling e di gruppo di rinormalizzazione per modelli statistici di sistemi interagenti a multi corpi.

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

Lezioni frontali di teoria e esercizi su problemi inerenti al corso.

**Contenuti :**

Termodinamica delle transizioni di fase. Punti critici, parametro d'ordine ed esponenti critici. Transizioni di fase e rottura spontanea di simmetria. Argomenti entropia-energia e definizione di dimensione critica inferiore. Modello di Ising. Tecniche di risoluzione esatta per modelli unidimensionali: matrice di trasferimento. Approssimazione di campo medio, principio variazionale. Formulazione funzionale del problema delle transizioni di fase e approssimazione di Landau. Funzioni di correlazione e funzioni di risposta. Scattering e funzioni di correlazione. Singolarità critiche. Relazioni di scala fra esponenti critici. Omogeneità e scaling di Kadanoff. Gruppo di rinormalizzazione nello spazio reale. Universality. Rottura spontanea di simmetria per simmetrie continue e teorema di Goldstone.

**Modalità di esame :**

Prova scritta con problemi da risolvere e domande di teoria.

Orale.

**Criteri di valutazione :**

La valutazione della preparazione dello studente si baserà sia sulla comprensione dei concetti di base del corso sia sulla capacità di

risolvere problemi in modo autonomo e consapevole basandosi sulle metodologie e tecniche analitiche illustrate durante il corso.

**Testi di riferimento :**

L. Peliti, *Statistical Mechanics in a Nutshell*. : Princeton,

K. Huang, *Meccanica Statistica*. : Zanichelli,

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Appunti del corso verranno distribuiti durante le lezioni.

## SUBNUCLEAR PHYSICS

(Titolare: Prof. FRANCO SIMONETTO)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Istituzioni di fisica nucleare e subnucleare, istituzioni di meccanica quantistica, dinamica relativistica, teoria quantistica dei campi, grafici di Feynman, interazione radiazione materia

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Fondamenti e metodologie sperimentali per lo studio della Fisica Subnucleare. Fenomenologia del Modello Standard: interazioni forti, elettromagnetiche, deboli, organizzazione delle particelle elementari, spettroscopia adronica. Capacità di stimare, almeno per ordini di grandezza, le frequenze e le sezioni d'urto dei processi di maggiore interesse. Stato dell'arte e prospettive.

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

Lezioni frontali alla lavagna. Esercizi numerici. Lezioni con proiettore.

**Contenuti :**

Richiami dei concetti fondamentali : classificazione delle particelle elementari sulla base dei numeri quantici dettati da simmetrie e leggi di conservazione. Vita media. Risonanze e distribuzione di Breit Wigner.

QED, richiami di teoria, processi a livello albero e ordini superiori. Running coupling constant. Verifiche sperimentali: successi e problemi.

Interazioni deboli di leptoni e quark. Costante di Fermi ( $G_f$ ), bosoni intermedi massivi, relazione tra  $G_f$  e  $M_W$ . Decadimenti del muone e del tau: universalità leptonica. Violazione di  $P$  e  $C$  nei processi deboli. Altri decadimenti deboli: beta decay di nuclei, barioni e mesoni: soppressione "per elicità". Interazioni di neutrini. Rottura spontanea di simmetria e bosone di Higgs. Misure a LEP e a LHC. Stato e prospettive

QCD. Struttura degli adroni. Annichilazione ee in adroni. Deep inelastic scattering e funzioni di struttura.

Fisica del sapore adronico: cenni sulla matrice CKM. Oscillazioni di sapore e violazione di CP. Stato e prospettive.

**Modalità di esame :**

Esame scritto: soluzione di esercizi numerici, domande a risposta multipla, discussione su temi aperti; esame orale: a scelta interrogazione aperta sull'intero programma svolto, oppure discussione specifica su di un articolo pertinente scelto dallo studente tra quelli proposti a lezione.

**Criteri di valutazione :**

scritto : 10 punti (minimo 5) ; orale 20 punti (minimo 10) ; minimo complessivo 18.

**Testi di riferimento :**

Bettini, Alessandro, *Introduction to elementary particle physics* Alessandro Bettini. Cambridge: Cambridge University Press, 2014

Halzen, Francis; Martin, Alan Douglas, *Quarks and leptons an introductory course in modern particle physics* Francis Halzen, Alan D.

Martin. New York etc.: J. Wiley, 0

Perkins, Donald H., *Introduction to high energy physics* Donald H. Perkins. Menlo Park: CA [etc.], Addison-Wesley, 0

De Angelis, Alessandro; Pimenta, Mário João Martins, *Introduction to particle and astroparticle physics* questions to the

Universe Alessandro De Angelis, Mário João Martins Pimenta. Milan [etc.]: Springer, 2015

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Appunti dalle lezioni, libri di testo. Si potranno scaricare da moodle copie delle diapositive mostrate.

## THE PHYSICAL UNIVERSE

(Titolare: Prof. SABINO MATARRESE) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Si richiede la conoscenza dei concetti fondamentali di meccanica quantistica e di relatività ristretta.

**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 di base 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.

â€¢ Definizioni di distanza in Cosmologia; redshift e legge di Hubble.  
â€¢ Deduzione Newtoniana delle equazioni di Friedmann.  
â€¢ Modelli di Friedmann.  
â€¢ La costante cosmologica: soluzione statica di Einstein e modello di de Sitter.  
â€¢ Soluzioni per il caso piatto e per Universi con curvatura non nulla.

#### Storia termica e Universo primordiale

â€¢ Densità numerica, densità di energia e pressione per un sistema di particelle in equilibrio termodinamico.  
â€¢ Conservazione dell'entropia in un volume comovente.  
â€¢ Relazione temperatura-tempo in epoche primordiali.  
â€¢ Problemi del modello standard: orizzonte, piattezza, etc..  
â€¢ "Inflazione" nell'Universo primordiale. Soluzione del problema dell'orizzonte e della piattezza.  
â€¢ Asimmetria barionica. Bariogenesi (cenni).  
â€¢ La ricombinazione dell'idrogeno: equazione di Saha. Disaccoppiamento della radiazione. Radiazione Cosmica alle Microonde.  
â€¢ Definizione generale di "disaccoppiamento".

#### Materia oscura: proprietà generali

â€¢ Equazione di Boltzmann in cosmologia e relliti cosmici.  
â€¢ Materia oscura calda e fredda: definizione, calcolo dell'abbondanza attuale e proprietà generali in cosmologia.

#### Elementi di astrofisica stellare

â€¢ Nucleosintesi primordiale degli elementi leggeri.  
â€¢ Contrazione gravitazionale e condizioni per l'equilibrio idrostatico  
â€¢ Indice adiabatico ed equilibrio.  
â€¢ Condizioni per il collasso gravitazionale  
â€¢ Teoria di Jeans dell'instabilità gravitazionale  
â€¢ Teoria lineare delle perturbazioni nell'Universo in espansione (cenni)  
â€¢ Collasso sferico di una protostruttura cosmica.  
â€¢ La funzione di massa delle strutture cosmiche: teoria di Press & Schechter.  
â€¢ Contrazione di una protostella  
â€¢ Formazione stellare e gas degeneri di elettroni.  
â€¢ Il Sole: proprietà generali, diffusione radiativa, fusione termonucleare.  
â€¢ Nucleosintesi stellare  
â€¢ Cicli stellari.  
\* Elementi di struttura stellare. Massa minima e massima per una stella.  
â€¢ Fasi finali dell'evoluzione stellare: nane bianche, stelle di neutroni, buchi neri.  
â€¢ Diagramma di Hertzsprung-Russell.

#### 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. and Lucchin, F., *Cosmology, The Origin and Evolution of Cosmic Structure*. Chichester: Wiley and Sons., 2002

Phillips, A.C., *The Physics of Stars*. Chichester: Wiley and Sons., 1994

Kolb, E.W. and Turner, M.S., *The Early Universe*. Redwood City,: Addison-Wesley, 1990

#### 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.

## THEORETICAL PHYSICS

(Titolare: Prof. STEFANO RIGOLIN)

#### Periodo:

I anno, 1 semestre

#### Indirizzo formativo:

Physics of the fundamental interactions

#### Tipologie didattiche:

48A; 6,00 CFU

#### Prerequisiti :

Istituzioni di Fisica Teorica

#### Conoscenze e abilità da acquisire :

Conoscenza e comprensione degli strumenti principali per la descrizione di una teoria quantistica di campo.

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

Lezioni frontali di teoria e esercizi

#### Contenuti :

Introduzione alla teoria dei gruppi: gruppi e algebre di Lie e loro rappresentazioni. Gruppo di Lorentz e di Poincaré e loro rappresentazioni. Equazioni d'onda relativistiche. Introduzione alla teoria di campo classica: Lagrangiana e principio variazionale, teorema di Noether, teoria di campo di Schroedinger, Klein-Gordon, Dirac e Elettromagnetica. Quantizzazione canonica di una teoria di campo libera: esempi relativistici e non-relativistici. Teoria quantistica di campo interagente: espansione di matrice e regole di Feynman.

#### Modalità di esame :

Esame scritto e orale

**Criteri di valutazione :**

Verifica della comprensione dei contenuti del corso e della capacità di svolgere esercizi ad esso attinenti

**Testi di riferimento :**

J. Cornwell, *Group theory in physics : an introduction.* : Academic Press, 1997

B.C. Hall, *Lie groups, Lie algebras and Representations. An elementary introduction..* : Springer-Verlag, 2004

R. D'Áuria , M. Trigiante, *From Special Relativity to Feynman Diagrams.* : Springer, 2011

F. Mandl , G. Shaw, *Quantum Field Theory (2nd edition).* : John Wiley and Sons, 2010

C. Itzykson , J.B. Zuber, *Quantum Field Theory.* : McGraw-Hill, 1980

---

## THEORETICAL PHYSICS OF THE FUNDAMENTAL INTERACTIONS

(Titolare: Prof. PIERPAOLO MASTROLIA)

**Periodo:** I anno, 1 semestre

**Indirizzo formativo:** Physics of the fundamental interactions

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

**Prerequisiti :**

Il corso richiede una conoscenza di base in fisica teorica e teoria quantistica dei campi, per campi liberi.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Come interagiscono le particelle.

Diagrammi di Feynman, Ampiezze e Sezioni d'urto.

Elettrodinamica quantistica.

Principi di Correzioni Radiative e Rinormalizzazione.

Teorie di gauge Abelian e non-Abelian.

Cromodinamica quantistica.

Unificazione Elettrodebole.

Meccanismo di Higgs e Modello Standard.

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

Lezioni frontali ed esercizi

**Contenuti :**

Programma:

1. Elettrodinamica Quantistica.

Regole di Feynman e processi di scattering a livello di albero: diffusione di Rutherford, diffusione di Compton, Bhabha scattering, Bremsstrahlung.

2. Fondamenti di Correzioni radiative e Rinormalizzazione.

3. Teorie di gauge non-Abelian: derivate covarianti e campi di gauge, termini cinetici per i campi di gauge e autointerazione.

4. La teoria di gauge SU(3) e la Cromodinamica Quantistica.

L'algebra del "colore".

Regole di Feynman ed ampiezze di scattering per gluoni e quarks ad ordine albero.

5. Introduzione all'interazione Debole.

Teoria di Fermi: regole di Feynman e decadimento del muone.

La teoria di gauge SU(2) x U(1) e l'unificazione elettrodebole.

6. Rottura spontanea di una simmetria: rotture di una simmetria discreta; rottura di una simmetria U(1) globale; teorema di Goldstone; il meccanismo di Higgs.

7. Rottura spontanea della simmetria elettrodebole e doppietto di Higgs.

8. La Lagrangiana del Modello Standard.

**Modalità di esame :**

Prova scritta e prova orale

**Criteri di valutazione :**

Il superamento della prova scritta e' necessario per l'ammissione alla prova orale.

**Testi di riferimento :**

M.D. Schwartz, *Quantum Field Theory and the Standard Model.* : Cambridge University Press, 2014

M.E. Peskin, D.V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory.* : Addison-Wesley Publishing Company,

F. Mandl and G. Shaw, *Quantum Field Theory.* : Wiley,

---

# Curriculum: Physics of the Universe

---

## ADVANCED PHYSICS LABORATORY A

(Titolare: Prof. GIAMPAOLO MISTURA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 16A+32L; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Laboratori degli anni precedenti e conoscenze di base di elettronica e ottica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Capacità di progettare e realizzare autonomamente un apparato sperimentale di misura. Capacità di analizzare criticamente i risultati per individuare possibili cause di errori sistematici. Capacità di utilizzare le conoscenze acquisite nel percorso di studi per analizzare i dati e ottenere una misura affidabile di una data grandezza fisica.

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

Il corso ha un carattere prettamente sperimentale. Gli studenti partecipanti saranno ripartiti in gruppi da 2 - 3 persone ai quali sarà affidata la realizzazione di una esperienza di fisica da scegliere a piacere fra quattro tipologie di esperimenti: elettronica, ottica, fisica delle particelle, fisica nucleare e fisica dello stato solido. Sono previste anche delle lezioni frontali nelle quali verranno dati elementi generali di fisica sperimentale.

**Contenuti :**

Tecniche generali di fisica sperimentale moderna. In particolare saranno approfonditi elementi di elettronica, ottica, criogenia e tecnica del vuoto.

**Modalità di esame :**

Relazione scritta ed esame orale.

**Criteri di valutazione :**

Autonomia nello svolgimento dell'esperienza, capacità di analisi critica dei risultati. Saranno inoltre valutate positivamente soluzioni originali proposte dallo studente al fine di condurre o migliorare le esperienze proposte.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense scritte dai responsabili del corso scaricabili dal web.

## ASTROPARTICLE PHYSICS

(Titolare: Prof. PARIDE PARADISI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Il corso è autoconsistente in quanto le necessarie basi di meccanica quantistica relativistica, teoria dei campi e relatività generale verranno fornite durante il corso.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Una piena comprensione delle primissime fasi del nostro Universo durante i primi secondi dopo il Big Bang, richiede non soltanto conoscenze di cosmologia ed astrofisica ma anche di fisica delle particelle elementari. Scopo del corso è fornire una visione di insieme di queste discipline attraverso un' introduzione dei Modelli Standard cosmologico e delle particelle elementari.

**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; limite non-relativistico; 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: derivata covariante e QED; teoria dello scattering: matrice S, funzioni di Green, 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; matrice CKM; meccanismo GIM; violazione di CP; gruppo di sapore dello SM: conservazione dei numeri barionico e leptonico (di famiglia); scoperta del bosone di Higgs ad LHC.
- 6) FISICA DEL NEUTRINO: masse di Dirac e Majorana; meccanismo see-saw; neutrini massivi nello SM; matrice PMNS; meccanismo GIM e tasso di decadimento di  $\mu \rightarrow e \gamma$ ; doppio decadimento beta senza neutrini; oscillazione dei neutrini nel vuoto e nella materia: effetto MSW; 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); modello SU(5): SSB e gerarchia di Gauge, unificazione delle costanti di accoppiamento, decadimento del protone, masse ed angoli di mescolamento fermionici; SO(10) ed il meccanismo see-saw.
- 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; congelamento e MO; equazione di Boltzmann; MO fredda, bollente 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 dei monopoli del modello BIG BANG standard; meccanismo dell'inflazione; fluttuazioni quantistiche dell'inflatone; modelli di inflazione; energia oscura.

13) BARIOGENESI: condizioni di Sakharov; interazioni che violano i numeri barionico (B) e leptonico (L); violazione di B e L nello SM via anomalie; conservazione di B-L nello SM; meccanismo elettrodebole; violazione di B in GUTs; generazione di asimmetrie in decadimenti di particelle; 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 :**

Perkins, Donald H., *Particle astrophysics*. Oxford: Oxford University Press, 2009

Gorbunov, Dmitry S.; Rubakov, Valery, *Introduction to the theory of the early universe hot big bang theory*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2011

Kolb, Edward; Turner, Michael, *Early Universe*. New York: Westview Press, 1994

Bilenkij, Samoil, *Introduction to the physics of massive and mixed neutrinos*. Berlin: Springer, 2010

Giunti, Carlo; Kim, Chung Wook, *Fundamentals of neutrino physics and astrophysics*. Oxford: Oxford University Press, 2007

Cheng, Ta-Pei; Li, Ling-Fong, *Gauge theory of elementary particle physics*. Oxford: Clarendon Press, 1984

Schwartz, Matthew Dean, *Quantum field theory and the standard model*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014

Peskin, Michael E.; Schroeder, Daniel V., *An introduction to quantum field theory*. Reading: Mass., Addison-Wesley, 1995

Bjorken, James D.; Drell, Sidney D., *Relativistic quantum mechanics*. New York: McGraw-Hill, 1964

Bergstrom, Lars; Goobar, Ariel, *Cosmology and particle astrophysics*. Berlin: Springer, 2003

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

Verranno fornite agli studenti dettagliate note su tutti gli argomenti del corso. In una versione più dettagliata del programma, che verrà consegnato agli studenti ad inizio corso, saranno indicati i paragrafi o capitoli dei testi di riferimento dove la trattazione dei vari argomenti del corso ha preso maggiormente spunto.

## **COSMOLOGY**

(Titolare: Prof. SABINO MATARRESE)

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

#### **Prerequisiti :**

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

#### **Conoscenze e abilità da acquisire :**

Scopo del corso è 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  $\tilde{I}$

• Equazioni di Einstein perturbate al primo 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  $\tilde{l}$

• 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.

#### Metodi statistici in cosmologia

• Ipotesi ergodica e di "fair sample"  
• Funzioni di correlazione a N-punti  
• Spettro di potenza e teorema di Wiener-Khinchine  
• 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

#### Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

Appunti del docente sulla quasi totalità degli argomenti trattati.

---

## GENERAL RELATIVITY

(Titolare: Prof. GIANGUIDO DALL'AGATA)

**Periodo:** 1 anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

#### Prerequisiti :

Si consiglia Fisica Teorica.

---

## GRAVITATIONAL PHYSICS

(Titolare: Dott. GIACOMO CIANI)

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

#### Prerequisiti :

Si raccomanda relatività generale

#### Conoscenze e abilità da acquisire :

Fondamenti di relatività generale e teoria delle 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.

Panoramica sullo stato attuale del campo dell'astronomia con OG.

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

Lezioni frontali con esercizi ed esempi

#### Contenuti :

Elementi di relatività generale. Onde gravitazionali (OG) nella teoria linearizzata; TT-gauge; interazione con la materia.

Generazione di OG. Approssimazioni di quadrupolo e post-newtoniana. 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

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Le lezioni potrebbero essere arricchite da trasparenze, che saranno rese disponibili agli studenti in anticipo.

Porzioni utili di altre risorse scritte verranno indicate quando utili per parti specifiche del corso.

---

**INTRODUCTION TO RESEARCH ACTIVITIES**

(Titolare: Prof. ALBERTO CARNERA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Non Ã" richiesto alcun requisito specifico

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Lo studente acquisirÃ" esperienza sull'organizzazione, svolgimento, presentazione e discussione dei risultati di una attivita' di ricerca.

**Contenuti :**

Lo studente parteciperÃ" ad uno stage estivo della durata di circa 150 ore in un gruppo di ricerca del Dipartimento o di un laboratorio associato o presso una struttura esterna approvata.

La lista delle attivita' proposte sarÃ" disponibile nel sito del "Corso di Laurea Magistrale" per la fine della primavera e gli studenti potranno scegliere fra le proposte pubblicate. L'attivita' verra' svolta sotto la supervisione di un tutor.

**Modalita' di esame :**

Orale. Presentazione e discussione dei risultati della ricerca

**Criteri di valutazione :**

Verranno valutati la chiarezza, la capacitÃ" di sintesi e la comprensione del contesto scientifico dell'attivita' svolta

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

---

**NUCLEAR ASTROPHYSICS**

(Titolare: Dott. ANTONIO CACIOLLI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Elementi di meccanica quantistica e di fisica generale

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

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

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

Lezioni in aula.

**Contenuti :**

Reazioni termonucleari.

Definizione di sezione  $\sigma$ , 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.

Buciamento 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 verra' data una panoramica dei risultati piu' rilevanti nella letteratura recente.

Calcolo del rate di reazione in casi specifici (cattura diretta, risonanze strette, risonanza larghe)

Come svolgere un esperimento in Astrofisica Nucleare (ogni aspetto del corso verrÃ" discusso in relazione alle facility sperimentali in attivita' e legati agli ultimi risultati scientifici prodotti)

Cenni sul fondo di radiazione naturale

Metodi di schermatura dei rivelatori

PerchÃ" Ã" 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  $\sigma$

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,  $\alpha$ !)

**Modalita' di esame :**

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

**Criteri di valutazione :**

Accertamento della comprensione e della padronanza degli argomenti trattati.

**Testi di riferimento :**

C. E. Rolfs and W. S. Rodney, *Couldrons in the Cosmos*. : The Chicago University Press, 1988

## NUCLEAR PHYSICS

(Titolare: Prof.ssa SILVIA MONICA LENZI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

### Prerequisiti :

Meccanica quantistica.

### Conoscenze e abilità da acquisire :

Lo studente approfondirà alcuni degli argomenti visti nel corso di Istituzioni di Fisica Nucleare della Laurea Triennale e sarà introdotto a nuovi argomenti sia sulle reazioni nucleari, sia sulla struttura del nucleo. Il corso fornisce una buona conoscenza delle proprietà del nucleo atomico che implica l'utilizzo di modelli a molti corpi. Inoltre verranno presentati e discussi i problemi più attuali della Fisica Nucleare. Lo studente sarà in grado di interpretare le diverse proprietà e modi di eccitazione dei nuclei.

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

Le lezioni si svolgono con l'ausilio di slides.

### Contenuti :

Programma di Fisica Nucleare 2017/2018

Parte prima: Struttura del nucleo e modelli nucleari

Dall'interazione nucleone-nucleone all'interazione efficace nel nucleo.

Grandezze conservate

Simmetrie nella struttura dei nuclei

Metodi sperimentali per la struttura nucleare

Modelli nucleari:

1) Modelli collettivi:

Modello della goccia liquida, Modello a gas di Fermi: applicazioni, Deformazione nucleare,

Eccitazioni collettive,

Moti vibrazionali,

Moti rotazionali,

Energy Density Functional

2) Modello Microscopici:

Modello di Hartree Fock,

Modello a shell interattivo,

Modello di Nilsson.

Parte Seconda: Reazioni nucleari

Introduzione: proprietà del nucleo

-energia di legame

-equazione semiempirica di massa

-proprietà elettromagnetiche statiche dei nuclei: Momenti di multipolo

Le forze nucleari e il potenziale nucleare

- interazione nucleone-nucleone

- Il deutone

- isospin

- diffusione nucleone-nucleone

- proprietà delle forze nucleari

Reazioni Nucleari

- considerazioni generali: Cinematica delle collisioni a due corpi

- tipi di reazione e le osservabili coinvolte

- diffusione elastica e sezione d'urto di reazione

- reazioni di nucleo composto

- reazioni di Knock-out

Reazioni con Ioni Pesanti

- reazioni di trasferimento quasi-elastico di nucleoni

- aspetti fenomenologici delle reazioni nucleari alla barriera Coulombiana,

- fusione completa, formazione e decadimento del nucleo composto

- reazioni di fusione di interesse astrofisico

- tecniche sperimentali

Verranno considerati come esempi e argomenti di discussione gli aspetti che riguardano la formazione di nuclei  $\gg$  superpesanti, le reazioni con nuclei instabili.

**Modalita' di esame :**

L'esame consiste in una prova orale con eventuale presentazione di un lavoro di ricerca su argomenti diversi proposti dal docente.

**Criteri di valutazione :**

Buon dominio dei principali argomenti del corso.

**Testi di riferimento :**

Kris Heyde, *Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1999

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

I libri di testo e le slides messe a disposizione dai docenti nel sito moodle. Inoltre verrà messo a disposizione altro materiale di rassegna di carattere didattico sugli argomenti più attuali della fisica nucleare teorica, sperimentale e applicata.

---

**PHYSICS LABORATORY**

(Titolare: Dott. FRANCESCO RECCHIA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 16A+48L; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Laboratori della Laurea Triennale.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Scopo del Corso è di addestrare all'uso di strumentazione per esperimenti di Fisica delle Interazioni fondamentali, Materia e Astrofisica e degli strumenti di analisi dati. Lo studente sarà in grado di gestire autonomamente un apparato di misura, acquisire ed analizzare i dati e valutare l'accuratezza dei risultati ottenuti.

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

Lezioni introduttive per la descrizione delle esperienze (16 ore, 2 CFU). Saranno poi formati gruppi di 3 studenti. Ciascun gruppo realizzerà 3 esperimenti.

**Contenuti :**

Questo corso presenta agli studenti alcuni esperimenti di Fisica Moderna che permettono l'approccio a tecniche di misura utilizzate nella pratica attuale della Ricerca Scientifica in di Fisica delle Interazioni fondamentali, Materia e Astrofisica. Ogni studente svolgerà tre esperimenti.

Gli esperimenti proposti sono i seguenti: 1) Raggi Cosmici 2) Scattering Compton 3) Decadimento del positronio 4) Imaging con raggi gamma 5) Timing rapido 6) Fisica dei plasmi 7) Fluorescenza X 8) Radioattività naturale & Radon Counting. Nei primi cinque esperimenti gli studenti impareranno ad usare vari tipi di scintillatori per la rivelazione di particelle e raggi gamma e dell'elettronica associata.

Verranno costruiti eventi multiparametrici tramite l'uso di tecniche di coincidenze. Gli eventi saranno processati utilizzando un software evoluto (ROOT) per arrivare alla definizione del risultato finale. Nell'esperimento di Fisica dei Plasmi gli studenti studieranno le condizioni che permettono di innescare un plasma a partire da una piccola quantità di gas neutro e studieranno le caratteristiche fisiche del plasma tramite misure elettriche. Gli studenti entreranno a contatto con le tecniche di vuoto e di misura del gas residuo. Gli esperimenti di Fluorescenza X e di radioattività naturale saranno realizzati con rivelatori a semiconduttori ad alta risoluzione (Silici ed HPGe) ed addestreranno gli studenti alla spettroscopia della radiazione X-gamma ed alle tecniche analitiche ad essa connesse.

**Modalita' di esame :**

Relazione scritta di gruppo sulle tre esperienze realizzate. Colloquio individuale con presentazione di una delle esperienze e possibili brevi domande sulle altre due. La presentazione prevede la descrizione del fenomeno fisico da esplorare, l'apparato strumentale con elettronica associata, le modalità di acquisizione ed analisi dati.

**Criteri di valutazione :**

Valutazione della capacità mostrata dallo studente in laboratorio. Valutazione delle relazioni scritte e dell'abilità dello studente nel presentare e discutere le esperienze realizzate.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense disponibili in rete.

---

**RELATIVISTIC ASTROPHYSICS**

(Titolare: Prof. ROBERTO TUROLLA)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**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

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

Lezioni frontali con esercizi ed esempi

**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.

Interazione radiazione-materia. Campo di radiazione. Emissione, assorbimento, scattering. L'equazione del trasporto radiativo. Spessore ottico. Soluzioni particolari dell'equazione del trasporto: diffusione e free-streaming. Principali meccanismi radiativi (electron scattering e free-free).

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. Neutronizzazione. Configurazioni di equilibrio. Il diagramma massa-raggio. Struttura interna di una stella di neutroni. Campo magnetico e rotazione. Magnetosfera, cilindro di luce. Correnti di Goldreich-Julian. Raggio di Alfvén. Frenamento magneto-rotazionale. Evoluzione del periodo. Stima del campo magnetico e dell'età. Il diagramma P-Pdot. Raffreddamento delle stelle di neutroni. Neutrino cooling: URCA e modified URCA. Cooling radiativo. Curve di cooling.

#### **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*. Padova: CLEUP, 2000

Frank, J., King, A.R., Raine, D.J., *Accretion power in astrophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002

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

## **SOLID STATE PHYSICS**

(Titolare: Prof. FRANCESCO ANCILOTTO) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

#### **Prerequisiti :**

Conoscenze di elementi di Meccanica Quantistica di base  
Conoscenze di elementi di Meccanica Statistica di base (funzioni di distribuzioni, ensemble Canonico e gran Canonico, medie statistiche).

#### **Conoscenze e abilità da acquisire :**

Concetti fondamentali della fisica dei solidi e relazione tra le leggi microscopiche e le proprietà misurabili sperimentalmente.

Capacità di risolvere problemi che coinvolgono le proprietà della materia condensata.

Capacità di applicare a sistemi reali semplici modelli predittivi che incorporano proprietà della materia su scala microscopica.

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

Lezioni in aula con uso di lavagna convenzionale e proiettore per trasparenze.

Settimanalmente verranno proposti agli studenti dei problemi inerenti argomenti trattati a lezione nei giorni immediatamente precedenti, da risolvere per conto proprio.

#### **Contenuti :**

Legami chimici nei solidi;

La struttura dei cristalli;

Reticoli di Bravais e basi;

Strutture cristalline semplici;

Reticolo reciproco;

Diffrazione da strutture periodiche e tecniche sperimentali;

Leggi di Bragg e di Laue;

Fattore di forma atomico e di struttura,

Approssimazione adiabatica;

Dinamica reticolare;

Approssimazione armonica,

Matrice Dinamica;

Fononi;

Catene lineari monoatomiche e diatomiche;

Spettroscopia dei fononi;

Proprietà termiche dei cristalli;

Calore specifico reticolare;  
Effetti anarmonici: espansione termica, conducibilità termica degli isolanti;  
Elettroni "liberi";  
Calore specifico elettronico;  
"Screening" elettrostatico in un gas di Fermi.;  
Teorema di Bloch;  
Struttura a bande;  
Approssimazione di elettroni "quasi liberi";  
Approssimazione "tight binding";  
Esempi di struttura a bande;  
Fenomeni di trasporto;  
Modello di Drude;  
Effetto Hall nei metalli;  
Modello semiclassico;  
Concetto di "buca";  
Conducibilità elettrica e termica nei metalli;  
Legge di Wiedemann e Franz;  
Semiconduttori;  
Risonanza di ciclotrone;  
Portatori nei semiconduttori intrinseci ed estrinseci;  
"Drogaggio" e stati di drogante;  
Mobilità;  
Conducibilità elettrica nei semiconduttori;  
Effetto Hall nei semiconduttori;  
La superficie di Fermi nei metalli reali.  
La superconduttività.

**Modalità di esame :**

Esame orale sul programma svolto a lezione.

**Criteri di valutazione :**

Adeguate comprensione e visione di insieme di concetti e argomenti svolti a lezione.

**Testi di riferimento :**

C.Kittel, "Introduzione alla Fisica dello Stato Solido". : ,  
N.Ashcroft e D.Mermin, "Solid State Physics". : ,

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Vengono fornite le fotocopie (in formato pdf) delle slides mostrate a lezione.

## STATISTICAL MECHANICS

(Titolare: Prof. ENZO ORLANDINI) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** 1 anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Istituzioni di Meccanica Statistica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Termodinamica delle transizioni di fase.

Tecniche di campo medio di matrice di trasferimento, di scaling e di gruppo di rinormalizzazione per modelli statistici di sistemi interagenti a multi corpi.

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

Lezioni frontali di teoria e esercizi su problemi inerenti al corso.

**Contenuti :**

Termodinamica delle transizioni di fase. Punti critici, parametro d'ordine ed esponenti critici. Transizioni di fase e rottura spontanea di simmetria. Argomenti entropia-energia e definizione di dimensione critica inferiore. Modello di Ising. Tecniche di risoluzione esatta per modelli unidimensionali: matrice di trasferimento. Approssimazione di campo medio, principio variazionale. Formulazione funzionale del problema delle transizioni di fase e approssimazione di Landau. Funzioni di correlazione e funzioni di risposta. Scattering e funzioni di correlazione. Singolarità critiche. Relazioni di scala fra esponenti critici. Omogeneità e scaling di Kadanoff. Gruppo di rinormalizzazione nello spazio reale. Universality. Rottura spontanea di simmetria per simmetrie continue e teorema di Goldstone.

**Modalità di esame :**

Prova scritta con problemi da risolvere e domande di teoria.

Orale.

**Criteri di valutazione :**

La valutazione della preparazione dello studente si baserà sia sulla comprensione dei concetti di base del corso sia sulla capacità di risolvere problemi in modo autonomo e consapevole basandosi sulle metodologie e tecniche analitiche illustrate durante il corso.

**Testi di riferimento :**

L. Peliti, Statistical Mechanics in a Nutshell. : Princeton,  
K. Huang, Meccanica Statistica. : Zanichelli,

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Appunti del corso verranno distribuiti durante le lezioni.

# STELLAR STRUCTURE AND EVOLUTION

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

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

## Prerequisiti :

Elementi di trigonometria piana, derivate, integrali, nozioni di base di fisica relative ai corsi precedenti.  
Corsi propedeutici: Astronomia I (2 anno) e Astronomia II (mod. A, terzo anno).

## Conoscenze e abilità da acquisire :

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

## Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

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

## Contenuti :

1. Introduzione e panoramica del corso.

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

2. Idrostatica, energetica e scale di tempo.

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

3. Equazione di stato (EoS).

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

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

4. Trasporto di energia all'interno delle stelle.

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

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

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

5. Reazioni termonucleari.

Produzione di energia nucleare (energia di legame). Derivazione della velocità di reazione termonucleare (sezioni d'urto, effetto tunnel, picco di Gamow).

Dipendenza dalla temperatura della velocità di reazione nucleare. Cicli di combustione: bruciamento dell'idrogeno mediante la catena p-p e il ciclo CNO. Bruciamento dell'elio: reazioni 3-alfa e alfa + C. Reazioni di bruciamenti nucleari avanzati.

6. Le equazioni dell'evoluzione stellare.

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

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

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

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

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

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

di massa elevata, effetti di overshooting.

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

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

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

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

**Modalità di esame :**

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

## Criteri di valutazione :

Accertamento della comprensione e della padronanza degli argomenti trattati.

## Testi di riferimento :

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

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

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

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

## Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

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

# THE PHYSICAL UNIVERSE

(Titolare: Prof. SABINO MATARRESE)



**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Si richiede la conoscenza dei concetti fondamentali di meccanica quantistica e di relatività ristretta.

**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 di base 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.

• Deduzione Newtoniana delle equazioni di Friedmann.

• 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.

**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.

• Asimmetria barionica. Bariogenesi (cenni).

• 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 relliti cosmici.

• Materia oscura calda e fredda: definizione, calcolo dell'abbondanza attuale e proprietà generali in cosmologia.

**Elementi di astrofisica stellare**

• Nucleosintesi primordiale degli elementi leggeri.

• Contrazione gravitazionale e condizioni per l'equilibrio idrostatico

• Indice adiabatico ed equilibrio.

• Condizioni per il collasso gravitazionale

• Teoria di Jeans dell'instabilità gravitazionale

• Teoria lineare delle perturbazioni nell'Universo in espansione (cenni)

• Collasso sferico di una protostruttura cosmica.

• La funzione di massa delle strutture cosmiche: teoria di Press & Schechter.

• Contrazione di una protostella

• Formazione stellare e gas degeneri di elettroni.

• Il Sole: proprietà generali, diffusione radiativa, fusione termonucleare.

• Nucleosintesi stellare

• Cicli stellari.

\* Elementi di struttura stellare. Massa minima e massima per una stella.

• Fasi finali dell'evoluzione stellare: nane bianche, stelle di neutroni, buchi neri.

• Diagramma di Hertzsprung-Russell.

**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. and Lucchin, F., *Cosmology, The Origin and Evolution of Cosmic Structure*. Chichester: Wiley and Sons., 2002

Phillips, A.C., *The Physics of Stars*. Chichester: Wiley and Sons., 1994

Kolb, E.W. and Turner, M.S., *The Early Universe*. Redwood City,: Addison-Wesley, 1990

**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.

# THEORETICAL PHYSICS

(Titolare: Prof. STEFANO RIGOLIN) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

## Prerequisiti :

Istituzioni di Fisica Teorica

## Conoscenze e abilità da acquisire :

Conoscenza e comprensione degli strumenti principali per la descrizione di una teoria quantistica di campo.

## Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Lezioni frontali di teoria e esercizi

## Contenuti :

Introduzione alla teoria dei gruppi: gruppi e algebre di Lie e loro rappresentazioni. Gruppo di Lorentz e di Poincaré e loro rappresentazioni. Equazioni d'onda relativistiche. Introduzione alla teoria di campo classica: Lagrangiana e principio variazionale, teorema di Noether, teoria di campo di Schroedinger, Klein-Gordon, Dirac e Elettromagnetica. Quantizzazione canonica di una teoria di campo libera: esempi relativistici e non-relativistici. Teoria quantistica di campo interagente: espansione di matrice e regole di Feynman.

## Modalità di esame :

Esame scritto e orale

## Criteri di valutazione :

Verifica della comprensione dei contenuti del corso e della capacità di svolgere esercizi ad esso attinenti

## Testi di riferimento :

J. Cornwell, *Group theory in physics : an introduction.* : Academic Press, 1997  
B.C. Hall, *Lie groups, Lie algebras and Representations. An elementary introduction..* : Springer-Verlag, 2004  
R. D'Áuria, M. Trigiante, *From Special Relativity to Feynman Diagrams.* : Springer, 2011  
F. Mandl, G. Shaw, *Quantum Field Theory (2nd edition).* : John Wiley and Sons, 2010  
C. Itzykson, J.B. Zuber, *Quantum Field Theory.* : McGraw-Hill, 1980

# THEORETICAL PHYSICS OF THE FUNDAMENTAL INTERACTIONS

(Titolare: Prof. PIERPAOLO MASTROLIA) - Mutuato da: Laurea magistrale in Physics (Ord. 2017)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Physics of the Universe  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

## Prerequisiti :

Il corso richiede una conoscenza di base in fisica teorica e teoria quantistica dei campi, per campi liberi.

## Conoscenze e abilità da acquisire :

Come interagiscono le particelle.

Diagrammi di Feynman, Ampiezze e Sezioni d'urto.

Elettrodinamica quantistica.

Principi di Correzioni Radiative e Rinormalizzazione.

Teorie di gauge Abelian e non-Abelian.

Cromodinamica quantistica.

Unificazione Elettrodebole.

Meccanismo di Higgs e Modello Standard.

## Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Lezioni frontali ed esercizi

## Contenuti :

Programma:

1. Elettrodinamica Quantistica.

Regole di Feynman e processi di scattering a livello di albero: diffusione di Rutherford, diffusione di Compton, Bhabha scattering, Bremsstrahlung.

2. Fondamenti di Correzioni radiative e Rinormalizzazione.

3. Teorie di gauge non-Abelian: derivate covarianti e campi di gauge, termini cinetici per i campi di gauge e autointerazione.

4. La teoria di gauge SU(3) e la Cromodinamica Quantistica.

L'algebra del "colore".

Regole di Feynman ed ampiezze di scattering per gluoni e quarks ad ordine albero.

5. Introduzione all'interazione Debole.

Teoria di Fermi: regole di Feynman e decadimento del muone.

La teoria di gauge SU(2) x U(1) e l'unificazione elettrodebole.

6. Rottura spontanea di una simmetria: rotture di una simmetria discreta; rottura di una simmetria U(1) globale; teorema di Goldstone; il meccanismo di Higgs.

7. Rottura spontanea della simmetria elettrodebole e doppietto di Higgs.

8. La Lagrangiana del Modello Standard.

**Modalità di esame :**

Prova scritta e prova orale

**Criteri di valutazione :**

Il superamento della prova scritta è necessario per l'ammissione alla prova orale.

**Testi di riferimento :**

M.D. Schwartz, *Quantum Field Theory and the Standard Model*. : Cambridge University Press, 2014

M.E. Peskin, D.V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory*. : Addison-Wesley Publishing Company,

F. Mandl and G. Shaw, *Quantum Field Theory*. : Wiley,