

# **CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE FISICHE E ASTROFISICHE - LM-17**

Presidente: Prof. Giovanni Modugno  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Via G. Sansone 1, 50019 Sesto Fiorentino (FI)  
e-mail: [pres-cdl@fisica.unifi.it](mailto:pres-cdl@fisica.unifi.it)  
pagina web: [www.fis-astro-lm.unifi.it](http://www.fis-astro-lm.unifi.it)

## **Denominazione, classe di appartenenza, curricula e strutture didattiche**

È istituito presso l'Università degli Studi di Firenze il Corso di Laurea Magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche. Il Corso è organizzato dalla Scuola di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali. Il Corso di Laurea Magistrale appartiene alla classe delle Lauree Magistrali in Fisica (classe LM-17).

Il Corso di Laurea Magistrale è strutturato in quattro curricula:

- Astrofisica
- Fisica della materia
- Fisica nucleare e subnucleare
- Fisica teorica

Gli obiettivi formativi del Corso di Laurea Magistrale, il quadro generale delle attività formative, la ripartizione delle attività formative in varie tipologie e i CFU (crediti formativi universitari) assegnati a ciascuna tipologia e ai settori scientifico disciplinari sono riportati nell'Ordinamento Didattico allegato al Regolamento Didattico di Ateneo.

Il Corso ha la durata normale di 2 anni. Di norma l'attività dello studente corrisponde al conseguimento di 60 crediti all'anno. Lo studente che abbia comunque ottenuto 120 crediti adempiendo a tutto quanto previsto dall'Ordinamento, può conseguire il titolo anche prima della scadenza biennale.

Sono organi del Corso di Laurea Magistrale il Presidente, il Consiglio di Corso di Laurea Magistrale e il Comitato per la didattica del Corso di Laurea Magistrale. Per la composizione del Consiglio di Corso di Laurea Magistrale e le sue competenze si rimanda al Regolamento Didattico dell'Ateneo.

Composizione e competenze del Comitato per la didattica saranno definite e deliberate dal Consiglio di Corso di Laurea Magistrale.

E' costituita inoltre una Commissione Didattica Paritetica. Per la composizione e le competenze si rimanda al Regolamento Didattico di Ateneo.

## **Obiettivi formativi specifici del Corso**

Gli obiettivi formativi del Corso di Laurea magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche consistono nel fornire:

- una solida preparazione di base in Fisica Classica e Moderna
- un'approfondita conoscenza delle moderne strumentazioni di misura e delle tecniche di analisi dei dati;
- un'approfondita conoscenza di strumenti matematici ed informatici di supporto;
- una rigorosa padronanza del metodo scientifico di indagine;
- un'elevata preparazione scientifica e operativa in almeno una delle discipline che caratterizzano la classe: Astrofisica, Fisica della Materia, Fisica Nucleare e Subnucleare, Fisica Teorica;
- l'attitudine a perfezionare le capacità scientifiche e professionali in un dottorato e ad inserirsi in attività lavorative che richiedono una provata abilità di utilizzo del metodo scientifico, una mentalità aperta e flessibile, predisposta al rapido apprendimento di metodi di indagine e di tecnologie innovative, e la capacità di utilizzare attrezzature complesse.

La preparazione raggiunta nella Laurea Magistrale si qualifica per mezzo di conoscenze specifiche che, a seconda del curriculum scelto, assumono la forma di:

- conoscenza approfondita degli aspetti fondamentali della Fisica teorica e una conoscenza operativa dei metodi matematici e di calcolo numerico e simbolico. In particolare, lo studente apprenderà la teoria dei campi classici e quantizzati e conoscenze di carattere fenomenologico in modo da ottenere una formazione completa e non unicamente polarizzata sugli aspetti teorici e matematici della fisica;
- comprensione e capacità, sia teoriche che sperimentali, a livello approfondito per un'attività di ricerca in

una larga varietà di problematiche della Fisica della Materia;

- conoscenze teoriche e fenomenologiche, insieme a capacità operative, per un'attività di ricerca nel campo della Fisica delle particelle nucleari e subnucleari, della fisica delle onde gravitazionali e di quella delle particelle d'origine cosmica;

- conoscenza approfondita degli aspetti teorici, osservativi e sperimentali dell'Astrofisica e della Fisica dello spazio, con i legami che intercorrono tra le evidenze astrofisiche e la fisica di base.

Per raggiungere i fini indicati, il Corso di Laurea magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche prevede attività formative intese a preparare laureati che abbiano competenze conformi agli obiettivi qualificanti previsti dalla declaratoria della classe LM-17, e abbiano una preparazione che soddisfi ai seguenti criteri:

### **Conoscenza e capacità di comprensione**

I laureati magistrali in Scienze Fisiche e Astrofisiche possiedono:

- una conoscenza, approfondita rispetto a quella del primo ciclo, dei diversi settori della fisica classica e moderna;

- familiarità con il metodo scientifico di indagine e con la sua applicazione, anche in forma originale, alla rappresentazione e alla modellizzazione della realtà fisica;

- abilità nell'individuare e schematizzare gli elementi essenziali di un processo o di una situazione, di elaborare un modello fisico adeguato e di verificarne la validità;

- competenze operative e di laboratorio ad alto livello di specializzazione;

- elevata capacità di utilizzare strumenti matematici ed informatici adeguati.

Tali competenze e capacità vengono sviluppate nel Corso di Laurea attraverso lezioni frontali, esercitazioni e pratiche di laboratorio, ma soprattutto durante il periodo di attività per la preparazione della prova finale.

La verifica delle conoscenze e capacità di comprensione viene effettuata attraverso prove individuali scritte, orali e pratiche di laboratorio.

### **Capacità di applicare conoscenza e comprensione**

Il laureato magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche è specificamente preparato:

- per lavorare in gruppo o singolarmente con ampia autonomia, anche assumendo responsabilità di progetti e strutture;

- per utilizzare le conoscenze specifiche acquisite per la modellizzazione di sistemi fisici anche nei campi non strettamente legati al suo percorso educativo;

- per acquisire ed analizzare dati sperimentali confrontandoli con teorie e modelli;

- per svolgere ruoli di ricerca nell'Università e nei laboratori ed istituti pubblici e privati, italiani ed esteri;

- per promuovere e sviluppare l'innovazione tecnologica correlata con le discipline fisiche in tutti i settori;

- per la divulgazione ad alto livello della cultura scientifica;

- per utilizzare in generale le proprie conoscenze nel risolvere problemi e nell'applicazione del metodo scientifico.

Queste capacità vengono sviluppate durante il corso di Laurea nelle attività di esercitazioni collegate ai corsi, nelle esperienze di laboratorio, ma soprattutto durante il periodo di attività per la preparazione della tesi.

La verifica della capacità di applicare le conoscenze acquisite viene effettuata attraverso prove individuali scritte, orali, pratiche di laboratorio e nella prova finale.

### **Autonomia di giudizio**

Il laureato magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche avrà acquisito un'elevata capacità di ragionamento critico e capacità che gli consentono di affrontare con un alto grado di autonomia diversi tipi di attività lavorative e ruoli, anche assumendo responsabilità di progetti e strutture. Egli è inoltre in grado di valutare gli aspetti etici della ricerca e l'impatto sulla salute pubblica e l'ambiente.

L'autonomia di giudizio viene sviluppata con l'esercizio costante nella soluzione di problemi teorici e sperimentali, e con l'attività collegata alla preparazione della tesi.

La verifica del livello di autonomia raggiunto viene fatta attraverso prove individuali scritte e orali, attività di laboratorio e con la prova finale.

### **Abilità comunicative**

I laureati in Scienze Fisiche e Astrofisiche hanno:

- adeguate competenze e strumenti per la comunicazione e la gestione dell'informazione, in ambiti

specialistici e non;

- capacità di utilizzare efficacemente la lingua inglese nell'ambito specifico di competenza e per lo scambio di informazioni generali.

Tali capacità vengono particolarmente affinate nel periodo di lavoro legato alla preparazione della tesi. La verifica delle capacità espositive, scritte e orali, avviene durante le prove d'esame, nelle relazioni di laboratorio e nella scrittura e presentazione del lavoro di tesi.

### **Capacità di apprendimento**

Il laureato magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche avrà sviluppato capacità di apprendimento dei vari aspetti della fisica e della matematica, utili per accedere a livelli di formazione superiore.

Egli sarà capace di affrontare problemi anche in aree differenti dal proprio percorso formativo e nuove tematiche tramite studio autonomo. Avrà inoltre capacità di valutazione delle proprie conoscenze e abilità nell'individuare strumenti e materiali rilevanti per la risoluzione dei problemi incontrati nel proprio lavoro.

Queste capacità sono affinate in tutti i corsi ma in particolare nella preparazione della tesi di laurea, dove allo studente viene richiesto un elaborato originale di ricerca.

La verifica delle capacità di apprendimento sono affidate agli esami delle varie discipline e alla prova finale.

Le competenze acquisite consentono al laureato in Scienze Fisiche e Astrofisiche di trovare collocazione in una vasta gamma di aree produttive per svolgere attività professionali che richiedono una approfondita conoscenza della fisica e delle sue metodologie, curando attività di modellizzazione e analisi e le relative implicazioni matematiche e informatiche.

Alcuni esempi di sbocchi professionali sono:

i settori di ricerca e sviluppo delle industrie più tecnologicamente avanzate, con particolare riguardo a quelle di elettronica, ottica, optoelettronica e spaziale;

i laboratori di fisica in generale, e, in particolare, di radioprotezione, di diagnostica e terapia medica, di analisi di materiali di interesse storico e artistico, di acquisizione ed elaborazione di dati ambientali;

gli enti preposti al controllo ambientale;

i settori tecnico-commerciali del terziario relativo all'impiego di tecnologie informatiche.

Le competenze acquisite dal laureato in Scienze Fisiche e Astrofisiche permettono l'accesso a tutte le professioni dei punti 2.1.1.1.1 (Fisici) e 2.1.1.1.2 (Astronomi ed astrofisici) e a parte di quelle del punto 2.1.1.4.1 (Analisti e progettisti di software) della classificazione ISTAT delle professioni.

La formazione del laureato in Scienze Fisiche e Astrofisiche è altresì mirata al suo inserimento in attività di ricerca scientifica o tecnologica a livello avanzato, e in attività di insegnamento e diffusione della cultura scientifica.

La Laurea Magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche permette inoltre l'avvio alla ricerca in Fisica e Astrofisica in un dottorato e l'ammissione, nei termini previsti dalla legge, nel canale di reclutamento per gli insegnanti di discipline fisiche nelle scuole secondarie.

### **Requisiti di accesso ai corsi di studio**

#### **a. Titolo di studio**

L'accesso alla Laurea Magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche, classe LM-17 delle Lauree Magistrali, è consentito a coloro che sono in possesso di una laurea della classe L-30 (Scienze e tecnologie fisiche), ex-DM 270/04, oppure di una laurea della classe 20 (Scienze e tecnologie fisiche), ex-DM 509/99, che soddisfino i requisiti curriculari minimi di accesso. Tali requisiti sono rispettati dalla Laurea in Fisica e Astrofisica classe L-30 ex-DM 270/04 dell'Ateneo di Firenze.

L'accesso alla Laurea Magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche, classe LM-17 delle Lauree Magistrali, è altresì consentito a coloro che abbiano acquisito una buona conoscenza scientifica di base nelle discipline matematiche e chimiche e un'adeguata preparazione nelle diverse discipline fisiche e che siano in possesso di altra laurea o diploma universitario di durata triennale o di altro titolo conseguito all'estero e riconosciuto idoneo dalla struttura didattica ai fini dell'ammissione alla Laurea Magistrale.

#### **b. Requisiti curriculari**

Per accedere alla Laurea Magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche, classe LM-17 delle Lauree Magistrali, è necessario possedere i seguenti requisiti curriculari:

- almeno 30 CFU nelle discipline matematiche e informatiche (SSD MAT/XX e INF/XX);
- almeno 5 CFU nelle discipline chimiche (SSD CHIM/XX);
- almeno 48 CFU nelle discipline fisiche dell'ambito sperimentale e applicativo (SSD FIS/01, FIS/07);
- almeno 36 CFU nelle discipline fisiche degli altri ambiti (SSD FIS/02, FIS/03, FIS/04, FIS/05, FIS/06, FIS/08)
- la conoscenza di una lingua dell'Unione Europea oltre l'italiano, almeno di livello B1.

c. Adeguata preparazione individuale

La verifica della preparazione individuale si considera virtualmente assolta per tutti i laureati in possesso di una laurea della classe 25, ex D.M. 509/99, del CL in Fisica istituito presso l'Università degli studi di Firenze. Per gli altri laureati in possesso dei requisiti curriculari di cui sopra, l'adeguatezza della preparazione verrà verificata da una Commissione del Corso di Laurea primariamente sulla base del curriculum di studi presentato con la domanda di valutazione. Qualora il curriculum sia giudicato soddisfacente, la Commissione delibererà l'ammissibilità al corso di Laurea Magistrale rilasciando il previsto nulla osta. In caso contrario l'accertamento della preparazione dello studente avverrà tramite un colloquio che potrà portare al rilascio del nulla osta per l'ammissione con la proposta di un piano di studi personale in accordo con l'Ordinamento anche in deroga con quanto previsto dal presente Regolamento. Non sono in ogni caso previsti debiti formativi, ovvero obblighi formativi aggiuntivi, al momento dell'accesso.

**Articolazione delle attività formative ed eventuali curricula**

Il Corso di Laurea Magistrale prevede un percorso formativo differenziato in vari curricula ed è basato su attività formative relative a cinque tipologie: a) caratterizzanti, b) affini o integrative, c) autonome, d) per la prova finale e la conoscenza della lingua straniera e e) per ulteriori conoscenze linguistiche, informatiche, relazionali ed utili all'inserimento nel mondo del lavoro. Per garantire, nel piano di studi dei laureati magistrali, un'adeguata flessibilità di scelte tra specializzazione nelle discipline fisiche e interdisciplinarietà, differenziata tra i vari curricula, risulta necessario includere i settori da FIS/01 a FIS/08, già presenti tra le attività caratterizzanti, anche fra quelli di tipologia b) affini e integrativi del Corso di Laurea Magistrale.

Le attività autonomamente scelte corrispondono, di norma, a corsi universitari previsti dall'Università di Firenze. Il corso di laurea potrà indicare ogni anno nel Manifesto degli Studi una lista di insegnamenti, tra quelli attivati in Ateneo, che per i loro requisiti di accesso e la loro organizzazione si prestano particolarmente alla libera scelta da parte degli studenti.

Ad ogni tipologia sono assegnati un numero di crediti formativi universitari (CFU), per un totale complessivo di 120 crediti che si assume vengano acquisiti dallo studente a tempo pieno nel corso della durata normale del Corso di Laurea Magistrale, ovvero in due anni.

Per quanto riguarda gli insegnamenti specifici del biennio della Laurea Magistrale, si riporta nelle successive tabelle il quadro sintetico delle attività dei vari curricula.

**Tipologia delle forme didattiche, anche a distanza, degli esami e delle altre verifiche del profitto**

A ogni credito formativo universitario è associato un impegno medio di 25 ore da parte dello studente, suddivise fra didattica frontale (circa un terzo) e studio autonomo (circa due terzi) eventualmente assistito da tutori. Le ore di lezione-esercitazione frontali sono limitate a 500 per anno di corso.

Le forme didattiche previste sono le seguenti: a) lezioni in aula; b) esercitazioni in aula o in aula informatica; c) sperimentazioni in laboratorio ovvero in laboratorio informatico, individuali o di gruppo; d) tirocini presso Dipartimenti dell'Università di Firenze, Enti di ricerca pubblici o privati e Aziende pubbliche o private; e) corsi e/o sperimentazioni presso strutture esterne all'Università o soggiorni presso altre Università italiane o straniere nel quadro di accordi internazionali.

Gli insegnamenti sono di norma organizzati in unità didattiche "semestrali", secondo quanto definito anno per anno nel Manifesto del Corso di Studi. Gli insegnamenti possono essere suddivisi in moduli. La articolazione delle unità didattiche e la suddivisione dei crediti fra i moduli verrà definita anno per anno nel Manifesto del Corso di Studi.

Tutte le attività che consentono l'acquisizione di crediti devono essere valutate. La valutazione è espressa

da apposite commissioni, costituite secondo le norme contenute nel Regolamento Didattico di Ateneo, che comprendono il responsabile dell'attività formativa. Le procedure di valutazione sono costituite, a seconda dei casi, da prove scritte, orali, scritte e orali o da altri procedimenti adatti a particolari tipi di attività. Le attività di tipo a), b) e c) sono di norma valutate con un voto espresso in trentesimi con eventuale lode. Per le attività didattiche che prevedono esercitazioni in laboratorio, l'accreditamento può avvenire mediante valutazione di un lavoro individuale aggiuntivo in laboratorio su aspetti inerenti al corso. L'assegnazione dei crediti di tipologia e), riguardante stage o tirocini presso Enti di ricerca o Università, Aziende pubbliche o private può avvenire sulla base di una relazione dell'attività svolta e non prevede una votazione associata, ma solo un giudizio di congruità espresso dal Consiglio di Corso di Laurea Magistrale. I dettagli delle modalità di esame per i vari corsi di insegnamento sono di norma definiti nel Manifesto del Corso di Studi e illustrati dal docente all'inizio del corso.

Il numero massimo di esami previsto è 11 più gli esami a libera scelta dello studente che, ai sensi del DM 26 luglio 2007, Art. 4, comma 2, e delle relative linee guida, vengono contati come un unico esame.

#### **Modalità di verifica della conoscenza delle lingue straniere**

Il Corso di Laurea non prevede verifiche della conoscenza delle lingue straniere.

#### **Modalità di verifica delle altre competenze richieste, dei risultati degli stages e dei tirocini**

Per quanto riguarda le attività di tipo e), sono previsti sei crediti per stage o tirocini presso Enti di ricerca o Università, Aziende pubbliche o private. L'assegnazione dei corrispondenti crediti può avvenire sulla base di una relazione dell'attività svolta e non prevede una votazione associata, ma solo un giudizio di congruità espresso dal Consiglio di Corso di Laurea Magistrale.

#### **Modalità di verifica dei risultati dei periodi di studio all'estero e relativi CFU**

I crediti acquisiti da studenti in corsi e/o sperimentazioni presso strutture o istituzioni universitarie dell'Unione Europea o di altri paesi, potranno essere riconosciuti dal Corso di Laurea in base alla documentazione prodotta dallo studente ovvero in base ad accordi bilaterali preventivamente stipulati o a sistemi di trasferimento di crediti riconosciuti dall'Università di Firenze.

#### **Eventuali obblighi di frequenza e eventuali propedeuticità**

La frequenza ai corsi è una condizione essenziale per un proficuo inserimento dello studente nell'organizzazione didattica del Corso di Laurea Magistrale.

Per i corsi con esercitazioni di laboratorio la frequenza è obbligatoria.

La successione temporale dei corsi d'insegnamento predisposta dal Corso di Laurea Magistrale ed anno per anno presentata nel Manifesto del Corso di Studi, è quella suggerita allo studente anche per i relativi esami.

#### **Eventuali modalità didattiche differenziate per studenti part-time**

Il Corso di Laurea prevede la possibilità di attivare modalità didattiche differenziate per studenti lavoratori o part-time.

#### **Regole e modalità di presentazione dei piani di studio**

Lo studente al I anno di corso deve presentare, con modalità che saranno definite nel Manifesto del Corso di Studi e comunque non oltre il 31 dicembre di ogni anno, un Piano di Studi individuale, nel quale sia definita la scelta del curriculum, che deve comunque soddisfare i requisiti previsti dalla Classe LM-17 Scienze Fisiche e Astrofisiche. Tale Piano di Studi è soggetto ad approvazione da parte del Consiglio di Corso di Laurea Magistrale e deve essere stilato coerentemente alle tabelle dei curricula riportate in questo Regolamento. Lo studente può successivamente richiedere, secondo modalità che saranno definite nel Manifesto del Corso di Studi, la modifica del Piano di Studi presentato.

Il Piano di Studi deve essere necessariamente coerente con l'Ordinamento Didattico per i 120 CFU complessivi. Per tutti i curricula si raccomanda l'inserimento di almeno 6 CFU di un corso fenomenologico

o di laboratorio. Si ricorda che il Piano di Studi può ricorrere anche ai crediti di tipologia c) (a scelta dello studente) per soddisfare agli obblighi e alle raccomandazioni di questo Regolamento.

Il Manifesto del Corso di Studi, anno per anno, riporterà le raccomandazioni per la stesura dei Piani di Studio per i vari curricula mediante la definizione di percorsi consigliati. Gli studenti che provengono dal Corso di Laurea in Fisica e Astrofisica di I livello dell'Università di Firenze e che scelgono uno dei percorsi consigliati per il curriculum prescelto, avranno il Piano di Studi approvato automaticamente. Il Consiglio di Corso di Laurea si impegna ad approvare qualsiasi piano di studio conforme al presente regolamento.

### **Caratteristiche della prova finale per il conseguimento del titolo**

Per quanto riguarda le attività di tipo d), sono previsti 36 CFU per la prova finale.

Per accedere alla prova finale lo studente deve avere acquisito in totale 84 CFU di insegnamenti e tirocini propri della Laurea Magistrale.

La prova finale per il conseguimento della Laurea Magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche consiste nella redazione di un elaborato scritto/grafico/scritto-grafico e nella sua discussione davanti ad una commissione di laurea appositamente nominata; l'argomento del lavoro di tesi, di carattere sperimentale, tecnologico o teorico, deve riguardare argomenti di fisica moderna e deve essere svolto sotto la guida di un relatore. La discussione deve anche determinare e valutare il contributo originale del candidato.

Il lavoro di tesi può essere svolto sia presso strutture e laboratori universitari, sia presso enti di ricerca pubblici o privati, in Italia o all'estero; ove si renda necessario, la tesi si può anche svolgere presso aziende pubbliche e private.

La valutazione deve considerare sia il curriculum degli studi del candidato che la maturità scientifica da esso raggiunta. Il Corso di Laurea si impegna a pubblicizzare i criteri generali di valutazione. Il voto finale è espresso in centodecimi, più eventuale lode all'unanimità dei commissari.

Nella commissione di laurea i docenti di insegnamenti afferenti al curriculum scelto dal candidato devono essere adeguatamente rappresentati.

### **Procedure e criteri per eventuali trasferimenti e per il riconoscimento dei crediti formativi acquisiti in altri corsi di studio e di crediti acquisiti dallo studente per competenze ed abilità professionali adeguatamente certificate e/o di conoscenze ed abilità maturate in attività formative di livello post-secondario**

Crediti acquisiti da studenti presso altri Corsi di Studio o altre istituzioni universitarie italiane, dell'Unione Europea o di altri paesi, potranno essere riconosciuti dal Corso di Laurea in base alla documentazione prodotta dallo studente ovvero in base ad accordi bilaterali preventivamente stipulati o a sistemi di trasferimento di crediti riconosciuti dall'Università di Firenze.

Nel caso di passaggio da altri corsi di Laurea della stessa Classe, il riconoscimento dei crediti acquisiti avverrà sulla base dei programmi degli insegnamenti corrispondenti; in ogni caso dovranno essere riconosciuti almeno il 50 % dei CFU già maturati.

Gli studenti iscritti al Corso di Laurea Specialistica in Scienze Fisiche e Astrofisiche dei previgenti ordinamenti didattici presso l'Università di Firenze, che intendano iscriversi al presente Corso di Studi, potranno ottenere il riconoscimento dei crediti assegnati ai preesistenti insegnamenti (a tale scopo è predisposta una apposita tabella di conversione).

Altri casi diversi da quelli previsti dovranno essere valutati individualmente dal Consiglio di Corso di Laurea.

### **Servizi di tutorato**

Non è prevista attività di tutorato

### **Pubblicità su procedimenti e decisioni assunte**

I procedimenti e le decisioni di carattere generale assunti dal Consiglio di Corso di Laurea verranno pubblicizzati sulla pagina web del Corso di Studi. I procedimenti e le decisioni di carattere strettamente personale saranno comunicati al destinatario in forma strettamente privata.

## **Valutazione della qualità**

Per tutti gli insegnamenti del Corso di Laurea è prevista la rilevazione dell'opinione degli studenti frequentanti

La Commissione Didattica Paritetica presenta annualmente una valutazione sull'efficacia della didattica predisposta nell'anno accademico precedente, utilizzando a tal fine anche la documentazione relativa alla valutazione delle attività didattiche da parte degli studenti sopra citata. Anche sulla base di questa relazione, il Consiglio di Corso di Laurea introduce nel successivo Manifesto del Corso di Studio le modifiche ritenute più adatte per migliorare la qualità dell'offerta didattica.

Il Corso di Laurea applica le procedure di valutazione della qualità secondo il modello approvato dai competenti Organi Accademici.

## **Semestri, vacanze ufficiali, e calendario delle sessioni di laurea**

Per l'anno accademico 2016-2017 il calendario dei semestri è il seguente:

- I Semestre: 19 settembre - 23 dicembre 2016 (chiusure di Ateneo: 31 ottobre, 9 dicembre)
- II Semestre: 27 febbraio – 16 giugno 2017 (vacanze pasquali: 10-24 aprile)

Per l'anno accademico 2015-2016 il calendario delle sessioni di laurea è il seguente:

21 giugno 2016  
19 luglio 2016  
21 settembre 2016  
25 ottobre 2016  
13 dicembre 2016  
28 febbraio 2017  
19 aprile 2017

Per l'anno accademico 2016-2017 gli appelli di laurea verranno stabiliti e comunicati successivamente.

## **Delegato all'Orientamento**

Prof. Lapo Casetti  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Via G. Sansone 1, 50019 Sesto Fiorentino (FI)  
tel.: 055-4572311  
e-mail: lapo.casetti@unifi.it

## **ALLEGATO A**

Di seguito riportiamo le tabelle con la struttura dei quattro curricula, con gli insegnamenti caratterizzanti proposti o obbligatori ed il numero di affini/integrativi da scegliere nel Piano di Studi, per un totale di 66 CFU. La scelta degli insegnamenti affini/integrativi non è in alcun modo vincolata al particolare curriculum scelto, la tabella, comune per i quattro curricula, è riportata in fondo al presente allegato. Non è ovviamente possibile inserire quegli insegnamenti che siano già stati selezionati per il Piano di Studi individuale della laurea triennale. Indipendentemente dal curriculum scelto, sono inoltre previsti 12 CFU di corsi a libera scelta dello studente, selezionabili sia tra quelli caratterizzanti non già scelti, o tra quelli attivati in altri curricula, o in qualunque altro corso di studio dell'Università di Firenze. Infine, 6 CFU sono dedicati per stage/tirocini e 36 CFU per il lavoro di tesi.

## Curriculum "Astrofisica"

Il curriculum di Astrofisica, è strutturato con il principale obiettivo di assicurare allo studente una elevata padronanza sia di metodi e contenuti scientifici avanzati che di adeguate conoscenze professionali e la capacità di svolgere ruoli di responsabilità nella ricerca. Lo studente dovrà acquisire conoscenze di base sull'astronomia classica e moderna, sulla fisica solare, stellare e della materia interstellare, sulla astrofisica galattica ed extragalattica, sulla cosmologia. Inoltre dovrà familiarizzarsi con le tecniche relative all'uso di strumenti per lo studio degli oggetti celesti nelle diverse regioni spettrali, nonché con le tecniche per l'analisi delle immagini e il trattamento statistico dei dati. Potrà svolgere periodi di stage presso gli Osservatori e Enti di ricerca Italiani e stranieri. Le conoscenze acquisite potranno servire sia per l'accesso al Dottorato di Ricerca in Fisica e Astronomia che per l'inserimento in enti di ricerca a carattere astronomico e spaziale (Osservatori, Istituti CNR, Agenzie Spaziali), nonché nelle industrie del settore o attive nel campo dell'ottica, dell'informatica, del software, dei metodi numerici avanzati.

| Tipologia                         | Insegnamento   | CFU    | SSD        |
|-----------------------------------|--|--------|------------|
| Caratterizzanti                   | Fisica teorica   | 6      | FIS/02     |
|                                   | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |        |            |
|                                   | Atomi, molecole e fotoni   | 6      | FIS/03     |
|                                   | Fisica dello stato solido  | 6      | FIS/03     |
|                                   | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |        |            |
|                                   | Fisica nucleare  | 6      | FIS/04     |
|                                   | Fisica subnucleare   | 6      | FIS/04     |
|                                   | Astrofisica  | 6      | FIS/05     |
|                                   | Astrofisica relativistica  | 6      | FIS/05     |
|                                   | Cosmologia   | 6      | FIS/05     |
|                                   | Plasmi astrofisici   | 6      | FIS/05     |
|                                   | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |        |            |
|                                   | Laboratorio di astrofisica   | 6      | FIS/05     |
| Metodi numerici per l'astrofisica | 6  | FIS/05 |            |
| Affini e integrativi              | <i>Tre corsi a scelta tra quelli riportati nella tabella degli insegnamenti affini e integrativi</i> |        | 18         |
| A scelta studente                 | <i>Massimo due corsi a scelta tra quelli attivati dall'Università di Firenze</i>                     |        | 12         |
| Stage e tirocini                  |  |        | 6          |
| Prova finale                      |  |        | 36         |
| <b>TOTALE</b>                     |  |        | <b>120</b> |

## Curriculum "Fisica della Materia"

Il curriculum di Fisica della Materia presenta un percorso formativo mirato a una preparazione nei campi della fisica atomica e molecolare, della fisica dello stato solido, della fisica dei sistemi complessi e dei sistemi disordinati, della fisica dei laser, dell'ottica classica e quantistica, sia dal punto di vista sperimentale che dal punto di vista teorico. L'attività di ricerca relativa a questi campi della fisica, ai quali lo studente viene indirizzato, si svolge nell'ambito fiorentino presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia ed in centri di ricerca nazionali ed internazionali quali il LENS, l'INO e gli altri istituti del CNR. È richiesto allo studente di approfondire sia le conoscenze tecniche e sperimentali che quelle teoriche, partecipando, particolarmente nell'ambito dello svolgimento delle tesi di laurea, a ricerche in corso. I corsi relativi alla fisica della materia provvedono a dare una solida preparazione nei settori di interesse, che rappresenta una fondamentale premessa per l'eventuale proseguimento degli studi nei corsi di dottorato o per l'inserimento nelle attività produttive industriali ad alto contenuto tecnologico o nelle attività di ricerca negli enti pubblici e privati. Possibili sbocchi professionali possono essere individuati anche in strutture dedicate allo studio e alla conservazione dei beni culturali o ambientali, strutture sanitarie o nel campo dell'informatica e delle sue numerose applicazioni.

| Tipologia                                | Insegnamento   | CFU    | SSD        |
|--|--|--------|------------|
| Caratterizzanti                          | Fisica teorica   | 6      | FIS/02     |
|  | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |        |            |
|  | Fisica nucleare  | 6      | FIS/04     |
|  | Fisica subnucleare   | 6      | FIS/04     |
|  | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |        |            |
|  | Astrofisica relativistica  | 6      | FIS/05     |
|  | Cosmologia   | 6      | FIS/05     |
|  | Atomi, molecole e fotoni   | 6      | FIS/03     |
|  | Fisica dello stato solido  | 6      | 48 FIS/03  |
|  | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |        |            |
|  | Atomi ultrafreddi  | 6      | FIS/03     |
|  | Fotonica   | 6      | FIS/03     |
|  | Teoria quantistica dei solidi  | 6      | FIS/03     |
|  | <i>Due corsi a scelta tra:</i>   |        |            |
| Laboratorio di fisica atomica            | 6  | FIS/03 |            |
| Laboratorio di fisica computazionale     | 6  | FIS/03 |            |
| Laboratorio di fisica dei liquidi        | 6  | FIS/03 |            |
| Laboratorio di fisica dello stato solido | 6  | FIS/03 |            |
| Affini e integrativi                     | <i>Tre corsi a scelta tra quelli riportati nella tabella degli insegnamenti affini e integrativi</i> |        | 18         |
| A scelta studente                        | <i>Massimo due corsi a scelta tra quelli attivati dall'Università di Firenze</i>                     |        | 12         |
| Stage e tirocini                         |  |        | 6          |
| Prova finale                             |  |        | 36         |
| <b>TOTALE</b>                            |  |        | <b>120</b> |

## Curriculum "Fisica Nucleare e Subnucleare"

Il curriculum "Fisica Nucleare e Subnucleare" presenta un percorso formativo mirato a una preparazione nel campo della fisica sperimentale nucleare, subnucleare e, in generale, delle interazioni fondamentali. L'attività di ricerca alla quale lo studente viene indirizzato è di norma quella che si svolge in questi campi presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze e nelle Sezioni e Laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e i centri di ricerca nazionali ed esteri. È richiesto allo studente di approfondire la conoscenza dei metodi sperimentali utilizzati nel campo della Fisica nucleare e subnucleare, nonché di acquisire solide conoscenze fenomenologiche e basi teoriche nel campo. Le conoscenze acquisite servono per il completamento formativo nell'ambito del Dottorato di ricerca in Fisica; inoltre le competenze nel campo dei dispositivi di rivelazione delle radiazioni ionizzanti e delle particelle, dei sistemi elettronici ed informatici sono utili per un inserimento nelle attività industriali, negli enti pubblici preposti ai rilievi ambientali e negli enti di ricerca.

| Tipologia                         | Insegnamento   | CFU    | SSD        |
|-----------------------------------|--|--------|------------|
| Caratterizzanti                   | Fisica teorica   | 6      | FIS/02     |
|                                   | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |        |            |
|                                   | Atomi, molecole e fotoni   | 6      | FIS/03     |
|                                   | Fisica dello stato solido  | 6      | FIS/03     |
|                                   | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |        |            |
|                                   | Astrofisica relativistica  | 6      | FIS/05     |
|                                   | Cosmologia   | 6      | FIS/05     |
|                                   | Fisica nucleare  | 6      | FIS/04     |
|                                   | Fisica subnucleare   | 6      | FIS/04     |
|                                   | Laboratorio nucleare   | 9      | FIS/01     |
|                                   | Laboratorio subnucleare  | 9      | FIS/01     |
| <i>Un corso a scelta tra:</i>     |  |        |            |
| Complementi di fisica nucleare    | 6  | FIS/04 |            |
| Complementi di fisica subnucleare | 6  | FIS/04 |            |
| Affini e integrativi              | <i>Due corsi a scelta tra quelli riportati nella tabella degli insegnamenti affini e integrativi</i> |        | 12         |
| A scelta studente                 | <i>Massimo due corsi a scelta tra quelli attivati dall'Università di Firenze</i>                     |        | 12         |
| Stage e tirocini                  |  |        | 6          |
| Prova finale                      |  |        | 36         |
| <b>TOTALE</b>                     |  |        | <b>120</b> |

## Curriculum "Fisica Teorica"

Il curriculum di "Fisica Teorica" presenta un percorso formativo mirato a una preparazione nel campo della fisica teorica delle interazioni fondamentali e delle particelle elementari, della fisica teorica nucleare e della fisica statistica e dei sistemi complessi. L'attività di ricerca verso la quale lo studente è indirizzato si svolge presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze, la Sezione di Firenze dell'INFN e in centri di ricerca nazionali e esteri. Allo studente sarà chiesto di approfondire la preparazione degli strumenti matematici e fisici necessari alla formalizzazione delle teorie fisiche nonché quella degli aspetti fenomenologici sui quali tali teorie sono basate. La formazione così conseguita può servire per il completamento formativo nell'ambito del dottorato di ricerca in Fisica in Italia o all'estero o per trovare una collocazione professionale nell'ambito degli enti di ricerca sia pubblici che privati.

| Tipologia            | Insegnamento   | CFU |            | SSD    |
|----------------------|--|-----|------------|--------|
| Caratterizzanti      | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |     |            |        |
|                      | Atomi, molecole e fotoni   | 6   |            | FIS/03 |
|                      | Fisica dello stato solido  | 6   |            | FIS/03 |
|                      | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |     |            |        |
|                      | Fisica nucleare  | 6   |            | FIS/04 |
|                      | Fisica subnucleare   | 6   |            | FIS/04 |
|                      | <i>Un corso a scelta tra:</i>  |     |            |        |
|                      | Astrofisica relativistica  | 6   | 48         | FIS/05 |
|                      | Cosmologia   | 6   |            | FIS/05 |
|                      | Fisica teorica   | 6   |            | FIS/02 |
|                      | Metodi matematici per la fisica teorica  | 6   |            | FIS/02 |
|                      | Meccanica statistica I   | 6   |            | FIS/02 |
| Teoria dei campi I   | 6  |     | FIS/02     |        |
| Relatività           | 6  |     | FIS/02     |        |
| Affini e integrativi | <i>Tre corsi a scelta tra quelli riportati nella tabella degli insegnamenti affini e integrativi</i> |     | 18         |        |
| A scelta studente    | <i>Massimo due corsi a scelta tra quelli attivati dall'Università di Firenze</i>                     |     | 12         |        |
| Stage e tirocini     |  |     | 6          |        |
| Prova finale         |  |     | 36         |        |
| <b>TOTALE</b>        |  |     | <b>120</b> |        |

**TABELLA DEGLI INSEGNAMENTI AFFINI E INTEGRATIVI**

| <b>Insegnamento</b>                                     | <b>CFU</b> | <b>SSD</b> |
|---|------------|------------|
| Elettronica generale I                                  | 6          | FIS/01     |
| Elettronica generale II                                 | 6          | FIS/01     |
| Laboratorio di elettronica                              | 6          | FIS/01     |
| Metodi sperimentale di fisica subnucleare               | 6          | FIS/01     |
| Sistemi di acquisizione dati                            | 6          | FIS/01     |
| Introduzione alla teoria della relatività               | 6          | FIS/02     |
| Meccanica statistica II                                 | 6          | FIS/02     |
| Sistemi relativistici                                   | 6          | FIS/02     |
| Storia della chimica e della fisica                     | 6          | FIS/02     |
| Teoria dei campi avanzata                               | 6          | FIS/02     |
| Teoria dei campi II                                     | 6          | FIS/02     |
| Teoria dei sistemi a molti corpi                        | 6          | FIS/02     |
| Teoria dei sistemi dinamici                             | 6          | FIS/02     |
| Teoria delle particelle elementari                      | 6          | FIS/02     |
| Dispositivi e nanostrutture a semiconduttore            | 6          | FIS/03     |
| Elettronica quantistica                                 | 6          | FIS/03     |
| Fisica dei liquidi e soft matter                        | 6          | FIS/03     |
| Fisica dei sistemi complessi e teoria dell'informazione | 6          | FIS/03     |
| Fisica della materia condensata e fenomeni critici      | 6          | FIS/03     |
| Gas quantistici   | 6          | FIS/03     |
| Laser e applicazioni                                    | 6          | FIS/03     |
| Ottica  | 6          | FIS/03     |
| Ottica biomedica  | 6          | FIS/03     |
| Ottica quantistica                                      | 6          | FIS/03     |
| Scienza e tecnologia della luce                         | 6          | FIS/03     |
| Tecnologie quantistiche                                 | 6          | FIS/03     |
| Analisi dati in fisica subnucleare                      | 6          | FIS/04     |
| Fisica delle alte energie                               | 6          | FIS/04     |
| Metodi sperimentali di fisica nucleare                  | 6          | FIS/04     |
| Particelle elementari e applicazioni                    | 6          | FIS/04     |
| Raggi cosmici   | 6          | FIS/04     |
| Tecniche di rivelatori per radiazioni ionizzanti        | 6          | FIS/04     |
| Astrobiologia   | 6          | FIS/05     |
| Astrofisica delle alte energie                          | 6          | FIS/05     |
| Complementi di astronomia                               | 6          | FIS/05     |
| Fisica del mezzo interstellare                          | 6          | FIS/05     |
| Fisica delle galassie                                   | 6          | FIS/05     |
| Fisica solare   | 6          | FIS/05     |
| Tecnologie spaziali                                     | 6          | FIS/05     |
| Fisica medica   | 6          | FIS/07     |
| Tecniche di analisi con fasci di ioni                   | 6          | FIS/07     |
| Topologia differenziale                                 | 6          | MAT/03     |
|   |            |            |

## APPENDICE

### Insegnamenti caratterizzanti

#### **Astrofisica (Prof. G. Risaliti)**

##### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di approfondire lo studio della struttura stellare, iniziato nel corso di laurea triennale, dei processi di produzione, trasporto e irraggiamento di energia in una stella, della formazione stellare, e dei fenomeni di accrescimento.

**Programma:** Struttura stellare: equazione dell'equilibrio energetico, produzione di energia per reazioni di fusione nucleare, flusso radiativo, opacità e media di Rosseland, flusso convettivo, criterio di Schwarzschild, modelli stellari, modello solare standard, problema dei neutrini mancanti, atmosfere stellari, interpretazione degli spettri stellari. Fisica della gravitazione: accrescimento radiale e modello di Bondi, lobi di Roche e punti Lagrangiani, fenomeni mareali, dischi di accrescimento, il modello di Shakura-Sunyaev, instabilità nei dischi. Cenni di formazione ed evoluzione stellare: struttura della Galassia, nubi molecolari, instabilità di Jeans, protostelle, evoluzione nel diagramma HR.

#### **Astrofisica relativistica (Prof. L. Del Zanna, Prof. A. Marconi)**

##### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si propone lo scopo di fornire le basi per lo studio dell'astrofisica relativistica, dai processi radiativi di alte energie alla fisica degli oggetti compatti. Il corso è rivolto agli studenti di tutti i curricula. Le conoscenze di fisica e di astrofisica necessarie per seguire il corso sono quelle fornite nella laurea triennale.

**Programma:** Processi radiativi: emissione di radiazione da parte di cariche in moto, effetti relativistici, processi radiativi di alta energia (bremmstrahlung, sincrotrone, Compton inverso). Applicazioni all'analisi degli spettri delle sorgenti astrofisiche (resti stellari compatti e nuclei galattici attivi). Relatività Generale: principio di equivalenza, metrica e fisica in uno spazio curvo, tensore di Riemann ed equazioni di campo di Einstein, limite di campo debole. Astrofisica relativistica: propagazione ed emissione di onde gravitazionali, spaziotempo statico e isotropo, idrodinamica relativistica e struttura delle stelle compatte, collasso gravitazionale, buchi neri e orbite in geometrie di Schwarzschild e Kerr, cenni all'elettrodinamica degli oggetti compatti.

#### **Atomi, molecole e fotoni (Prof. G. M. Tino)**

##### **I semestre, 6 CFU**

Il corso fornirà allo studente le basi della fisica della materia nella forma atomica e molecolare e della sua interazione con la luce laser. Le conoscenze richieste sono quelle dell'elettromagnetismo, della relatività ristretta e della meccanica quantistica, fornite durante il percorso della laurea triennale.

**Programma:** Struttura e spettri atomici e molecolari. Interazione degli atomi con radiazione elettromagnetica coerente. Spettroscopia con radiazione laser. Raffreddamento e intrappolamento di atomi. Ricerca attuale in fisica atomica e molecolare: fisica fondamentale e applicazioni.

#### **Atomi ultrafreddi (Prof. L. Fallani)**

##### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di introdurre lo studente agli argomenti di ricerca più attuali della Fisica Atomica riguardanti il raffreddamento laser e l'intrappolamento degli atomi. Per una fruizione ottimale del corso se ne consiglia la frequentazione dopo avere seguito il corso di Atomi, Molecole e Fotoni. Aspetti più avanzati della fisica dei gas ultrafreddi possono essere approfonditi nel corso di Gas Quantistici.

**Programma:** Richiami e complementi sull'interazione coerente radiazione/atomo, Effetti meccanici nell'interazione radiazione/atomo, Pressione di radiazione e forza di dipolo, Raffreddamento laser: teoria e schemi sperimentali, Intrappolamento magnetico e ottico, Collisioni ultrafredde, Gas quantistici atomici: condensazione di Bose-Einstein e gas di Fermi ultrafreddi, Reticoli ottici, Simulazione e informazione quantistica, Orologi atomici e spettroscopia di precisione, Interferometria atomica, Esperimenti con ioni intrappolati.

### **Complementi di fisica nucleare (Prof.ssa A. Nannini, Prof. A. Olmi)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di introdurre lo studente ad argomenti di ricerca che riguardano sia la struttura di nuclei lontani dalle condizioni di stabilità, sia i meccanismi di reazione in collisioni fra nuclei, fornendo esempi di risultati sperimentali e indicazioni di tipo modellistico. Si raccomanda la frequentazione del corso dopo aver seguito il corso di Fisica nucleare.

**Programma:** Introduzione alla struttura nucleare, studiata principalmente mediante la spettroscopia gamma. Metodi sperimentali e confronto con i modelli nucleari. Introduzione alle reazioni nucleari, fenomeni di scattering e sezioni d'urto per i diversi canali di reazione. Formazione del nucleo composto e suo decadimento per evaporazione o fissione. Classificazione dei meccanismi di reazione, con particolare riguardo alle collisioni fra nuclei pesanti.

### **Complementi di Fisica subnucleare (Prof. E. Iacopini)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il Corso è volto ad approfondire alcuni aspetti rilevanti di fisica subnucleare nell'ambito del quadro odierno delle particelle elementari e delle loro interazioni. È opportuno che lo studente abbia seguito il corso di Fisica subnucleare. Le conoscenze che sono richieste sono quelle della ordinaria Meccanica Quantistica, della Relatività Ristretta e della sua integrazione con la Meccanica Quantistica, con qualche conoscenza di base della teoria dei campi.

**Programma:** Le simmetrie discrete P, C, T e le loro proprietà. L'operatore  $T^2$  e lo spin. Il momento di dipolo elettrico di un sistema elementare e il suo legame con la violazione di P e di T. Richiami di teoria dei campi: il campo vettoriale libero, con e senza massa e il campo di Dirac. Elicità e chiralità. Il decadimento del  $\pi^0$  e del positronio. La matrice S e le sue proprietà sotto CPT. Formalizzazione del calcolo dell'ampiezza di scattering. Lo spazio delle fasi di due e tre particelle. Plot di Dalitz. Lo spin del pione positivo dal bilancio dettagliato. Il calcolo esplicito della sezione d'urto dello scattering quasi elastico di antineutrino su protone. La larghezza di decadimento del pione carico. Il decadimento del muone sia non polarizzato che polarizzato. Il decadimento del neutrone.

### **Cosmologia (Prof. A. Marconi)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Scopo del corso è quello di fornire le basi fisiche della cosmologia e della formazione delle strutture cosmologiche con particolare riguardo alla formazione delle galassie. Al termine del corso lo studente avrà la possibilità di fare analisi di base delle osservazioni e di costruire semplici modelli dei fenomeni fisici legati alla formazione delle strutture e delle galassie in particolare. Il corso è rivolto agli studenti di tutti i curricula. Le conoscenze di fisica e di astrofisica necessarie per seguire il corso sono quelle fornite nella laurea triennale.

**Programma:** Basi osservative della cosmologia: struttura a larga scala, radiazione cosmica di fondo, legge di Hubble. Basi teoriche: curvatura dello spazio e la metrica, equazioni di Friedmann e loro caratteristiche, parametri cosmologici. Il modello cosmologico standard. La storia termica dell'universo. L'accoppiamento materia radiazione, la ricombinazione. La nucleosintesi. Lo sviluppo e l'evoluzione delle fluttuazioni primordiali. L'importanza della materia oscura. La ricombinazione: il fondo cosmico a microonde e le sue fluttuazioni. Analisi dello spettro della radiazione cosmica di fondo.

### **Fisica dello stato solido (Prof. A. Rettori)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso, intende fornire allo studente, in modo sistematico, i fondamenti della fisica dello stato solido: proprietà del gas di Fermi, cristalli e reticolo reciproco, bande elettroniche, semiconduttori, fononi e cenni sulla superconduttività. Le conoscenze che sono richieste sono quelle dell'elettromagnetismo, della meccanica quantistica, e dell'introduzione alla fisica della materia fornite durante il percorso della laurea triennale.

**Programma:** Modello di Drude della conduzione. Teoria di Sommerfeld del gas di Fermi: potenziale chimico e calore specifico. Gas di elettroni in un campo magnetico esterno: paramagnetismo di Pauli, livelli di Landau e diamagnetismo di Landau. Sonde, funzione di correlazione della densità, fattore di struttura e di forma, fluidi e solidi. Strutture cristalline, simmetrie reticoli cristallini 2d e 3d. Reticolo reciproco e sue proprietà. Elettroni in strutture periodiche: proprietà generali, teorema di Bloch. Modello del potenziale periodico debole e metodo tight-binding, metodo OPW e pseudopotenziale. Dinamica semiclassica degli elettroni, tensore massa efficace, equivalenza elettroni-lacune, oscillazioni di Bloch. Interazioni fra gli elettroni: equazioni di Hartree e Hartree-Fock. Schermaggio e teoria di Thomas-Fermi. Classificazione dei solidi ed energie coesive. Proprietà dei semiconduttori omogenei. Richiami di teoria classica dei solidi armonici. Teoria quantistica dei solidi armonici. Brevi cenni sull'interazione elettrone-fonone nei metalli. Breve rassegna sperimentale sulla superconduttività.

### **Fisica nucleare (Prof. M. Bini)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso intende fornire allo studente le basi della fisica nucleare (interazione fra nucleoni. Le conoscenze che sono richieste sono quelle della ordinaria meccanica quantistica e della relatività ristretta, fornite durante il percorso della laurea triennale.

**Programma:** Sistema Nucleone-Nucleone e dipendenza dallo spin del potenziale NN. Proprietà degli operatori di spin-orbita e tensoriali. Asimmetria e polarizzazione. Teoria mesonica (Yukawa) del potenziale NN. Simmetria di isospin. Numeri magici. Modello a shell della struttura nucleare. Potenziale medio, Interazione di pairing. Antisimmetrizzazione delle funzioni d'onda. Moti nucleari collettivi. Modello vibrazionale e rotazionale. Fissione. Decadimento alfa. Decadimento beta, teoria di Fermi dell'interazione debole.

### **Fisica subnucleare (Prof. E. Iacopini)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso intende fornire allo studente le basi della fisica subnucleare, ovvero il quadro odierno delle particelle elementari e delle loro interazioni. Le conoscenze che sono richieste sono quelle della ordinaria meccanica quantistica e della relatività ristretta, fornite durante il percorso della laurea triennale.

**Programma:** Cenni di Teoria dei Gruppi. Richiami di Relatività ristretta. Dinamica relativistica: urto elastico e anelastico sia nel CM che nel Laboratorio. Moto relativistico di cariche in campo elettrico e magnetico uniforme e costante. Introduzione alle particelle elementari: i raggi cosmici come prima fonte di queste particelle. Pione e muone. Antimateria, positrone, antiprotone e antineutrone. Particelle strane. Introduzione al Modello Standard. Matrice VCKM e simmetria CP. Richiami della teoria di Fermi delle interazioni deboli e approfondimenti riguardo al neutrino (prove di esistenza, misura della sua elicità, massa, oscillazioni).

### **Fisica Teorica (Prof. D. Dominici)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di introdurre la teoria quantistica dei campi, teoria sviluppata nella prima metà del secolo scorso e tuttora metodo importante della fisica teorica per descrivere fenomeni fisici sia relativistici che non relativistici.

**Programma:** Richiami di relatività, formalismo covariante. Richiamo sui campi di spostamento e sui fononi. Formalismo Lagrangiano e teorema di Noether. Campo di Klein Gordon e sua quantizzazione. Quantizzazione del Campo elettromagnetico nel gauge di Coulomb. Rappresentazione di interazione, matrice S e serie di Schwinger. Scattering Thomson e Raman. Equazione di Dirac e sue principali conseguenze. Quantizzazione del campo di Dirac. Effetto Cherenkov. Superfluidità alla Ginzburg-Landau e alla Bogoliubov, cenni alla rottura spontanea di simmetrie. Superconduttività, coppie di Cooper e teoria BCS.

### **Fotonica (Prof. M. Gurioli)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di fornire le nozioni di base e la descrizione di alcune importanti applicazioni della fotonica. In questo quadro ci si propone di introdurre lo studente ad argomenti di ricerca attuali e rilevanti. Si presentano anche tecniche di fabbricazione e caratterizzazione di strutture fotoniche. Il corso si complementa con i corsi di Ottica, Elettronica quantistica e Ottica quantistica.

**Programma:** Richiami di elettromagnetismo. Birifrangenza, materiali di Veselago. Problema agli autovalori, teorema di Floquet-Bloch. Leggi di scala. Bande fotoniche Analogia con MQ. Caso unidimensionale: specchi di Bragg, microcavità planari. Omnidirectional mirror. Caso bidimensionale: onda TE e TM, proprietà di simmetria. Caso tridimensionale: metodi di crescita, membrana, nanocavità. Quasi cristalli QDs, effetto Purcell e strong coupling in MC tridimensionali. Laser senza soglia, Tuning del modo. Polaritone e plasmone di superficie. Nanoparticelle metalliche.

### **Laboratorio di astrofisica (Prof. E. Pace)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire una panoramica delle moderne metodologie sperimentali nel campo dell'astrofisica. Si compone di una prima parte di elementi di ottica geometrica, fotometria, radiometria e spettroscopia, seguita da una descrizione dettagliata di strumenti di uso tipico e di tecniche adottate nelle osservazioni da terra e dallo spazio, come telescopi, camere imaging o spettrometri e polarimetri. Segue una panoramica su campi attuali di attività sperimentale sui quali poi gli studenti potranno svolgere un'attività pratica sperimentale dove potranno applicare quanto appreso durante il corso.

**Programma:** Introduzione: Astronomia sperimentale da terra e dallo spazio. Richiami di ottica generale. Telescopi: tipologie, aberrazioni, parametri ottici. Telescopi nel Radio, raggi X e raggi gamma. Fotometri: tipologie (single pixel o camere imaging) e parametri ottici. Spettrometri: tipologie, configurazioni ottiche e parametri ottici. Tecniche di progettazione ottica. Detectors: tipologie e principi di funzionamento, parametri elettro-ottici e loro caratterizzazione. Analisi di sistemi ottici per applicazioni a terra: caso ottico e caso radio. Analisi di sistemi ottici per applicazioni dallo spazio: casi ottico, UV, raggi X e raggi gamma. Tecniche astrofisiche in varie bande spettrali. Ottiche adattive. Esperimenti di astrobiologia e planetologia. Esperimenti di fisica delle onde gravitazionali.

### **Laboratorio di fisica atomica (Prof. J. Catani, Prof. F. Marin)**

#### **I e II semestre, 6 CFU**

Scopo del corso è fornire competenze sperimentali nel campo della spettroscopia con sorgenti coerenti continue e dell'analisi delle proprietà spettrali della radiazione. La parte sostanziale del corso è l'attività sperimentale svolta dagli studenti, che apprendono l'uso di strumentazione avanzata. Le esperienze di laboratorio indagano fenomeni fisici studiati nei corsi di Fisica

atomica, Ottica quantistica, Elettronica quantistica, Dispositivi e nanostrutture a semiconduttore, Fotonica. Alcune lezioni introduttive sono in comune con i corsi di Laboratorio di fisica dello stato solido e Laboratorio di fisica dei liquidi.

**Programma:** Spettrometri monocromatore e Fabry-Perot, risuonatori ottici. Fasci Gaussiani. Ottiche, filtri, ottiche polarizzanti. Amplificatore "lock-in". Analizzatore di spettro in supereterodina. Fotodiodi ed elettronica per la rivelazione in continua. Spettroscopia in saturazione. Funzionamento ed uso dei laser a semiconduttore. Fluttuazioni e funzioni di correlazione temporale. Vettore di scattering. Rivelazione omodina ed eterodina. Spettroscopia risolta in frequenza e tempo. Rivelatori e tecniche di rivelazione per spettroscopia ultraveloce. Sorgenti laser impulsate. Propagazione di impulsi in mezzi lineari e non lineari. Esperienze di laboratorio: a) Spettroscopia in saturazione del Rb e misura della struttura iperfine. b) Caratterizzazione spettrale di un laser a semiconduttore.

### **Laboratorio di fisica computazionale (Prof. F. Bagnoli)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire gli elementi di base della programmazione scientifica nel campo della fisica. Durante il corso si affronteranno problemi di fisica classica e quantistica da un punto di vista computazionale. Si analizzeranno dinamiche deterministiche e stocastiche di sistemi a pochi e molti gradi di libertà. Chi segue questo corso potrebbe utilmente coniugarlo con: Fisica dei sistemi complessi e teoria dell'informazione (Curriculum di Fisica della Materia); Meccanica statistica I e II, Teoria dei sistemi dinamici (Curriculum di Fisica Teorica). Inoltre, vi sono forti collegamenti ai corsi di fisica dei solidi, dei liquidi e delle transizioni di fase.

**Programma:** Programmazione scientifica. Integrazione numerica di equazioni differenziali ordinarie. Evoluzioni temporali discrete. Biforcazioni, dinamiche regolari e caotiche. Dinamica molecolare e metodi event-driven per sistemi a molti corpi: osservabili, fluttuazioni e distribuzioni di probabilità. Equazioni di reazione-diffusione. Dinamica stocastica: Langevin e Fokker-Planck. Equazione maestra: bilancio dettagliato. Metodo di Monte-Carlo. Ottimizzazione stocastica. Simulazioni quantistiche.

### **Laboratorio di fisica dei liquidi (Prof. R. Torre)**

#### **I e II semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di fornire competenze relative ai principi di funzionamento e alla realizzazione sperimentale delle misure di diffusione di luce (light scattering) di tipo anelastico risolte nel dominio delle frequenze e di misure di tipo eccitazione-sonda (pump-probe) risolte nel dominio dei tempi. Queste tecniche spettroscopiche verranno applicate all'investigazione delle proprietà strutturali e dinamiche della materia condensata, con particolare attenzione ai liquidi e alla soft matter. Si introducono i principi teorici della spettroscopia sia lineare che non-lineare, i fondamenti dell'ottica applicata al caso di impulsi laser ultracorti (femtosecondi), le basi sperimentali necessarie alla realizzazione delle tecniche spettroscopiche. Il corso si complementa con i corsi di Fisica dei liquidi e soft matter e Elettronica quantistica.

**Programma:** Descrizione delle principali tipologie di sorgenti laser. Introduzione ai processi di diffusione della luce: Fluttuazioni e funzioni di correlazione. Osservabili fisiche e segnali misurati. Vettore di scattering. Spettroscopia risolta in frequenza e tempo. Definizione dei processi di scattering e loro utilizzo per la caratterizzazione degli stati condensati. Modelli molecolari dei processi di scattering. Definizione di campo elettromagnetico pulsato, velocità di gruppo e di fase, fenomeni di dispersione. Misure di scattering anelastico: spettroscopia Raman; spettroscopia risolta in frequenza di un liquido molecolare con assegnazione delle righe spettrale alle vibrazioni molecolari. Misure di risolte nel dominio dei tempi: caratterizzazione dello spettro e durata di un impulso laser a femtosecondi, generazione di seconda armonica, spettroscopia di optical Kerr effect.

### **Laboratorio di fisica dello stato solido (Prof. F. Biccari, Prof.ssa A. Vinattieri)**

#### **I e II semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di fornire competenze relative alla messa a punto di apparati sperimentali per la spettroscopia ottica ad alta risoluzione temporale (rivelatori ed elettronica associata). Si presentano anche tecniche di ottica non lineare per la realizzazione di esperimenti di spettroscopia ottica. Il corso ben si complementa con i corsi di Elettronica quantistica, Dispositivi e nanostrutture a semiconduttore e Fotonica.

**Programma:** Rivelatori per spettroscopia ottica: fotomoltiplicatori e fotodiodi. Fotoconteggio e correlazione temporale di singolo fotone. Streak camera. Tecniche di ottica non lineare per spettroscopia risolta in tempo: frequency up-conversion e gate ad effetto Kerr. Autocorrelazione e misure di correlazione di intensità: l'autocorrelatore. Esempi di spettroscopia ottica applicata ai semiconduttori. Esperienze di laboratorio: Misure di luminescenza integrata e risolta temporalmente in nanostrutture di semiconduttore con TCSPC. Misura della durata di un impulso al ps con autocorrelatore e misure di luminescenza risolta temporalmente con streak camera.

### **Laboratorio nucleare (Prof. S. Barlini, Prof. A. Stefanini)**

#### **II semestre, 9 CFU**

Il corso si propone di fornire una introduzione ai principi di funzionamento di vari tipi di rivelatori utilizzati in fisica nucleare. Durante lo svolgimento del corso gli studenti realizzeranno esperienze volte alla messa in opera e alla caratterizzazione dei rivelatori, estraendo dai corrispondenti segnali elettrici le informazioni relative all'efficienza di rivelazione e all'energia depositata dalla radiazione ionizzante incidente.

**Programma:** Interazione particelle-materia. Interazione raggi X e gamma - materia. Camere di ionizzazione. Contatori proporzionali. Rivelatori a scintillazione. Rivelatori di particelle al Silicio. Rivelatori di raggi gamma e X al Germanio. Trasmissione dei segnali. Amplificatori di front-end e formatori. Rumore elettrico. Formazione lineare dei segnali. Conversione analogico digitale. Laboratorio: Rilievo oscillografico di forme d'onda. Formazione dei segnali. Spettri di energia.

### **Laboratorio subnucleare (Prof. L. Bonechi, Prof. R. D'Alessandro, Prof. G. Passaleva)**

#### **I Semestre, 9 CFU**

Il corso fornisce competenze sul funzionamento di alcuni dei principali rivelatori utilizzati in fisica subnucleare e sulle tecniche di misura più utilizzate. Il corso prevede lezioni teoriche ed esercitazioni pratiche in laboratorio. Si utilizzano rivelatori al silicio a microstrisce, camere a fili, scintillatori plastici, fotorivelatori (SiPM), e si realizzano misure con raggi cosmici. Il corso ha utili complementi e sinergie con Analisi dati in fisica subnucleare, Metodi sperimentali in fisica subnucleare e Raggi cosmici.

**Programma:** Introduzione al software LabView™. Scintillatori plastici: misure di efficienza e di raccolta di luce; misure di tempo; realizzazione di trigger e misure di efficienza. Silicon Photomultipliers (SiPM). Spettrometri magnetici. Rivelatori al silicio a microstrip. Esperienze con spettrometro magnetico con rivelatori al silicio a microstrip. Rivelatori a gas; camere a fili (MWPC). Misure di efficienza, guadagno e risoluzione temporale di MWPC.

### **Meccanica statistica I (Prof. L. Casetti)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di fornire i concetti e le nozioni di base della meccanica statistica di equilibrio, dai fondamenti fino alla teoria delle transizioni di fase. Gli argomenti svolti sono di interesse generale, quindi il corso può servire come punto di partenza di un percorso di studi orientato alla fisica statistica e dei sistemi complessi, oppure come un corso di cultura di base inserito in un percorso diverso, di tipo teorico o anche sperimentale. Le conoscenze necessarie per seguire il corso sono quelle fornite nella laurea triennale.

**Programma:** Teoria degli insiemi statistici: operatore densità, postulati della meccanica statistica, insiemi statistici quantistici, limite classico. Limite termodinamico, interazioni a corto e lungo raggio. Teoria delle trasformazioni fra insiemi statistici. Transizioni di fase e fenomeni critici: singolarità delle funzioni termodinamiche, teoria di Lee e Yang. Rottura spontanea della simmetria e rottura dell'ergodicità. Teoria di campo medio, teoria di Landau e di Landau-Ginzburg. Universalità, invarianza di scala, esponenti critici. Gruppo di rinormalizzazione.

### **Metodi matematici per la fisica teorica (Prof. F. Bonechi, Prof. F. Colomo)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di fornire gli strumenti matematici necessari per affrontare lo studio delle teorie fisiche moderne, e comprenderne la formulazione e gli sviluppi tecnici. Il corso si divide in due parti: la prima, tenuta da F. Colomo, è dedicata all'approfondimento dei metodi di variabile complessa; la seconda, tenuta da F. Bonechi, propone un'introduzione alla teoria delle algebre di Lie. Questi argomenti costituiscono una parte essenziale del bagaglio culturale del fisico teorico, qualsiasi sia la sua specializzazione, dalla fisica delle alte energie alla fisica della materia condensata. È quindi un corso pensato per gli studenti di fisica teorica di ogni indirizzo, e ha come sola propedeuticità il corso di Metodi matematici della laurea triennale.

**Programma:** 1) Analisi complessa. Richiami. Funzioni a più valori, tagli, nozione di superficie di Riemann. Teorema dei residui ed applicazioni. Continuazione analitica con esempi. Funzioni speciali: funzioni gamma e zeta, funzione ipergeometrica. Equazioni Fuchsiane. Funzioni ellittiche. Semplici tecniche asintotiche. Metodo del punto sella. 2) Teoria generale delle algebre di Lie. Classificazione delle algebre di Lie semisemplici mediante i diagrammi di Dynkin e rappresentazioni finito dimensionali.

### **Metodi numerici per l'astrofisica (Prof. F. Rubini)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso fornisce una panoramica delle tecniche di soluzione di problemi matematici complessi attraverso l'uso del computer e, in particolare, delle equazioni differenziali che modellano i sistemi fluidi, idrodinamici e magnetoidrodinamici, in ambiente astrofisico. Il corso si articola in lezioni teoriche ed esercitazioni pratiche in cui lo studente costruisce e sperimenta un proprio codice di simulazione numerica, e si conclude con l'introduzione al codice PLUTO, uno dei più potenti strumenti di simulazione in ambiente astrofisico attualmente disponibile. Sono richieste le conoscenze fornite dai corsi della laurea triennale.

**Programma:** Elementi di statistica e teoria degli errori. Richiami di algebra lineare e solutori per sistemi di equazioni lineari con matrici a banda e sparse. Approssimazione e interpolazione di una funzione e trasformate di Fourier e Chebyshev per la simulazione di sistemi fluidi turbolenti. Equazioni differenziali ordinarie; solutori numerici a uno o più passi, espliciti e impliciti. Equazioni differenziali alle derivate parziali; le *caratteristiche*, la formazione degli shocks e i solutori numerici corrispondenti ai diversi regimi. I codici *shock-capturing* e il codice PLUTO. Introduzione al Fortran 95; esercitazioni pratiche su tutti gli argomenti del corso e costruzione di un codice di simulazione numerica (tema d'anno svolto come attività di gruppo).

### **Plasmi astrofisici (Prof. S. Landi, Prof. F. Rubini)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Questo primo corso introduttivo alla fisica ed alla astrofisica dei plasmi ha lo scopo di discutere i modelli di base del plasma ed alcuni fenomeni fondamentali che avvengono nei plasmi naturali e di laboratorio, senza presumere conoscenze ulteriori rispetto a quelle acquisite in una laurea triennale in fisica. Particolare attenzione è rivolta alla metodologia e alla derivazione delle equazioni nei vari regimi, e gli argomenti vengono sviluppati in modo da portare rapidamente gli studenti dalla comprensione dei fenomeni di base allo stato attuale della ricerca.

**Programma:** Introduzione alla fisica del plasma; Teoria delle orbite; Descrizione cinetica dei plasmi; I modelli fluidi; La magnetoidrodinamica; Onde nei plasmi; Instabilità Fluida e cinetiche; Onde d'urto e discontinuità. La Riconnessione Magnetica; Turbolenza Magnetoidrodinamica; Applicazioni astrofisiche.

### **Relatività (Prof. D. Seminara)**

#### **II Semestre, 6 CFU**

Il corso fornisce gli aspetti base della relatività generale partendo dalla relatività speciale fino ad arrivare alle previsioni classiche della relatività generale, alle onde gravitazionali, ai buchi neri ed agli aspetti di base della cosmologia. Il corso si colloca naturalmente anche in un percorso di studi di tipo astrofisico.

**Programma:** Introduzione: Richiami di relatività speciale e teoria dei campi classica. Il campo gravitazionale ed il principio di equivalenza. Cenni di Geometria differenziale: Varietà differenziabili, vettori e forme, derivate di Lie, metrica, geodetiche. Fibrati vettoriali, trasporto parallelo, curvatura e torsione. Equazioni di struttura. Dinamica: Le equazioni di Einstein; Azione di Hilbert. Formulazione del primo ordine. Accoppiamento con la materia di spin 0,  $\frac{1}{2}$ , 1. Leggi di conservazione: Simmetrie e vettori di Killing. Energia ed impulso del campo gravitazionale. Teorema di Positività dell'energia. Onde gravitazionali: Linearizzazione delle equazioni di Einstein. Emissione di quadrupolo. Emissione di un sistema binario. Buchi Neri: Geometria e Proprietà dei buchi neri. Termodinamica classica dei buchi neri. Quantizzazione dei campi in campo gravitazionale esterno; spazio di Rindler; elementi della struttura causale dello spazio tempo; trasformazione di Bogoliubov; radiazione di Hawking e funzioni a due punti a piccole distanze. Cenni di Cosmologia Relativistica.

### **Teoria dei Campi I (Prof. D. Dominici, Prof. M. Redi)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso sviluppa le tecniche necessarie per lo studio della Teoria dei Campi con la tecnica dell'integrale funzionale insieme ad alcune applicazioni a teorie fisiche quali l'elettrodinamica quantistica e altre.

**Programma:** Integrale sui cammini in meccanica quantistica, esempi ed applicazioni. Formalismo funzionale in teorie di campi per campi scalari e fermionici. Formule di riduzione per campi scalari, matrice S e sezione d'urto. Funzionale generatore delle funzioni di Green. Regole di Feynman per la teoria di campo scalare con interazione quartica. Quantizzazione del campo elettromagnetico. Elettrodinamica quantistica con fermioni e scalari. Diagrammi di Feynman della QED. Esempi di sezioni d'urto. Divergenze e teoria della rinormalizzazione. Esempi di correzioni radiative in elettrodinamica e teorie scalari. Potenziale di Coleman-Weinberg. Simmetrie in teoria dei campi.

### **Teoria quantistica dei solidi (Prof. A. Rettori)**

#### **I semestre, 6 CFU**

(Tale corso richiede di aver precedentemente frequentato quello di Fisica dello stato solido). In questo corso completeremo e approfondiremo quanto iniziato a studiare nell'ambito del corso di Fisica dello Stato Solido. Svilupperemo le proprietà generali del trasporto. Nell'ambito del formalismo della seconda quantizzazione vedremo molte implicazioni derivanti dall'interazione elettrone-elettrone, e formuleremo la teoria del funzionale densità. Studieremo le implicazioni dell'interazione elettrone-fonone compresa la superconduttività. Concluderemo con le proprietà delle giunzioni Josephson.

**Programma:** Diamagnetismo e paramagnetismo. Origine delle interazioni magnetiche: scambio e superscambio, interazione antisimmetrica di Dzyaloshinskii-Moriya. Formulazione generale del trasporto, relazioni di Onsager, equazione di Boltzmann. Approssimazione del tempo di rilassamento. Scattering da impurezze magnetiche ed effetto Kondo. Interazione elettrone-

elettrone. Seconda quantizzazione. Modello di Hubbard. Funzione dielettrica di Lindhard. Oscillazioni di Friedel. Risposta a perturbazioni magnetiche: Interazione RKKY. Teoria del funzionale densità: teorema di Hohenberg-Kohn ed equazione di Kohn-Sham. Interazione elettrone-fonone ed Hamiltoniana di Froehlich. Anomalia Kohn ed instabilità di Peierls. Superconduttività: coppie di Cooper, Hamiltoniana BCS. Giunzioni Josephson.

## **Insegnamenti affini/integrativi**

### **Analisi dati in fisica subnucleare (Prof. V. Ciulli, Prof. N. Mori)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso è rivolto agli studenti che vogliono approfondire le loro conoscenze di statistica ed imparare ad utilizzare i programmi che permettono di simulare ed analizzare i dati raccolti negli esperimenti di fisica subnucleare, agli acceleratori e nei rivelatori di raggi cosmici. Questo corso è un naturale complemento dei corsi di fisica nucleare e subnucleare, ma può essere utile per tutti coloro che intendono confrontarsi con l'analisi di grandi campioni di dati, ad esempio in astrofisica o negli esperimenti sulle onde gravitazionali.

**Programma:** Fondamenti di statistica nell'approccio frequentista e Bayesiano. Algoritmi e simulazioni Monte Carlo. Test statistici e tecniche di fit. Intervalli di confidenza e limiti. Tecniche di analisi multivariata. Deconvoluzione delle distribuzioni. Programmazione in C++ e Python. Simulazione e ricostruzione degli eventi nelle collisioni di particelle ad alta energia e nella fisica dei raggi cosmici. Il programma ROOT per l'analisi dei dati, con applicazioni alla fisica subnucleare ed esempi pratici.

### **Astrobiologia (Prof. J. R. Brucato)**

#### **II semestre, 6 CFU**

L'astrobiologia si occupa dello studio dell'origine, evoluzione e distribuzione della vita nell'Universo. È una scienza multidisciplinare che trae beneficio dalle conoscenze che provengono da discipline distinte come la biologia, chimica, astronomia, geologia, planetologia, e genetica. La vita è governata da complesse reazioni basate sulla chimica del carbonio, probabile risultato dell'interazione di molecole organiche e materiale inerte proveniente dallo spazio. Esistono sistemi planetari con caratteristiche tali da possedere regioni di abitabilità dove la vita può originarsi e proliferare. Quali fattori hanno causato la comparsa della vita sulla Terra? Quali sono le condizioni del pianeta terra che hanno portato alla comparsa degli eucarioti? Come possiamo rivelare segni di vita in altri ambienti dello spazio?

**Programma:** Proprietà della materia interstellare. Stelle evolute, stelle ricche di carbonio e di ossigeno. Formazione stellare, dischi planetari, formazione dei pianeti. Asteroidi e comete. Meteoriti: classificazione e proprietà. Il Sistema Solare. Marte, Titano e Europa. Proprietà degli Esopianeti. Definizione di vita. Le basi biologiche della vita. L'evoluzione.

### **Astrofisica delle alte energie (Prof.ssa E. Amato, Prof. N. Bucciantini)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso fornisce le basi teoriche necessarie allo studio dei fenomeni che caratterizzano l'astrofisica delle alte energie (eventi di supernova, gamma-ray burst, stelle di neutroni, pulsar, buchi neri). Sono richiamate nozioni di relatività generale, di idrodinamica relativistica e di processi radiativi non termici. Il corso è consigliato per chi abbia già seguito e voglia approfondire gli argomenti trattati in Astrofisica Relativistica, ed è fruibile anche da studenti degli indirizzi di fisica teorica o di fisica nucleare e subnucleare, nonché da studenti di dottorato.

**Programma:** Richiami di relatività generale; idrodinamica e magneto-idrodinamica relativistica; venti, shocks ed accrescimento in relatività generale; moti esplosivi; stelle relativistiche; struttura delle stelle di neutroni; elettrodinamica degli oggetti compatti; fenomenologia delle pulsar;

magnetars; gamma-ray bursts; interazione di venti relativistici con l'ambiente; nebulose di sincrotrone; fenomenologia dei raggi cosmici; meccanismi di accelerazione di particelle

### **Complementi di astronomia (Prof. M. Romoli, Prof. M. Pancrazzi)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di dare una introduzione a ottica e spettroscopia astronomiche e alla radioastronomia. Saranno discusse le problematiche astrofisiche, le tecniche strumentali, e il trattamento dei dati. Sono previste visite ed esperienze osservative.

**Programma:** Ottica astronomica. Richiami di ottica geometrica; aberrazioni ottiche; telescopi rifrattori e a riflessione; influenza dell'atmosfera e seeing; strumentazione ottica moderna; i grandi telescopi. Radioastronomia. Le sorgenti di interesse radioastronomico; i processi di emissione; la strumentazione. Interferometria radioastronomica. Spettroscopia astronomica: strumenti, rivelatori a stato solido, formazione dello spettro. Analisi di immagini astronomiche. Le distanze in astronomia; verifica osservativa della Legge di Hubble presso un osservatorio INAF.

### **Dispositivi e nanostrutture a semiconduttore (Prof.ssa A. Vinattieri)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di fornire competenze riguardo ai principi base della fisica dei semiconduttori e mostrare alcune applicazioni a semplici dispositivi. Vengono forniti anche i concetti fondamentali per comprendere la realizzazione di nanostrutture e le loro proprietà ottiche ed elettroniche. Si discutono anche alcuni esempi di dispositivi basati su giunzioni p-n e nanostrutture per applicazioni nel campo dell'optoelettronica e della computazione quantistica. Il corso è complementare ai corsi di Fotonica e Laboratorio di fisica dello stato solido.

**Programma:** Teorema di Bloch. Stati elettronici in un solido cristallino. Struttura a bande. Concetto di lacuna. Impurezze sostituzionali e drogaggio. Sistemi in equilibrio e statistica di Fermi-Dirac. Modello di Drude: trasporto, diffusione. Proprietà ottiche dei semiconduttori. Giunzioni p-n, metallo-semiconduttore metallo-ossido-semiconduttore e semplici applicazioni a dispositivi. Eterogiunzioni e ingegnerizzazione del band gap. Nanostrutture a confinamento quantistico. Stati elettronici in strutture a confinamento quantistico. Il grafene ed i nanotubi di carbonio. Alcuni esempi di dispositivi basati su nanostrutture (Emettitori di singolo fotone. Dispositivi ad effetto tunnel.)

### **Elettronica generale I (Prof. R. D'Alessandro, Prof. S. Ricciarini)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso/laboratorio partendo da nozioni base di elettronica digitale, porterà lo studente a progettare e a realizzare una macchina a stati implementata su dispositivi di tipo FPGA. La macchina è in grado di gestire una trasmissione dati con un computer e controllare un sistema di acquisizione dati. Con l'esperienza maturata lo studente sarà in seguito in grado di progettare autonomamente interfacce e i sistemi di controllo sofisticati da impiegare nei vari laboratori sia di struttura della materia che di fisica nucleare per misure di grandezze fisiche.

**Programma:** Richiami su porte logiche, famiglie di dispositivi logici e complex programmable logic devices (CPLD). Logica combinatoriale. codificatori e multiplexer, controllo di parità, sommatore e logiche di look ahead. Logica sequenziale, flip-flop, contatori, shift-register, state machines. Protocolli di comunicazione seriale. Simulazione e programmazione di dispositivi logici complessi. Utilizzo di ADC e memorie FIFO. Programmazione in linguaggio VHDL.

### **Elettronica generale II (Prof. M. Carlà)**

#### **II Semestre, 6 CFU**

Approfondimento delle moderne tecniche elettroniche per la amplificazione e generazione di segnali.

**Programma:** Reti attive lineari e non lineari. Condizioni di stabilità e stazionarietà per le reti lineari. Conversione di frequenza e suo utilizzo in radiotecnica e nella strumentazione scientifica: principi di funzionamento dell'analizzatore di spettro eterodina e dell'amplificatore lock-in. Generazione di segnali. Stabilità e purezza spettrale. Tecniche di generazione Phase Lock Loop (PLL) e Direct Digital Synthesis (DDS). Principi di base dei circuiti di potenza ad alta efficienza energetica. Esperienze di laboratorio: Studio di vari esempi di applicazione della reazione negativa e positiva: realizzazione dei circuiti e misura delle caratteristiche di funzionamento.

### **Elettronica quantistica (Prof. S. Cavalieri)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire agli studenti le conoscenze di base dell'elettronica quantistica utili in vari ambiti della struttura della materia e della fisica applicata. L'obiettivo principale è lo studio dell'interazione radiazione materia con particolare attenzione alla propagazione della radiazione ottica e all'utilizzo di mezzi materiali per la manipolazione, la caratterizzazione e la generazione di radiazione ottica coerente. Le conoscenze necessarie per seguire il corso sono quelle fornite dalla laurea triennale. Il corso è complementare con i corsi di Laboratorio di fisica dello stato solido e Fotonica.

**Programma:** Richiami e estensioni dell'interazione radiazione materia. Propagazione in mezzi anisotropi e/o dispersivi. Propagazione di campi risonanti con transizioni del sistema materiale. Effetto elettro-ottico e acusto-ottico. Introduzione e utilizzo del formalismo della matrice densità. Equazioni del laser. Laser in funzionamento continuo e transiente. Funzionamento di laser a impulsi ultracorti. Polarizzazioni non lineari: effetti del secondo e del terzo ordine. Generazione di frequenza somma e differenza: teoria e tecnica. Processi dovuti a effetto Kerr ottico: optical gating, self phase modulation, self focusing. Raman Stimolato. Caratteristiche temporale e spettrali di impulsi ottici: metodi di misura. Generazione di armoniche di alto ordine.

### **Fisica dei liquidi e soft matter (Prof.ssa E. Guarini, Prof. R. Torre)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Nel corso si introducono le principali caratteristiche della "materia condensata soffice": Liquidi e miscele di liquidi, cristalli liquidi, polimeri, gel, colloidi e fasi vetrose. L'esistenza delle mesofasi e delle fasi fuori-equilibrio è introdotta tramite semplici modelli termodinamici e di meccanica statistica. Si utilizzano modelli fisici di base per descrivere le particolari proprietà meccaniche, ottiche ed elettriche di questi materiali. Alcuni fenomeni verranno illustrati tramite dimostrazioni pratiche realizzate in aula.

**Programma:** Introduzione generale alla fisica della materia soffice. Definizione dei potenziali intermolecolari e delle teorie dello stato liquido. Descrizione e modellizzazione delle anomalie proprietà meccaniche ed ottiche presenti nella soft-matter. Introduzione generale al problema delle transizioni di fase con applicazione specifica alla formazione delle mesofasi, fasi gel e colloidali, e ai fenomeni di separazione di fase. Il corso si focalizza sulle caratteristiche e i modelli fisici adeguati per: le miscele liquido-liquido, i cristalli liquidi, i polimeri, i gel, i colloidi e le fasi vetrose. Tramite le applicazioni su questi materiali si introducono i concetti di: tensore degli sforzi e degli spostamenti, visco-elasticità ed elasticità entropica; fenomeni ed esponenti critici, parametri d'ordine, teorie di Landau, spinoidale e metastabilità; random walk, entropia configurazionale e probabilità Gaussiana; moto Browniano e diffusione; stati metastabili e fuori equilibrio. Gli aspetti pratici e applicativi sono sempre descritti.

### **Fisica dei sistemi complessi e teoria dell'informazione (Prof. F. Bagnoli, Prof. D. Fanelli)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire una visione globale della fisica dei sistemi dinamici e dei sistemi estesi (composti da molti elementi), guidando lo studente attraverso una galleria di esempi ed applicazioni con un taglio computazionale. Si cercherà di mostrare come approcci così

apparentemente diversi come quelli basati sui sistemi dinamici, sui processi stocastici e sulla meccanica statistica di equilibrio riescano a fornire visioni diverse e complementari di problemi complessi. Si rimanda al corso di Meccanica statistica I per un approfondimento della parte di equilibrio. La teoria dei sistemi dinamici viene approfondita nel corso di Teoria dei sistemi dinamici. Gran parte dei programmi usati in questo corso vengono sviluppati nel corso di Laboratorio di fisica computazionale.

**Programma:** Sistemi dinamici lineari e non lineari. Punti fissi e stabilità in sistemi 2D. Teoria delle biforcazioni. Soluzione numerica (integrazione di equazioni differenziali). Mappe discrete. Caos. Pattern formation in modelli di reazione diffusione. Processi stocastici. Insiemi statistici. Processi di Markov. Sistemi estesi e campo medio. Sviluppo di Kramers-Moyal ed equazione di Fokker-Planck. Transizioni di fase dinamiche. Meccanica statistica di equilibrio (cenni). Modello di Ising. Il metodo Monte-Carlo. Ottimizzazione stocastica. Complessità algoritmica. Teoria delle reti. Esempi di applicazione delle tecniche a dinamiche epidemiche, sociofisica, reti neurali, teoria dell'evoluzione, teoria dei giochi ripetuti.

### **Fisica del mezzo interstellare (Prof. F. Fontani, Prof. D. Galli)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso fornisce le basi teoriche e osservative della materia interstellare e del suo ruolo nel processo di formazione stellare e dei sistemi planetari. Nella prima parte del corso vengono descritti i processi chimici e fisici del gas atomico, molecolare e ionizzato con particolare enfasi sulle proprietà diagnostiche di ciascuna fase. Nella seconda parte vengono affrontati i processi dinamici principali che descrivono lo stato fisico delle nubi molecolari in cui si formano stelle e pianeti: autogravità, rotazione, campi magnetici e turbolenza. Si introducono i concetti di funzione iniziale di massa stellare e di tasso di formazione stellare che governano l'evoluzione della nostra Galassia e di tutte le galassie.

**Programma:** Composizione e distribuzione del mezzo interstellare. Processi collisionali e radiativi. Equilibrio Termodinamico ed Equilibrio Termodinamico Locale. Trasporto radiativo e sue applicazioni in approssimazione di Rayleigh-Jeans. Polvere interstellare: composizione e interazione con la radiazione (estinzione ed emissione). Processi astrochimici di base. Nubi Molecolari: struttura e dinamica. Frammentazione di nubi molecolari, collasso gravitazionale protostellare e dischi circumstellari. Jets e Outflows. Stelle Massicce: formazione, evoluzione, e interazione con l'ambiente. Funzione Iniziale di Massa.

### **Fisica della materia condensata e fenomeni critici (Prof. A. Cuccoli, Prof. A. Rettori)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di introdurre i concetti e le grandezze fondamentali per lo studio delle proprietà strutturali e delle eccitazioni elementari nei sistemi liquidi e solidi, con particolare riferimento ai fenomeni critici ed ai sistemi magnetici di varia dimensionalità. Considerando la ricchezza della fenomenologia e le possibilità applicative di quest'ultimi, si rivolge sia agli studenti dell'indirizzo di fisica della materia che a quelli dell'indirizzo teorico. Per una più proficua frequenza possono essere utili le conoscenze acquisite nei corsi di Fisica dello Stato Solido e di Meccanica statistica I.

**Programma:** Simmetria, ordine e transizioni di fase. Correlazione spaziale in sistemi classici; parametro d'ordine e modelli. Teoria di campo medio. Transizione del primo e del secondo ordine. Esponenti critici, universalità e leggi di scaling. Gruppo di rinormalizzazione e fenomeni critici. Modelli di spin; ferro- ed antiferromagnetismo, eccitazioni elementari magnetiche. Eventuale argomento a scelta fra: i) Funzioni di correlazione dinamiche; ii) Introduzione alla simulazione Monte Carlo; iii) Transizioni topologiche.

### **Fisica delle alte energie (Prof. G. Barbagli, Prof. M. Lenti)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il Corso vuole fornire una panoramica approfondita degli aspetti più recenti della fisica delle particelle elementari, con particolare riferimento agli esperimenti ai vari collider. Il taglio sarà sperimentale-fenomenologico e comunque verranno richiamati i fondamenti teorici dei modelli a cui si fa riferimento. E' opportuno per la comprensione che lo studente abbia seguito il corso di Complementi di Fisica Subnucleare e abbia le conoscenze di base per la teoria quantistica dei campi (Meccanica Quantistica, Relatività Ristretta, Teoria Quantistica Relativistica).

**Programma:** Introduzione alle teorie di gauge. Teoria Elettrodebole. Bosone vettore Z0: larghezze di decadimento, sezione d'urto alla risonanza, asimmetrie. Bosone vettore W; larghezze di decadimento, produzione di coppie WW. Fisica del Sapore: matrice CKM, violazione di CP, oscillazione dei mesoni, asimmetrie di CP, triangolo di unitarietà. Fisica dei neutrini: masse dei neutrini, oscillazioni, matrice di mixing con tre neutrini. Bosone di Higgs: accoppiamenti e decadimenti. Cenni a teorie di Grande Unificazione. Struttura del protone. Scattering elastico e profondamente anelastico leptone-nucleone. Fattori di forma. Origine di modello a quark e partoni. Funzioni di struttura. Invarianza di scala. Gluoni. QCD. Costante di accoppiamento forte e sue proprietà. Libertà asintotica. Densità partoniche ed equazioni di evoluzione. Jet e frammentazione. Fisica ai collider adronici. Cenni alle interazioni diffrattive e alle loro proprietà e interpretazione. Sezione d'urto totale a LHC e sua composizione. Produzione di Higgs. Cenni ad alcune teorie oltre il Modello Standard. Supersimmetria. Large Extra Dimensions. Implicazioni cosmologiche.

### **Fisica delle galassie (Prof. F. Mannucci, Prof. P. Tozzi)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Scopo del corso è quello di fornire una conoscenza di base delle osservazioni e proprietà fisiche di galassie normali ed attive e dell'evoluzione cosmologica delle galassie, nuclei attivi e buchi neri. Al termine del corso lo studente avrà acquisito la capacità di interpretare fisicamente spettri ed immagini di galassie, e le loro funzioni di luminosità. Inoltre sarà in grado di seguire seminari specialistici e leggere articoli di letteratura; avrà la capacità di effettuare analisi e modellizzazione di dati spettroscopici e di immagini.

**Programma:** Galassie: morfologia, struttura e dinamica; galassie ellittiche e spirali. Spettroscopia di sorgenti astrofisiche e proprietà fisiche del gas. Studio delle popolazioni stellari. Nuclei Galattici Attivi: proprietà fisiche e accrescimento sui buchi neri. I grandi buchi neri nei nuclei galattici: masse e relazioni con le galassie ospiti. Evoluzione cosmologica di galassie e nuclei attivi. Formazione ed evoluzione delle galassie e nuclei galattici attivi nell'ambito dei modelli cosmologici.

### **Fisica medica (Prof. F. Fusi, Prof.ssa C. Talamonti)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di introdurre lo studente agli argomenti più attuali di fisica medica. Fornisce una conoscenza delle principali metodologie diagnostiche terapeutiche basate sull'uso di radiazioni ionizzanti e ottiche, e una comprensione e valutazione delle nozioni di base relative all'interazione radiazione materia biologica e non. Il corso introduce lo studente ai successivi studi nella scuola di specializzazione in Fisica Medica.

**Programma:** Dosimetria delle radiazioni ionizzanti: Richiami sull'interazione delle radiazioni ionizzanti – materia, Grandezze dosimetriche, Radioprotezione, Sorgenti di radiazione per uso medico. Immagini diagnostiche: Immagini RX analogiche e digitali, Tomografia computerizzata a RX, PET SPECT. Risonanza Magnetica Nucleare. Tecnologie ottiche e optoelettroniche in campo medico: Misure spettroscopiche, Sorgenti di luce e fotorivelatori, Proprietà ottiche dei tessuti biologici, Interazione luce - materia biologica.

### **Fisica solare (Prof. M. Romoli, Prof. A. Verdini)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso fornisce un'introduzione alla fisica del Sole che riguarda sia l'interno del Sole sia la sua atmosfera estesa, indicando quali sono i problemi ancora aperti sui quali la ricerca scientifica sta lavorando. Il corso non si ferma al punto di vista fenomenologico ma tratta in modo approfondito alcuni degli aspetti principali della fisica solare. Una parte del corso è dedicata alla strumentazione per l'osservazione del Sole da terra e dallo spazio.

**Programma:** Il Sole come stella. Strumentazione solare. Spettro solare. Trasporto radiativo. Processi dinamici: Dopplergrammi, granulazione, supergranulazione. Processi magnetici: ciclo di attività, magnetografi. Cromosfera e corona. Brillamenti e CMEs. Space Weather. Struttura interna del Sole. Eliosismologia. Dinamo solare. Modelli per strutture magnetiche: macchie solari, archi coronali e protuberanze. Il riscaldamento coronale. Modelli di vento solare. Eliosfera e interazione col mezzo interstellare.

### **Gas quantistici (Prof. F. Minardi, Prof. A. Smerzi)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di illustrare allo studente gli aspetti della ricerca teorica e sperimentale che utilizza atomi ultrafreddi per investigare fenomeni come la superfluidità, le transizioni di fase quantistiche, l'entanglement. Per una fruizione ottimale del corso, sono richieste le conoscenze acquisite al corso di Fisica atomica, nonché conoscenze di meccanica statistica e meccanica quantistica a molti corpi.

**Programma:** Richiami di meccanica statistica e degenerazione quantistica: condensazione di Bose-Einstein (BEC) e degenerazione fermionica. Struttura iperfina e intrappolamento di atomi. Raffreddamento evaporativo: leggi di scala e cinetica dell'evaporazione. Potenziali di interazione di van der Waals. Richiami di teoria dello scattering e risonanze di scattering. L'equazione di Gross-Pitaevskii: proprietà statiche e dinamiche di condensati intrappolati. Giunzioni Josephson bosoniche. Spettro di eccitazione e criterio di Landau per la superfluidità. Interferometria quantistica. Entanglement e misure di precisione. Entanglement e violazione della disuguaglianza di Bell. Interferometria con atomi ultrafreddi. Atomi in reticoli ottici: richiami di teoria delle bande energetiche. Spettro delle eccitazioni e instabilità. modello di Bose-Hubbard e isolante di Mott. Fermioni degeneri, crossover tra BEC e stato BCS. Fermioni in regime di unitarietà.

### **Introduzione alla teoria della relatività (Prof. F. Becattini)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso mira a fornire agli studenti una introduzione alla relatività generale e gli strumenti matematici di base per trattare i fenomeni fisici nel formalismo relativistico.

**Programma:** Fondamenti di relatività speciale: quadrivettori e tensori. Cinematica e dinamica relativistica. Formulazione covariante dell'elettromagnetismo. Tensore energia-impulso. Tensore energia-impulso del campo elettromagnetico. Fluidi relativistici ideali. Tensore energia-impulso e equazioni del moto. Introduzione alla relatività generale. Principio di equivalenza e necessità dello spazio curvo. Geometria degli spazi curvi: metrica, geodetiche, derivata covariante, curvatura, identità di Bianchi. Lunghezze e intervalli di tempo. Geodetiche e particelle test. Equazioni di Einstein. Limite newtoniano. Soluzione sferica: geometria di Schwarzschild. Verifiche classiche della relatività generale: red-shift gravitazionale; precessione del perielio; deflessione dei raggi di luce.

### **Laboratorio di elettronica (Prof. M. Carlà)**

#### **I Semestre, 6 CFU**

Corso di introduzione alle basi dell'elettronica analogica e digitale con descrizione del funzionamento dei principali dispositivi a semiconduttore e dei loro circuiti di utilizzo. Realizzazione in laboratorio di semplici circuiti ed utilizzo della strumentazione di laboratorio per verificarne ed analizzarne il funzionamento.

**Programma:** Linee di trasmissione. Trasporto di carica nei semiconduttori. Giunzione PN. Legge

della giunzione. Diodi a giunzione. Circuiti non lineari. Conduttanza e capacità dinamiche. Reti a due porte e parametri  $g, h, m, r$ . Transistor bjt, mosfet e jfet. Circuiti di polarizzazione ed esempi di applicazioni. Amplificatori. Anello di reazione. Amplificatore Operazionale. Principali circuiti di utilizzo dell'amplificatore operazionale con reazione negativa. Elementi base di elettronica digitale: codice binario, porte logiche, leggi di de Morgan. Famiglie logiche CMOS e TTL. Flip-flop. Contatori.

### **Laser ed applicazioni (Prof. F. S. Pavone, Prof. L. Silvestri)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di illustrare, nella sua prima parte, i meccanismi di funzionamento dei laser. Nella fase successiva del corso vengono illustrate differenti applicazioni nel campo dei beni culturali, ambientali, medicale ed industriale. Scopo del corso è quindi quello di illustrare con un approccio multidisciplinare (con approfondimenti di aspetti biologici, chimici, medici o ingegneristici) vari campi di applicazioni dei laser. Tutti gli argomenti e le parti teoriche vengono trattate in modo da essere affrontabili anche al terzo anno della laurea triennale. Aspetti più avanzati delle applicazioni biomedicali vengono trattate nel corso di Ottica biomedica.

**Programma:** Sistema atomico a due livelli. Trattazione con le equazioni di bilancio del laser a 3 livelli. Laser a gas, a stato solido, liquido e a semiconduttore. Cavità ottiche. Generazione e controllo di impulsi brevi. Generazione e controllo della frequenza di emissione. Panorama di applicazioni nel campo del biomedicale, biotecnologico, industriale, dei beni culturali e dell'ambiente. Verranno effettuate visite presso laboratori di ricerca accademici ed industriali.

### **Meccanica statistica II (Prof. R. Livi, Prof. P. Politi)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso è focalizzato sulla meccanica statistica di non equilibrio e, in misura minore, su quella dei sistemi disordinati. Lo scopo del corso è sia quello di fornire strumenti concettuali e di calcolo che sono applicabili con tutta generalità, sia quello di offrire una panoramica su argomenti avanzati e di interesse per la ricerca attuale, che si pongono a cavallo tra la fisica teorica e la fisica della materia. Propedeuticità: Meccanica statistica I.

**Programma:** Sistemi disordinati, modelli e teoria delle repliche. Catene di Markov e metodo Monte Carlo. Moto browniano, equazione di Langevin ed equazione di Fokker-Planck. Teorema di fluttuazione-dissipazione e teoria della risposta lineare. Transizioni di fase di non equilibrio con applicazioni. Invarianza di scala nei processi di crescita. Equazioni di Edwards-Wilkinson e di Kardar-Parisi-Zhang. Il fenomeno della separazione di fase. Instabilità e formazione di strutture in sistemi fuori dall'equilibrio.

### **Metodi sperimentali di fisica nucleare (Prof. M. Bini, Prof. G. Pasquali)**

#### **II semestre, 6 CFU**

La digitalizzazione dei segnali dei rivelatori, con la loro successiva elaborazione digitale, è un approccio sempre più diffuso nell'ambito della fisica nucleare. Il corso fornisce conoscenze di base (ed in alcuni casi avanzate) riguardanti sia l'elettronica impiegata in questo ambito sia le principali tecniche di elaborazione. Per una migliore comprensione del contesto, l'elaborazione digitale dei segnali è presentata in modo generale fornendo conoscenze applicabili anche in altri campi (e.g. trasformata di Fourier nel dominio discreto del tempo, trasformata  $Z$ ), anche se necessariamente la trattazione è meno estesa rispetto ad un corso completamente ad essa dedicato. Il corso può quindi rivestire interesse anche per studenti che seguono altri indirizzi. Una conoscenza previa delle tecniche di rivelazione impiegate in fisica nucleare è sicuramente di ausilio, ma non è condizione indispensabile.

**Programma:** Richiami sull'interazione radiazione-materia e la rivelazione di radiazione ionizzante. Preamplificatori di carica e specifiche dei segnali da essi generati. Digitalizzazione dei segnali ottenuti con rivelatori di particelle in Fisica Nucleare. Convertitori analogico digitali

utilizzati per la digitalizzazione e loro caratteristiche principali. Ricostruzione dei segnali dai campioni mediante interpolazione. Misure di tempo dai segnali campionati in presenza di rumore. Sistemi per il trattamento di segnali digitalizzati. Sistemi lineari e invarianti per traslazione temporale. Convoluzione e trasformata di Fourier nel dominio discreto del tempo. Sistemi IIR e FIR. Trasformata-Z e sue applicazioni alla formazione dei segnali dei rivelatori. Misura di energia da segnali campionati in presenza di rumore. Strutture per il calcolo di sistemi LTI. Esempi di semplici applicazioni di filtri utilizzando programmi scritti in linguaggio C++ sui segnali campionati. Architettura di dispositivi di digitalizzazione con realizzazione di filtri "online" sia tramite Digital Signal Processor che con Field Programmable Gate Array. Applicazioni in linguaggio VHDL. Utilizzo dei digitalizzatori in un sistema di acquisizione in Fisica Nucleare.

### **Metodi sperimentali di fisica subnucleare (Prof. E. Focardi)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di fornire competenze sul funzionamento dei dispositivi per la rivelazione di radiazione e le tecniche di utilizzazione di tali dispositivi negli apparati sperimentali di fisica delle alte energie. Lo studente sarà guidato attraverso esempi ed applicazioni nell'uso di tali dispositivi per la soluzione di problematiche sperimentali. Saranno illustrati e discussi alcuni degli esperimenti attualmente funzionanti al CERN. Il corso si complementa con quello di Analisi dati in fisica subnucleare.

**Programma:** Accelerazione delle particelle cariche. Acceleratori lineari e circolari. Anelli di accumulazione. Luminosità. Interazione particelle/radiazioni materia. Tracciamento di particelle cariche in rivelatori a gas e a stato solido. Scintillatori. Fotomoltiplicatori. Calorimetri elettromagnetici e adronici. Identificazione di particelle (dE/dx, Time-of-flight, Cerenkov, radiazione di transizione). Sistemi di acquisizione. Elaborazione dati. Apparati sperimentali della fisica delle alte energie.

### **Ottica (Prof. L. Fini, Prof. F. Quercioli)**

#### **II semestre, 6 CFU**

In questo corso vengono trattati i concetti fondamentali dell'ottica geometrica e ondulatoria classica con l'obiettivo di introdurre lo studente alla comprensione del funzionamento dei sistemi ottici avanzati utilizzati nella fisica sperimentale e delle tecniche di elaborazione ottica delle immagini. Non essendo richiesti prerequisiti particolari, il corso è indicato anche per quegli studenti della laurea triennale in fisica e astrofisica che vogliono approfondire gli argomenti di ottica incontrati nei corsi di base.

**Programma:** *Ottica ondulatoria:* Equazione d'onda. Approssimazione scalare. Onde piane, sferiche ed evanescenti. Onde sinusoidali e loro rappresentazione complessa. Interferenza e Interferometri. Polarizzazione. Diffrazione e principio di Huygens-Fresnel. Formula di Rayleigh-Sommerfeld. Approssimazione di Fresnel e Fraunhofer. Potere risolutivo di un sistema ottico. Ottica di Fourier. Analisi di un sistema ottico in luce coerente e incoerente. Funzioni di trasferimento CTF, OTF, MTF. Filtraggio ottico. Olografia. *Ottica geometrica:* Principio di Fermat, superfici asferiche. Formula dei punti coniugati, potere della lente, ingrandimento. Combinazione di lenti. Ottica delle matrici. La lente spessa, piani principali, punti cardinali e nodi. Aperture e pupille di ingresso e di uscita, brillantezza e illuminamento. Apertura numerica, f-number. Applicazione ad alcuni strumenti ottici. Classificazione di Seidel delle aberrazioni del III ordine. Aberrazione sferica. Il coma, la condizione dei seni. Astigmatismo. Curvatura di campo e distorsione. Aberrazione cromatica, doppietto acromatico, numero di Abbe.

### **Ottica biomedica (Prof. F.S. Pavone, Prof. L. Silvestri)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire le nozioni di base della microscopia e dell'imaging biomedicale con approfondimenti sulle più recenti tecniche. Lo scopo del corso è fornire un programma multidisciplinare di approccio alla biofotonica attraverso nozioni di fisica, biologia chimica e medicina. Particolare attenzione verrà dedicata agli aspetti applicativi con partecipazione ad esperimenti in laboratorio. Verranno anche analizzati aspetti di trasferimento tecnologico e di tipo traslazionale.

**Programma:** Microscopie laser avanzate (Multifotone, FLIM, CARS, SHG, SRS, Random Access). Metodi di manipolazione ottica di campioni biologici. Aspetti di imaging morfo-funzionale di tessuti biologici. Aspetti di imaging biomedico applicato ad indagini cliniche. Visite in laboratorio con partecipazione ad esperimenti.

### **Ottica quantistica (Prof. F. Marin, Prof. A. Zavatta)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso propone un'introduzione all'ottica quantistica, a partire dai concetti di base fino ad illustrare gli sviluppi più recenti e gli argomenti di ricerca attuali. L'analisi teorica si accompagna ad una descrizione di esperimenti significativi. La prima parte del corso riguarda la trattazione classica delle variabili stocastiche, che viene applicata alla descrizione delle proprietà spettrali della radiazione laser (in parte poi esplorate sperimentalmente nel corso di Laboratorio di fisica atomica). L'argomento, al di là dell'interesse proprio, fornisce gli strumenti per comprendere la successiva trattazione delle fluttuazioni quantistiche.

**Programma:** Trattazione di variabili stocastiche. Moto Browniano. Equazione di Fokker-Planck. Equazioni di Langevin. Teorema di fluttuazione-dissipazione. Proprietà della luce classica (coerente e caotica): correlazioni, momenti, spettro di potenza. Misure interferometriche e statistiche. Spettro di rumore di ampiezza e di frequenza e forma di riga di radiazione laser. Quantizzazione del campo elettromagnetico. Coerenze quantistiche e relazioni di indeterminazione. Stati quantistici della luce: stati di Fock, coerenti, di vuoto compresso, luminosi compressi, stato termico. Indicatori di luce non-classica. Separatore di fascio e rivelazione in omodina. Esperimento di Hong-Ou-Mandel. Distribuzioni di quasi-probabilità e funzione di Wigner. Stati separabili e intrecciati ("entangled"). Argomento EPR: non località e realismo. Disuguaglianza di Bell. Applicazioni: crittografia quantistica, calcolo quantistico. Variabili continue e approssimazione semi-classica. Cavità ottica. Produzione di radiazione 'squeezed'. Pressione di radiazione ed effetti pondero-motivi. Limite quantistico standard.

### **Particelle elementari e applicazioni (Prof. O. Adriani, Prof. R. D'Alessandro)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso consiste in una prima parte dove viene spiegata la natura delle particelle elementari, le loro interazioni e vengono dati dei cenni sulle tecniche di rivelazione. Nella fase successiva del corso vengono illustrate differenti applicazioni in svariati campi tra cui la geologia, l'archeologia, la medicina, industriale (esami dei container) e l'esplorazione del cosmo. Scopo del corso è quindi quello di illustrare con un approccio molto pratico i vari campi di applicazione. Tutti gli argomenti e le parti teoriche vengono trattate in modo da essere affrontabili anche al terzo anno della laurea triennale.

**Programma:** Interazioni fondamentali e particelle elementari. Acceleratori e raggi cosmici. Interazione con la materia delle particelle elementari. Tecniche di rivelazione. Panoramica sulle applicazioni nei vari settori menzionati.

### **Raggi cosmici (Prof. S. Bottai, Prof. P. Papini)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si prefigge di fornire una panoramica ad ampio spettro sulla fisica dei raggi cosmici, compresa la fisica dei neutrini di origine extraterrestre. Nel corso vengono illustrate tutte le principali tecniche sperimentali ed in parallelo vengono descritti e sviluppati sinteticamente i

modelli fenomenologici inerenti alla fisica dei raggi cosmici. Nel complesso si tratta di un corso di carattere prevalentemente sperimentale le cui tematiche sono parte essenziale sia della fisica subnucleare sia dell'astrofisica delle alte energie. Le conoscenze necessarie per seguire il corso sono quelle fornite nella laurea triennale.

**Programma:** Fenomenologia dei Raggi Cosmici primari. Meccanismi di propagazione e accelerazione. Antiprotoni e positroni nei Raggi Cosmici: produzione secondaria e possibili sorgenti primarie. Composizione isotopica. I Raggi Cosmici di altissima energia. Interazione dei Raggi Cosmici primari con l'atmosfera e produzione degli sciami. Rivelatori di sciami atmosferici e di neutrini di altissima energia. Neutrini solari.

## **Scienza e tecnologia della luce (Prof. S. Pelli, Prof. D. S. Wiersma)**

### **I Semestre, 6 CFU**

La Fotonica costituisce una tecnologia trasversale "abilitante", in grado cioè di permettere sviluppi scientifici e tecnologici in moltissimi settori applicativi, dal controllo ambientale alle telecomunicazioni, dalla sicurezza alla biomedicina, dall'agroalimentare alle applicazioni aerospaziali. Il corso si propone dunque di fornire gli elementi essenziali alla comprensione dei fenomeni fisici e delle tecnologie che sono alla base del funzionamento dei dispositivi optoelettronici. In particolare, il corso partirà dai principi di base della propagazione e trasporto di onde luminose in strutture ordinate come guide d'onda, fibre ottiche, risonatori ottici o cristalli fotonici per poi affrontare sistemi più complessi quali i sistemi disordinati. Il corso darà ampio risalto alle applicazioni di queste strutture ottiche nel campo delle telecomunicazioni, dell'energia solare, dell'imaging, della sensoristica. Le lezioni teoriche saranno integrate da esercitazioni in laboratorio. Il corso si complementa con i corsi di Ottica, Elettronica quantistica, Ottica quantistica, e Fotonica.

**Programma:** Propagazione in guide ottiche planari e in fibre ottiche. Trasporto di onde luminose in sistemi disordinati. Analogie fra trasporto di fotoni e trasporto di elettroni ed atomi. Principali caratteristiche delle guide ottiche: teoria, materiali e tecnologie di fabbricazione più rilevanti. Modulatore elettro-ottico e loro applicazione nelle telecomunicazioni. Effetti d'interferenza in strutture fotoniche complesse (disordinate, amorfe, iper-uniformi). Introduzione alla conversione di energia solare in corrente elettrica. Strutture fotoniche per migliorare l'efficienza di celle fotovoltaiche. Dispositivi basati su vetri drogati con terre rare: amplificatori ottici e downshifting/upconversion per energia solare o sorgenti di illuminazione. Microrisonatori a modi di galleria e loro applicazioni. Fibre microstrutturate e a bandgap fotonico.

## **Sistemi di acquisizione dati (Prof. M. Carlà)**

### **II Semestre, 6 CFU**

Imparare a programmare un computer per convincerlo a colloquiare con la strumentazione di misura, controllare un processo di misura, acquisire dati sperimentali ed effettuarne semplici elaborazioni.

**Programma:** Collegamento e colloquio tra computer e strumenti. Caratteristiche del bus iee488. Controllo di strumentazione in ambiente Labview e tramite programmazione in C. Programmazione in "user space" ed in "kernel space". Programmazione in "kernel space" in ambiente Linux. Esempio di modulo di kernel per acquisizione dati. Esperienze di laboratorio: (L'elenco delle esperienze di laboratorio è solo indicativo. Le applicazioni specifiche potranno variare anno per anno, anche in relazione alla strumentazione disponibile.) Ambiente Labview: procedura di acquisizione dati da un canale ADC e calcolo dello spettro di Fourier. Controllo di un VCO tramite un DAC e misura della risposta di una rete in funzione della frequenza. Ambiente C: Utilizzo di generatore e voltmetro su bus iee488 per la misura della risposta I-V di un elemento di circuito non lineare. Campionamento di un segnale e sincronizzazione. Realizzazione di un anello di controllo di processo a reazione negativa. Programmazione C in "kernel space": realizzazione di un semplice modulo con eventuale utilizzo del sistema di

interrupt.

### **Sistemi relativistici (Prof. F. Becattini)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Scopo del corso è quello di fornire allo studente gli strumenti essenziali della meccanica statistica nella formulazione quanto-relativistica, allo scopo di trattare la materia in condizione di altissima temperatura e densità e in generale in ambito relativistico. È consigliato, seppure non obbligatorio, seguire il corso al secondo anno della laurea magistrale.

**Programma:** Meccanica statistica e termodinamica relativistica di equilibrio. Insiemi microcanonico, canonico e grancanonico. Insieme canonico per gruppi non abeliani. Formulazione covariante della meccanica statistica. Fluidodinamica relativistica ideale e dissipativa: riferimenti di Eckart e Landau, teoria di Israel-Stewart. Corrente di entropia. Meccanica statistica relativistica di nonequilibrio. Teoria di Zubarev dell'operatore densità di nonequilibrio. Formula relativistica di Kubo per i coefficienti di trasporto e sue proprietà. Cenni alla teoria dei campi a temperatura finita e funzioni di Green termiche. Applicazioni della fluidodinamica relativistica al plasma di quarks e gluoni.

### **Storia della chimica e della fisica (Prof.ssa E. Bougleux, Prof. R. Livi, Prof. P. Lo Nostro)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire agli studenti un percorso che mira a ricostruire in una prospettiva storica le principali tappe di sviluppo delle moderne scienze fisiche e chimiche, con particolare riferimento al periodo che va dal XVIII secolo fino a quello a cavallo tra le due guerre mondiali del XX secolo. Un tale percorso viene offerto agli studenti dei corsi di studio in Fisica e Astrofisica e di Chimica in ragione dei profondi legami e affinità culturali e concettuali che hanno caratterizzato il percorso storico di queste due discipline scientifiche.

**Programma:** Il programma del corso è suddiviso in tre moduli di 2 CFU ciascuno. Nel primo modulo si tratteranno i temi seguenti: sviluppo dei concetti di energia e rendimento in concomitanza della prima rivoluzione industriale; affermazione della teoria cinetica e dei concetti di etere calorico ed elettromagnetico; energetismo e atomismo; nascita della meccanica statistica e delle teoria dei quanti; la Big Science e gli sviluppi della fisica nucleare. Il secondo modulo affronta due specifici casi di studio. Il meccanicismo tra Mach e Boltzmann; reversibilità ed entropia. Simultaneità e durata tra Poincarè e Bergson. Relatività dei sistemi di riferimento. Genesi della relatività ristretta: Lorenz, Poincarè, Einstein. I lavori einsteiniani del 1905. Genesi della relatività generale. Dibattito tra Einstein e Hilbert. Storia della rivelazione delle onde gravitazionali. Rapporti tra scienza ed economia nel secolo XIX. Diffusione delle scienze nell'impero coloniale inglese. La classificazione e la tassonomia come strumenti di egemonia. Elettrocità, magnetismo, esperimenti sul vuoto e sulla luce al British Museum e nel contesto coloniale (inizio secolo XX). Il terzo modulo comprende i seguenti argomenti: finalità e metodologie della Chimica dall'antichità fino agli inizi del XX secolo, con particolare riguardo alle problematiche sviluppate dal XV secolo in poi. Le teorie del calorico e del flogisto. La *vis vitalis* e la nascita della Chimica organica. Gli elementi: classificazione e scoperte, dalla teoria dei quattro elementi fino all'elaborazione delle Tavole Periodiche. Sviluppi e intersezioni della Termodinamica con le altre discipline. Approfondimenti di alcuni studi pionieristici in ambito chimico. L'acqua nella Storia della Scienza.

### **Tecniche di analisi con fasci di ioni (Prof. P. A. Mandò, Prof. M. Chiari)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire allo studente la conoscenza di metodologie analitiche nucleari con acceleratori, in particolare le tecniche di analisi con fasci di ioni, per l'analisi superficiale della struttura e della composizione di materiali. Le conoscenze necessarie per seguire il corso sono quelle fornite nella laurea triennale.

**Programma:** Richiami e complementi su Interazione particelle cariche-materia. Produzione di fasci di ioni (acceleratori elettrostatici e sorgenti di ioni). Principi fisici e metodi delle tecniche di analisi con fasci di ioni (Ion Beam Analysis, IBA) per lo studio della composizione e della struttura dei materiali: PIXE - Particle Induced X-ray Emission, PIGE - Particle Induced Gamma-ray Emission, EBS - Elastic Backscattering Spectroscopy, ERDA - Elastic Recoil Detection Analysis, NRA - Nuclear Reaction Analysis. Applicazioni delle tecniche IBA nel campo della scienza dei materiali, dei beni culturali, delle scienze ambientali e della geologia. Esercitazione con codici di simulazione e di analisi dati.

### **Tecniche di rivelatori per radiazioni ionizzanti (Prof. G. Pasquali)**

#### **I semestre, 6 CFU**

La parte iniziale del corso riguarda i concetti essenziali dell'interazione radiazione-materia e la loro applicazione alla rivelazione di radiazione ionizzante. Sono poi presentati i principi, le modalità di funzionamento e le caratteristiche delle principali tipologie di rivelatori (a gas, a scintillazione, a semiconduttore). Vengono infine illustrate le problematiche relative al circuito di lettura ed all'ottimizzazione del rapporto segnale/rumore nella misura di energia della radiazione incidente.

**Programma:** Sorgenti radioattive. Interazione delle particelle cariche con la materia. Interazione di raggio gamma con la materia. Rivelatori a gas (camera a ionizzazione, contatore proporzionale). Rivelatori a semiconduttore (rivelatori a silicio, rivelatori a germanio iperpuro). Rivelatori a scintillazione. Elettronica di lettura per rivelatori, con particolare riguardo ai rivelatori a semiconduttore. Rumore elettronico e misura di energia.

### **Tecnologie Quantistiche (Prof. F. S. Cataliotti)**

#### **II Semestre, 6 CFU**

Il corso si indirizza a studenti che abbiano appena appreso i principi della meccanica quantistica. Ci si propone di sottolineare alcuni concetti fondamentali quali sovrapposizione, entanglement, non-località quantistica, decoerenza e teoria della misurazione con l'illustrazione di alcune applicazioni selezionate come la crittografia quantistica, il teletrasporto, i sensori al limite di Heisenberg, computazione e simulazione quantistici.

**Programma:** Richiami di Meccanica Quantistica: dualismo onda-particella, sistema a 2 livelli; Sovrapposizioni di stati quantistici (singola particella): introduzione della sfera di Bloch (Q-bit), teorema di no cloning e Crittografia quantistica (BB84); Sovrapposizioni di due particelle (EPR): entanglement, disuguaglianze di Bell (e verifica sperimentale), teletrasporto quantistico; Sistemi a molte particelle: stati puri e misti, probabilità classiche e quantistiche; Ambiente e decoerenza: sottosistemi e ambiente, sistemi aperti misure e decoerenza, gatti di Schroedinger; Descrizione di esperimenti: Realizzazione sperimentale di operatori quantistici, simulatori quantistici, sensori al limite quantistico, memorie quantistiche, effetto Zeno Quantistico.

### **Tecnologie spaziali (Prof. S. Bottai, Prof. E. Pace)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire gli elementi di base per realizzare esperimenti di fisica o di astronomia nello spazio. Sono presi in considerazione diversi aspetti: i motivi per andare nello spazio, l'ambiente e i limiti che esso pone, le tipologie di missione spaziale disponibili, le tipologie di esperimento in vari campi e la strumentazione che può essere utilizzata, le orbite utilizzabili e i problemi legati all'assetto della sonda. Visite ai laboratori e alle aziende di settore completano la formazione.

**Programma:** Motivazioni scientifiche per esperimenti nello spazio. Come nasce e si organizza una missione spaziale. Tipologie di missione: suborbitali, orbitali e planetarie. Calcolo delle orbite. Dinamica della sonda. Struttura di un payload scientifico Elementi di ottica, fotometria e radiometria. Sistemi ottici: telescopi, spettrografi, camere per imaging. Sistemi per la rivelazione

di raggi cosmici. Rivelatori di fotoni e di particelle. Sistemi di alimentazione. L'ambiente spaziale: interazioni con il payload scientifico. Ground support equipment e ground segment. I raggi cosmici e le fasce di Van Allen.

### **Teoria dei campi avanzata (Prof. D. Dominici, Prof. D. Colferai)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso tratta alcune moderne e rilevanti teorie fisiche.

**Programma:** Algebre di supersimmetria. Rappresentazioni. Supercampi. Supercampi chirali e vettoriali. N=1 Super Yang-Mills. Il meccanismo di SuperHiggs. Cromodinamica Quantistica (QCD): richiami sulla rinormalizzazione e la libertà asintotica. Fattorizzazione dei processi duri in QCD. Equazioni di Altarelli-Parisi per le densità partoniche. Divergenze infrarosse, teorema di Block-Nordsieck e KLN. Tecniche di risommazione a tutti gli ordini e fattori di forma. Introduzione alla fisica dei jet.

### **Teoria dei campi II (Prof. A. Cappelli, Prof.ssa S. De Curtis)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso descrive degli strumenti indispensabili per condurre la ricerca in fisica teorica, come la quantizzazione delle teorie di gauge con il path-integral, la rinormalizzazione ed il gruppo di rinormalizzazione. Include una introduzione abbastanza approfondita del Modello Standard delle interazioni fondamentali della fisica delle particelle. Propedeuticità: Teoria dei campi I.

**Programma** - Ordini di grandezza delle interazioni fondamentali. Quantizzazione delle teorie di gauge non-abeliane col path-integral. Rinormalizzazione e gruppo di rinormalizzazione. Equazione di Callan-Symanzik e costante d'accoppiamento mobile. Calcolo della beta function. Introduzione alla QCD e al modello a partoni. Rottura spontanea della simmetria. Modello standard elettrodebole: SU(2)xU(1), meccanismo di Higgs, gauge rinormalizzabile e unitaria, mescolamento delle famiglie. Matrice CKM, violazione di CP, meccanismo GIM. Fenomenologia del modello standard: alcuni processi. Anomalie in teoria dei campi: anomalie conformi e chirali, anomalie e topologia. Solitoni e monopoli. Modello di Giorgi-Glashow e monopoli di 't Hooft-Polyakov. Confinamento di 't Hooft-Mandelstam.

### **Teoria dei sistemi a molti corpi (Prof. R. Giachetti)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di introdurre il formalismo di base per lo studio di sistemi quantistici a molte particelle facendo uso di metodi della teoria quantistica dei campi.

**Programma:** Operatori a molti corpi nello spazio di Fock. Stati coerenti per bosoni e fermioni. Funzione di gran-partizione. Funzioni di Green termiche. Diagrammi di Feynman. La trasformazione di Hubbard-Stratonovich e la teoria BCS. Risposta lineare e il teorema di fluttuazione-dissipazione.

### **Teoria dei sistemi dinamici (Prof. S. Lepri, Prof. R. Livi)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire i concetti ed i risultati fondamentali, nonché gli strumenti di analisi relativi alla teoria dei sistemi dinamici. Gli argomenti svolti sono di interesse generale e trovano applicazione in vari contesti sia sperimentali che puramente teorici (es. in dinamica dei fluidi, nella conduzione del calore, sino alle neuroscienze). I corsi propedeutici sono quelli della laurea triennale: Meccanica classica, Analisi, Geometria e Metodi matematici; quelli di approfondimento: Meccanica statistica I e II.

**Programma:** Sistemi Dinamici Nonlineari. Equazioni differenziali e applicazioni: sistemi conservativi e dissipativi, teorema della varietà centrale, teoria di Floquet, sezione di Poincaré. Teoria delle Biforcazioni. Transizioni al caos. Diagnostica del Caos: spettro di potenza, esponenti

di Lyapunov, dimensioni frattali, entropie topologiche e metriche. Misure invarianti. Sistemi integrabili. Teorema KAM.

### **Teoria delle particelle elementari (Prof. G. Pettini)**

#### **II semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire conoscenze teoriche e capacità di calcolo riguardo ai processi che coinvolgono particelle elementari in interazione. Oltre ad applicazioni in elettrodinamica, ossia la più semplice teoria di gauge, il corso affronta anche la struttura del modello elettrodebole, con il meccanismo di rottura spontanea di simmetria e di Higgs. Tale corso è adatto anche alla formazione di sperimentali di alte energie, oltre che a coloro che intendano continuare nell'indirizzo teorico seguendo i corsi più avanzati.

**Programma:** Applicazioni di teoria dei gruppi alla fisica delle particelle. Teorie effettive e teorie di gauge, abeliane e non abeliane. Propagatori. Matrice di scattering. Teorema di Wick. Espansione perturbativa in rappresentazione di interazione. Derivazione delle regole di Feynman. Rottura spontanea della simmetria nel caso globale e locale. Meccanismo di Higgs. Cenni alle interazioni deboli e introduzione al Modello Standard elettrodebole. Applicazioni dei metodi acquisiti nel calcolo di processi elementari ad albero (sezioni d'urto e decadimenti) in elettrodinamica scalare e spinoriale, nel modello elettrodebole e in teorie effettive.

### **Topologia differenziale (Prof. P. De Bartolomeis)**

#### **I semestre, 6 CFU**

Il corso si propone di fornire un'introduzione alla topologia differenziale con particolare attenzione agli aspetti più rilevanti per la fisica teorica. Le lezioni saranno tenute presso il Dipartimento di Matematica Ulisse Dini.

**Programma:** 0. Argomento Centrale: Teoria delle Connessioni su Fibrati Principali. 1. Richiami della Teoria delle Varietà Differenziali, Gruppi di Lie. 2. Omotopia e Omologia. 3. Fibrati Principali: definizioni ed esempi fondamentali, Funzioni di Transizione, Sezioni Locali e Banalizzazioni Locali, Morfismi, Riduzioni, Fibrati Indotti. 4. Fibrati Associati: definizioni ed esempi fondamentali, Fibrati Vettoriali, Gruppo di Gauge. 5. Connessioni sui Fibrati Principali: definizioni ed esempi fondamentali, Forme di Connessione, Sollevamenti Orizzontali e Trasporto Parallelo, Forme Pseudotensoriali, Tensoriali, a valori in un Fibrato Vettoriale, Differenziale Esterno Covariante, Forma di Curvatura e sue Interpretazioni Geometriche, Identità di Bianchi, Olonomia e Teorema di Ambrose-Singer, Connessioni Lineari, Connessioni Riemanniane, Omomorfismo di Weil, Classi caratteristiche, Costruzioni à la Kaluza-Klein.