

## **CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE FISICHE E ASTROFISICHE**

Presidente: Oscar Adriani  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Via G. Sansone 1, 50019 Sesto Fiorentino (FI)  
Telefono: 0554572653  
E-mail: [pres-cdl@fisica.unifi.it](mailto:pres-cdl@fisica.unifi.it)  
Web: <http://www.fis-astro-lm.unifi.it/>

### **1. 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 dal Dipartimento di Fisica e Astronomia e dalla Scuola di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali ed è strutturato in curricula.

Il Corso di Laurea Magistrale appartiene alla classe delle Lauree Magistrali in Fisica (classe LM-17). 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 sono definite e deliberate dal Consiglio di Corso di Laurea Magistrale.

È costituita inoltre una Commissione Didattica paritetica. Per la composizione e le competenze si rimanda al Regolamento Didattico di Ateneo.

### **2. Obiettivi formativi, profilo culturale e professionale, sbocchi professionali**

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

### **3. Requisiti d'ammissione e verifica della adeguatezza della preparazione**

Le modalità di accesso alla Laurea Magistrale sono quelle stabilite dal Regolamento didattico riportate di seguito:

#### **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).

#### 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.

#### **4. Insegnamenti, altre attività formative e crediti ad essi attribuiti**

Il quadro generale delle attività formative è riportato nell'Ordinamento Didattico allegato al Regolamento Didattico di Ateneo.

La tabella dei corsi di tutti e due gli anni, comprensiva delle informazioni riguardo ai crediti associati ad ogni corso e del settore disciplinare è riportata nel Regolamento Didattico del Corso di Laurea Magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche. Tale Regolamento riporta inoltre le norme generali riguardo alla prova finale, al conseguimento del titolo, ai piani di studi individuali, alle unità didattiche, alle propedeuticità, al riconoscimento dei crediti, agli obblighi di frequenza, alle modalità della didattica e della valutazione e alla verifica della efficacia didattica. Il Regolamento rimanda a questo Manifesto per l'attuazione particolareggiata dell'organizzazione didattica, in accordo ai principi generali definiti.

In questo paragrafo vengono riportate sinteticamente solo le informazioni essenziali sull'organizzazione didattica: 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 (tipologia c) corrispondono, di norma, a corsi universitari previsti dall'Università di Firenze.

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 nella tabella seguente il quadro sintetico delle attività comuni dei vari curricula, rimandando

all'Allegato A per il dettaglio della loro articolazione e per l'elenco completo degli insegnamenti di tipologia b) attivati nella Laurea Magistrale.

<i>Tip.</i>	<i>Titolo Insegnamento</i>	<i>CFU</i>	<i>Settore</i>	<i>Semestre</i>
<b>Completamento cultura fisica di base</b>				
a	<b>Fisica teorica</b>	<b>9</b>	FIS/02	I
a	<b>Fisica della materia</b>	<b>12</b>	FIS/03	I/II
a	<b>Fisica nucleare e subnucleare</b>	<b>12</b>	FIS/04	I/II
a	<b>Astrofisica</b>	<b>9</b>	FIS/05	I
<b>Totale cultura fisica di base</b>		<b>42</b>		
<b>Corsi curriculari</b>				
a	<i>Vedi Allegato A</i>	<b>12</b>	FIS/01÷08	
<b>Corsi affini e integrativi</b>				
b	<i>Vedi Allegato A</i>	<b>12</b>	FIS/01÷08	
c	<b>A scelta dello studente</b>	<b>12</b>		
d	<b>Prova finale</b>	<b>36</b>		
e	<b>Stage e tirocini</b>	<b>6</b>		

Crediti acquisiti da studenti presso 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.

### **5. Tipologia delle forme didattiche, degli esami e delle altre verifiche di profitto**

Le attività formative svolte nel biennio della Laurea Magistrale sono espletate sotto forma di corsi cattedratici, corsi di laboratorio e tirocini.

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

Gli insegnamenti sono organizzati in unità didattiche "semestrali". 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), c) e d) 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 illustrati dal docente all'inizio del corso.

Il numero massimo di esami previsto è 8 più gli esami a libera scelta dello studente (tipologia c) che, ai sensi del DM 26 luglio 2007, Art. 4, comma 2, e delle relative linee guida, vengono contati

come un unico esame. Nell'anno accademico sono previsti 6 appelli in totale. Al termine del I e del II semestre sono predisposte sessioni di due appelli, distanziati di almeno quattordici giorni, per tutti gli esami del Corso di Laurea. Nel mese di settembre è prevista un'ulteriore sessione con un appello. In concomitanza con le vacanze pasquali è infine prevista la sospensione delle lezioni e l'istituzione di un'ulteriore sessione di esame con un appello per ogni insegnamento.

## **6. Obblighi di frequenza e propedeuticità degli esami**

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 (indicati con "lab" nelle tabelle dei curricula) la frequenza è obbligatoria.

La successione temporale dei corsi d'insegnamento riportata nell'allegato A è quella suggerita allo studente anche per i relativi esami.

## **7. Piani di studio individuali**

Lo studente iscritto al I anno di corso deve presentare, nel periodo 1 - 30 novembre, 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 nell'Allegato A di questo Manifesto. Lo studente può successivamente richiedere, all'atto dell'iscrizione al II anno o con le modalità previste dal Regolamento didattico di Ateneo, 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 (eventualmente di tipo numerico). 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 Manifesto.

Gli studenti che provengono dal Corso di Laurea in Fisica e Astrofisica di I livello dell'Università di Firenze e che scelgono il percorso consigliato da questo Manifesto per il curriculum prescelto, avranno il Piano di Studi approvato automaticamente. Il Consiglio di Corso di Laurea può approvare qualsiasi piano di studio conforme con l'Ordinamento del Corso di Laurea.

## **8. Prova finale e 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 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 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.

## **9. Calendario dei semestri, delle sessioni di laurea e vacanze ufficiali**

Per l'anno accademico 2014/2015 il calendario dei semestri è il seguente:

- I Semestre: 22 settembre 2014 - 23 dicembre 2014
- II Semestre: 23 febbraio 2015 - 12 giugno 2015

Per l'anno accademico 2013-2014 il calendario delle sessioni di laurea è il seguente:

25 giugno 2014  
22 luglio 2014  
15 settembre 2014  
27 ottobre 2014  
9 dicembre 2014  
3 marzo 2015  
21 aprile 2015

Per l'anno accademico 2014-2015 gli appelli di laurea verranno stabiliti e comunicati successivamente.

Vacanze ufficiali durante i periodi di lezione:

- I Semestre: 1 novembre, 8 dicembre 2014
- II Semestre: dal 30 marzo al 12 aprile (inclusi), 1 maggio e 2 giugno 2015

## **10. Insegnamenti**

Gli insegnamenti e i loro programmi sintetici sono riportati in Appendice. Nell'Allegato A si riporta il dettaglio delle attività didattiche all'interno dei vari curricula e l'assegnazione dei 120 CFU fra gli insegnamenti del II livello.

## **11. Verifica dell'efficacia didattica**

Per tutti gli insegnamenti del Corso di Laurea è prevista la rilevazione dell'opinione degli studenti frequentanti. Inoltre ogni titolare di insegnamento è invitato a sorvegliare l'efficacia didattica del proprio corso, in particolare:

- valutando, durante le lezioni e le esercitazioni del corso, il livello di rispondenza degli studenti e la loro preparazione iniziale;
- registrando il numero degli studenti che entro un anno solare dalla data di fine corso hanno superato l'esame e confrontando tale numero con quello di coloro che hanno frequentato le lezioni del corso. Se il docente rileva problemi riguardo a questi o ad altri aspetti comunque attinenti al proprio corso, sarà sua cura segnalarli al Corso di Laurea Magistrale e alla Commissione Didattica paritetica, fornendo una relazione mirata a individuare le possibili cause del problema, nonché a suggerire possibili interventi.

Dopo l'ultimo appello di settembre di ogni anno accademico, la Commissione Didattica paritetica, in collaborazione con i docenti dei corsi, presenta una valutazione sulla efficacia della didattica predisposta nell'anno accademico precedente e la illustra al primo Consiglio di Corso di Laurea Magistrale successivo. Anche sulla base di questa relazione, il Consiglio di Corso di Laurea Magistrale introduce nel successivo Manifesto del Corso di Laurea Magistrale le modifiche ritenute più adatte a migliorare la qualità dell'offerta didattica.

## **Delegato all'Orientamento**

Dott. L. Del Zanna - tel.: 055-4572108 / 055-2752239, e-mail: luca.delzanna@unifi.it

## ALLEGATO A

Lo studente presenterà un Piano di Studi che per i crediti di tipo a (curricolari caratterizzanti) e b (affini e integrativi) organizzato secondo le tabelle di seguito riportate per ogni curriculum.

### Curriculum *Astrofisica*

Il curriculum di Astrofisica è strutturato con il principale obiettivo di assicurare allo studente un'elevata padronanza sia di metodi e contenuti scientifici avanzati che di adeguate conoscenze professionali. Lo studente dovrà acquisire conoscenze di base sull'astronomia classica e moderna, sulla fisica solare e stellare, sull'astrofisica galattica ed extragalattica, sulla fisica dei plasmi e sulla cosmologia. Inoltre dovrà familiarizzarsi con le tecniche relative all'uso di strumenti nelle diverse regioni spettrali, per l'analisi delle immagini, per il trattamento statistico dei dati, o in alternativa per le simulazioni numeriche dei plasmi astrofisici. 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 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'informatica, del software, dei metodi numerici avanzati.

Tipologia	Insegnamento	CFU	SSD
Caratterizzanti	Fisica teorica	9	54 FIS/02 FIS/03 FIS/04 FIS/05
	Fisica della materia	12	
	Fisica nucleare e subnucleare	12	
	Astrofisica	9	
Curricolari caratterizzanti	Cosmologia	6	FIS/05
	Plasmi astrofisici	6	FIS/05
Affini e integrativi	<i>Un corso a scelta tra:</i> Laboratorio di astrofisica	6	12 FIS/05 FIS/05 FIS/05
	Metodi numerici per l'astrofisica	6	
	<i>Un corso a scelta tra quelli del settore FIS/05 non già selezionati tra gli affini o riportati nella successiva tabella</i>	6	
A scelta studente	<i>Corsi a scelta tra quelli affini non già selezionati, o attivati in altri curricula, o in altri corsi di studio dell'Università di Firenze</i>		12
Stage e tirocini			6
Prova finale			36
<b>TOTALE</b>			<b>120</b>

Insegnamento	CFU	SSD
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

\* Si consiglia la frequenza dell'insegnamento al secondo anno.

\*\* Corso consigliato anche agli studenti del CdS triennale.

## Curriculum *Fisica Teorica*

Il curriculum di Fisica Teorica presenta un percorso formativo mirato a una preparazione nel campo della fisica teorica delle particelle elementari, della fisica teorica nucleare e della fisica 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 nazionale 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 o per trovare una collocazione professionale nell'ambito degli Enti di ricerca sia pubblici che privati.

Tipologia	Insegnamento	CFU		SSD
Caratterizzanti	Fisica teorica	9	54	FIS/02
	Fisica della materia	12		FIS/03
	Fisica nucleare e subnucleare	12		FIS/04
	Astrofisica	9		FIS/05
Curricolari caratterizzanti	Metodi matematici per la fisica teorica	6	12	FIS/02
	<i>Un corso a scelta tra:</i> Meccanica statistica I	6		FIS/02
	Teoria dei campi I	6		FIS/02
Affini e integrativi	<i>Due corsi a scelta tra quelli del settore FIS/02 riportati nella successiva tabella</i>	6	12	FIS/02
		6		FIS/02
A scelta studente	<i>Corsi a scelta tra quelli curricolari o affini non già selezionati, o attivati in altri curricula, o in altri corsi di studio dell'Università di Firenze</i>	12		
Stage e tirocini		6		
Prova finale		36		
<b>TOTALE</b>		<b>120</b>		

Insegnamento	CFU	SSD
Introduzione alla teoria della relatività **	6	FIS/02
Meccanica statistica II	6	FIS/02
Relatività	6	FIS/02
Sistemi relativistici *	6	FIS/02
Storia e fondamenti della fisica **	6	FIS/02
Teoria delle particelle elementari	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

\* Si consiglia la frequenza dell'insegnamento al secondo anno.

\*\* Corso consigliato anche agli studenti del CdS triennale.

**Nota:** Il percorso di studi di Fisica dei Sistemi Complessi può essere affrontato sia mediante un approccio più teorico nel Curriculum di Fisica Teorica, sia mediante un approccio più computazionale nel Curriculum di Fisica della Materia. Pertanto, in tale percorso di studi sono da considerarsi pertinenti al Curriculum di Fisica Teorica anche gli insegnamenti: Laboratorio di fisica computazionale, Fisica dei sistemi complessi e Fisica statistica e teoria dell'informazione presenti nella tabella del curriculum di Fisica della Materia.

## 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	9	FIS/02
	Fisica della materia	12	FIS/03
	Fisica nucleare e subnucleare	12	FIS/04
	Astrofisica	9	FIS/05
Curricolari caratterizzanti	Laboratorio nucleare	6	FIS/01
	Laboratorio subnucleare *	6	FIS/01
Affini e integrativi	<i>Un corso a scelta tra:</i>		
	Fisica nucleare	6	FIS/04
	Fisica subnucleare *	6	FIS/04
	<i>Un corso a scelta tra quelli del settore FIS/01, FIS/04 o FIS/07 non già selezionati tra gli affini o riportati nella successiva tabella</i>	6	FIS/01 FIS/04 FIS/07
A scelta studente	<i>Corsi a scelta tra quelli affini non già selezionati, o attivati in altri curricula, o in altri corsi di studio dell'Università di Firenze</i>		
Stage e tirocini		6	
Prova finale		36	
<b>TOTALE</b>		<b>120</b>	

Insegnamento	CFU	SSD
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
Analisi dati in fisica subnucleare	6	FIS/04
Collisioni e decadimenti nucleari	6	FIS/04
Raggi cosmici	6	FIS/04
Tecniche di rivelatori per radiazioni ionizzanti **	6	FIS/04
Fisica medica	6	FIS/07
Tecniche di analisi con fasci di ioni	6	FIS/07

\* Si consiglia la frequenza dell'insegnamento al secondo anno.

\*\* Corso consigliato anche agli studenti del CdS triennale.

## 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	9	54	FIS/02
	Fisica della materia	12		FIS/03
	Fisica nucleare e subnucleare	12		FIS/04
	Astrofisica	9		FIS/05
Curricolari caratterizzanti	<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	
Affini e integrativi	<i>Due corsi a scelta tra quelli del settore FIS/03 riportati nella successiva tabella</i>	6	12	FIS/03
		6		FIS/03
A scelta studente	<i>Corsi a scelta tra quelli curricolari o affini non già selezionati, o attivati in altri curricula, o in altri corsi di studio dell'Università di Firenze</i>	12		
Stage e tirocini		6		
Prova finale		36		
<b>TOTALE</b>		<b>120</b>		

(prosegue nella pagina successiva)

<b>Insegnamento</b>	<b>CFU</b>	<b>SSD</b>
Dispositivi e nanostrutture a semiconduttore **	6	FIS/03
Elettronica quantistica	6	FIS/03
Fisica atomica	6	FIS/03
Fisica degli atomi ultrafreddi *	6	FIS/03
Fisica dei liquidi e soft matter	6	FIS/03
Fisica dei sistemi complessi	6	FIS/03
Fisica della materia condensata e fenomeni critici	6	FIS/03
Fisica dello stato solido	6	FIS/03
Fisica statistica e teoria dell'informazione	6	FIS/03
Fotonica	6	FIS/03
Laser e applicazioni **	6	FIS/03
Onde e sistemi disordinati	6	FIS/03
Optoelettronica	6	FIS/03
Ottica	6	FIS/03
Ottica biomedica *	6	FIS/03
Ottica quantistica	6	FIS/03
Sensoristica avanzata *	6	FIS/03

\* Si consiglia la frequenza dell'insegnamento al secondo anno.

\*\* Corso consigliato anche agli studenti del CdS triennale.

**Nota:** Il percorso di studi di Fisica dei Sistemi Complessi può essere affrontato sia mediante un approccio più computazionale nel Curriculum di Fisica della Materia, sia mediante un approccio più teorico nel Curriculum di Fisica Teorica. Pertanto, in tale percorso di studi sono da considerare pertinenti al Curriculum di Fisica della Materia anche gli insegnamenti Meccanica statistica I e II e Teoria dei sistemi dinamici presenti nella tabella del Curriculum di Fisica Teorica.

## APPENDICE

### Insegnamenti caratterizzanti obbligatori

#### **Astrofisica (Prof. E. Landi Degl'Innocenti)**

##### **I semestre, 9 CFU**

Il corso si prefigge lo scopo di illustrare le applicazioni in ambito astrofisico dei concetti di fisica generale (meccanica classica, fluidodinamica, termodinamica, statistica e meccanica quantistica) acquisiti dallo studente nel suo percorso formativo della laurea triennale.

**Programma:** Struttura stellare: equazione fondamentale della struttura stellare, stelle politropiche, equazione di Lane-Emden, equazione di stato, equazione dell'equilibrio energetico, produzione di energia per reazioni di fusione nucleare, flusso radiativo, opacità e media di Rosseland, flusso convettivo, criterio di Schwarzschild, termodinamica del gas ionizzato, teoria della mixing length, evoluzione chimica, modelli stellari, modello solare standard, problema dei neutrini mancanti, oscillazioni solari. Atmosfere stellari, equazione del trasporto radiativo, interpretazione degli spettri stellari. Struttura stellare (stelle degeneri): equazione di stato per la materia degenera, massa limite di Chandrasekhar, stelle di neutroni, pulsar, modello del dipolo magnetico ruotante. Fisica della gravitazione: lobi di Roche e punti Lagrangiani, dischi di accrescimento Kepleriani, fenomeni mareali. Masse degli oggetti astrofisici: relazione massa-luminosità, valori massimo e minimo delle masse stellari, masse dei pianeti.

#### **Fisica della materia**

##### **I semestre, 6 CFU (Prof. G. M. Tino)**

##### **II semestre, 6 CFU (Prof. A. Rettori)**

Il corso intende fornire allo studente le basi della fisica della materia nelle sue forme atomica, molecolare e dello stato solido. È opportuno che lo studente segua i due corsi nell'ordine naturale. Le conoscenze che sono richieste sono quelle dell'elettromagnetismo, della relatività ristretta e della meccanica quantistica, fornite durante il percorso della laurea triennale.

**Programma parte I:** Struttura e spettri atomici. Interazione degli atomi con la radiazione elettromagnetica. Spettroscopia atomica con radiazione laser. Raffreddamento e intrappolamento di atomi. Ricerca attuale in fisica atomica e applicazioni. Fisica Molecolare.

**Programma parte II:** Modello di Drude; Teoria di Sommerfeld dei metalli; Sonde, funzione di correlazione della densità, fattore di struttura e di forma: liquidi e solidi, Strutture cristalline, simmetrie reticoli cristallini 2d e 3d; Reticolo reciproco; Elettroni in strutture periodiche: Modello del potenziale periodico debole e metodo tight-binding, metodo OPW e pseudopotenziale; Equazioni di Hartree e Hartree-Fock, Schermaggio; Classificazione dei solidi ed energie coesive; Teoria dei solidi armonici; Fononi nei metalli.

#### **Fisica nucleare e subnucleare**

##### **I semestre, 6 CFU (Prof. M. Bini)**

##### **II semestre, 6 CFU (prof. E. Iacopini)**

Il corso intende fornire allo studente le basi della fisica nucleare (interazione fra nucleoni) e della fisica subnucleare, ovvero il quadro odierno delle particelle elementari e delle loro interazioni. È opportuno che lo studente segua i due corsi nell'ordine naturale. Le conoscenze che sono richieste sono quelle della ordinaria meccanica quantistica e della relatività ristretta, fornite durante il percorso della laurea triennale.

**Programma parte I:** 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.

**Programma parte II:** 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, 9 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. Campi di spostamento: fononi. Formalismo Lagrangiano e teorema di Noether. Campo di Klein Gordon. Campo elettromagnetico: fotoni e loro quantizzazione in gauge di Coulomb. Interazione radiazione-materia: emissione, assorbimento, diffusione di fotoni. Superfluidità, spettro fononico, cenni alla rottura spontanea di simmetrie. Superconduttività. Equazione di Dirac dell'elettrone e sue principali conseguenze e quantizzazione del campo di Dirac.

## **Insegnamenti caratterizzanti e affini/integrativi curriculari**

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

#### **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)**

#### **I 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. L. Del Zanna)**

#### **I 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, pulsar, buchi neri). In particolare verranno introdotte la relatività generale, l'idrodinamica relativistica ed i processi radiativi non termici. Il corso è consigliato al secondo anno, dopo la frequentazione del corso di Astrofisica, ed è fruibile da studenti di tutti i percorsi di studio.

**Programma:** Prima parte: astrofisica relativistica e oggetti compatti. Fenomenologia degli oggetti compatti. Introduzione alla relatività generale. Applicazioni astrofisiche: moti esplosivi (supernove e gamma-ray burst), stelle relativistiche, collasso gravitazionale, buchi neri, elettrodinamica degli oggetti compatti. Seconda parte: radiazione e particelle non termiche. Processi radiativi non termici e applicazione ai resti di supernova. Fenomenologia dei raggi cosmici. Accelerazione di particelle.

### **Collisioni e decadimenti nucleari (Prof. M. Bini, Prof. A. Olmi)**

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

Il corso intende presentare le tecniche sperimentali e gli approcci teorici necessari per lo studio delle interazioni fra nuclei e della loro struttura. Per seguire il corso è necessaria una conoscenza di base di fisica nucleare data sia dal corso di Fisica nucleare e subnucleare che dal corso di Fisica nucleare.

**Programma:** Decadimento alfa ed applicazioni spettroscopiche. Decadimento beta: decadimenti proibiti, doppio decadimento beta ed emissione di nucleoni "beta ritardati". Decadimento gamma. Tecniche di misura per la determinazione delle distribuzioni angolari e delle vite medie dei livelli. Classificazione delle multipolarità delle transizioni elettromagnetiche: rapporti di diramazione. Verifica delle predizioni dei modelli nucleari (a shell, collettivi e di Nilsson). Panoramica sui meccanismi di reazione in collisioni fra nuclei pesanti al variare della massa dei nuclei e dell'energia del fascio. Analisi di alcune problematiche di attualità riguardanti la dinamica e la "termodinamica" delle reazioni nucleari, in collisioni sia centrali che periferiche. Presentazione di apparati di ultima generazione, studio delle loro caratteristiche e discussione dei risultati con essi ottenuti.

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

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

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

**Programma:** Radioastronomia. Le sorgenti di interesse radioastronomico; i processi di emissione; la strumentazione. Interferometria radioastronomica. Onde gravitazionali: la loro natura; le sorgenti ipotizzate; le tecniche osservative. Spettroscopia astronomica: strumenti, rivelatori a stato solido, formazione dello spettro. Analisi di immagini astronomiche. Le distanze in astronomia; verifica osservativa della Legge di Hubble.

### **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. Sarà in grado di seguire seminari specialistici e leggere articoli di letteratura; avrà la capacità di interpretare i dati osservativi e di costruire semplici modelli di fenomeni legati alla formazione delle strutture.

**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.

### **Dispositivi e nanostrutture a semiconduttore (Prof. 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. Pozzi, fili e punti quantici. Stati elettronici in strutture a confinamento quantistico. Alcuni esempi di dispositivi basati su nanostrutture (Emettitori di singolo fotone. Dispositivi ad effetto tunnel.)

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

#### **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 atomica (Prof. M. Inguscio, Prof. L. Fallani)**

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

Il corso si propone di introdurre lo studente agli argomenti di ricerca più attuali della Fisica Atomica, con particolare attenzione agli sviluppi legati al raffreddamento laser degli atomi e al loro intrappolamento. Per una fruizione ottimale del corso se ne consiglia la frequentazione dopo avere seguito la prima parte del corso di Fisica della materia. Aspetti più avanzati della fisica dei gas quantistici possono essere approfonditi nel corso di Fisica degli atomi ultrafreddi.

**Programma:** Richiami e complementi su strutture atomiche e 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, Interferometria atomica, Esperimenti con ioni intrappolati, Orologi atomici e spettroscopia di precisione, Introduzione alla simulazione e alla computazione quantistica.

### **Fisica degli atomi ultrafreddi (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.

### **Fisica dei liquidi e soft matter (Prof. 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, colloidali 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 anomale 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 colloidali 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 (Prof. D. Fanelli)**

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

Il corso offre una panoramica sulle tecniche proprie dei sistemi dinamici, guidando lo studente attraverso una galleria di esempi ed applicazioni. Gli aspetti più formali delle tecniche matematiche discusse sono oggetto di approfondimento nel corso di Sistemi dinamici. Il corso di Fisica statistica e teoria dell'informazione è consigliato invece per coloro che intendano approfondire gli aspetti computazionali della modellistica.

**Programma:** Sistemi dinamici lineari e non lineari. Punti fissi e stabilità in sistemi 2D. Teoria delle biforcazioni. Soluzione numerica di problemi complessi. Mappe discrete. Chaos. Pattern formation in modelli di reazione diffusione. Teoria dei sistemi stocastici. Metodi approssimati per lo studio dei sistemi stocastici (van Kampen, Kramers-Moyal). Applicazioni.

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

#### **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. Rettori, Prof. A. Cuccoli)**

#### **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 della materia (2.a parte) e di Meccanica statistica.

**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 galassie (Prof. A. Marconi, Prof. G. Risaliti)**

#### **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 ottenere una interpretazione fisica degli spettri e della immagini di galassie, e delle funzioni di luminosità delle sorgenti. 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. 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.

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

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

Nell'ambito di questo corso completeremo lo studio delle proprietà dei solidi iniziata nell'ambito di Fisica della materia (2.a parte). Questo, naturalmente, implica che il corso sia seguito solo successivamente a Fisica della materia. Studieremo le proprietà generali di trasporto per gli elettroni. Vedremo le proprietà magnetiche degli elettroni liberi, con particolare attenzione ai livelli di Landau. Passeremo ad analizzare le proprietà dei semiconduttori omogenei così come quelle dei dielettrici. Analizzeremo le proprietà magnetiche dei vari tipi di ioni e le possibili interazioni fra loro. Concluderemo con lo studio della superconduttività con particolare riferimento alle proprietà delle giunzioni Josephson.

**Programma:** Teoria generale dei coefficienti di trasporto. Livelli di Landau degli elettroni liberi e degli elettroni di Bloch. Proprietà dei semiconduttori puri e drogati. Proprietà dei dielettrici. Comportamento magnetico degli ioni in un cristalli e possibili interazioni fra i momenti

magnetici. Rassegna sperimentale della superconduttività, cenni alla teoria BCS, Effetto Josephson e SQUID.

### **Fisica medica (Prof. F. Fusi, Prof. 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 nucleare (Prof. 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 e subnucleare. Aspetti più specifici sono demandati per esempio al corso di Collisioni e decadimenti nucleari.

**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. Classificazione dei meccanismi di reazione e cenni a collisioni fra nuclei pesanti.

### **Fisica solare (Prof. M. Romoli, Prof. E. Landi Degl'Innocenti)**

#### **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, magnetogrammi. 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.

### **Fisica statistica e teoria dell'informazione (Prof. F. Bagnoli)**

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

Il corso si propone di fornire una visione globale della fisica dei sistemi estesi (composti da molti elementi), con un approccio computazionale. Si cercherà di mostrare l'origine di 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 nei corsi di Fisica dei sistemi

complessi (con particolare enfasi sui sistemi di reazione-diffusione) e nel corso di Teoria dei sistemi dinamici (soprattutto per i sistemi hamiltoniani). Gran parte dei programmi usati in questo corso vengono sviluppati nel corso di Laboratorio di fisica computazionale.

**Programma:** Sistemi dinamici continui e discreti. Biforcazioni. Caos. Processi stocastici. Insiemi statistici. Processi di Markov. Sistemi estesi campo medio. Transizioni di fase dinamiche. Richiami di termodinamica. Meccanica statistica di equilibrio. Modello di Ising. Il metodo Monte-Carlo. Sistemi disordinati e frustrati. Ottimizzazione stocastica. Complessità algoritmica. Teoria delle reti. Dinamiche epidemiche. Sociofisica. Reti neurali. Teoria dell'evoluzione. Teoria dei giochi ripetuti.

### **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 nucleare e 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. Studio del decadimento del muone sia non polarizzato che polarizzato. Il decadimento del neutrone.

### **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 Problema agli autovalori, teorema di Floquet-Bloch. Bande fotoniche Analogia con MQ. Caso unidimensionale: specchi di Bragg, microcavità planari. Oscillazioni di Bloch ottiche. QW e eccitone-polaritone in MC planari. 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.

### **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 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 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.

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

#### **I - 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, Prof. S. Ruffo)**

#### **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, Fisica statistica 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. C.M.C. Gambi, Prof. R. Torre)**

#### **I-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), sia di tipo elastico che anelastico, risolte nel dominio dei tempi o delle frequenze. 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 inoltre i principi teorici della spettroscopia non-lineare e le tecniche sperimentali per la realizzazione di esperimenti di tipo pump-probe risolti su scale temporali molto veloci, femtosecondi. 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 elastico ed anelastico, loro utilizzo per la caratterizzazione degli stati condensati. Teorie molecolari dei processi di scattering anelastico. Tecniche sperimentali per la misura della radiazione diffusa. Introduzione alla spettroscopia non-lineare e alle tecniche risolte nel dominio dei tempi con visita ad alcuni laboratori di ricerca. Misure di scattering elastico su nanoparticelle: Misura del coefficiente di diffusione e del raggio idrodinamico. Misura dell'intensità media di luce diffusa al variare dell'angolo. Misure di scattering anelastico: spettroscopia Raman. Spettroscopia risolta in frequenza di un liquido molecolare con assegnazione delle righe spettrale alle vibrazioni molecolari.

### **Laboratorio di fisica dello stato solido (Prof. A. Vinattieri)**

#### **I-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 di fisica nucleare (Prof. A. Stefanini)**

#### **II semestre, 6 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. G. Passaleva)**

#### **I Semestre, 6 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.

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

#### **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 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.

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

#### **II 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 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 e dei gruppi 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) Algebre e gruppi di Lie. Algebre di Lie e gruppi di Lie. Rappresentazioni lineari. Classificazione delle algebre di Lie semisemplici e diagrammi di Dynkin. Geometria differenziale dei gruppi di Lie.

### **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).

### **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.

### **Onde e sistemi disordinati (Prof. D.S. Wiersma)**

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

Corso su fotonica in sistemi disordinati ed analogie fra fotonica, fisica dello stato solido e fisica atomica. Metodi didattici ispirati da peer-instruction (Mazur-Harvard), esercitazioni in aula e prove sperimentali, oltre alla teoria. Durante il corso si affronteranno anche vari aspetti della comunicazione di risultati scientifici.

**Programma:** Entropia e disordine, cammino casuale, processi di diffusione, statistica di Lévy, voli di Lévy, processi di trasporto (i.e. Zener tunneling, oscillazioni di Bloch), analogie fotonica/fisica stato solido/fisica atomica, random laser, localizzazione di Anderson. Teoria, esperimenti, ed applicazioni. Particolare attenzione sarà data ad applicazioni di fotonica in energia solare.

### **Optoelettronica (Prof. S. Pelli)**

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

Il corso offre una formazione di base nel settore dell'Optoelettronica e della Fotonica Applicata. Queste costituiscono 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, in particolare, dei moderni sistemi di comunicazione su fibra ottica e di molti dispositivi per la sensoristica. Le lezioni teoriche saranno integrate da esercitazioni in laboratorio. Il corso si complementa con i corsi di Ottica, Elettronica quantistica, Ottica quantistica, Fotonica e Fisica dei sistemi disordinati.

**Programma:** Ottica e Fotonica: tecnologie abilitanti. Propagazione in guide ottiche planari. Accoppiamento della luce a dispositivi guidanti. Caratterizzazione di guide ottiche e dispositivi. Materiali vetrosi e processi di diffusione. Film sottili: deposizione e caratterizzazione. Fibre ottiche e componenti in fibra; sensori a fibra ottica. Ottica integrata: materiali e tecnologie. Componenti e dispositivi ottici integrati: amplificatori e laser integrati basati su emissione da ioni di terre rare in matrici vetrose, modulatori elettro-ottici. Formati di modulazione della luce nei sistemi di trasmissione ottici. Microrisonatori a modi di galleria. Introduzione ai cristalli fotonici. Fibre microstrutturate e a bandgap fotonico. Tecniche di simulazione di sistemi ottici.

### **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:* Approssimazione scalare, onde evanescenti e fasci Gaussiani. Interferometri: Michelson, Young, Ronchi test. Diffrazione: principio di Huygens-Fresnel, teoria di Helmholtz-Kirchhoff. Potere risolutivo di un sistema ottico. Cenno alla superrisoluzione ed ai microscopi a campo vicino. Ottica di Fourier: principio dell'interferenza inversa e basi dell'olografia. Teoria delle immagini. *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)**

#### **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 morfofunzionale di tessuti biologici. Aspetti di imaging biomedico applicato ad indagini cliniche. Visite in laboratorio con partecipazione ad esperimenti.

### **Ottica quantistica (Prof. F. Marin)**

#### **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.

### **Plasmi astrofisici (Prof. M. Velli, Prof. S. Landi)**

#### **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.

### **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.

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

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

Il corso fornisce un'introduzione agli aspetti fondamentali 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 in un percorso di studi sia di tipo teorico che astrofisico.

**Programma:** Parte introduttiva: Richiami di relatività speciale, elettromagnetismo e teoria dei campi; Tensore energia impulso; Fluidi relativistici; Principio di equivalenza. Aspetti di geometria differenziale: Varietà; Vettori; Derivata di Lie; Campi vettoriali; Forme differenziali;

Integrazione; Trasporto parallelo; Derivata covariante; Curvatura. Relatività Generale: Equazioni di Einstein, Accoppiamento materia gravità. Onde gravitazionali. Leggi di conservazione. Soluzione di Schwarzschild. Perielio di Mercurio. Curvatura dei raggi di Luce. Time-Delay. Buchi Neri. Cenni di Cosmologia.

### **Sensoristica avanzata (Prof. F.S. Cataliotti, Prof. S. Sciortino)**

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

Il corso si propone di fornire allo studente le nozioni di base sui principi fisici delle principali tecniche impiegate nella sensoristica avanzata. Ci si propone anche di illustrare allo studente i principi di funzionamento di diversi dispositivi basati su radiazione coerente. Il corso partirà dai concetti fondamentali dell'interazione radiazione-materia e della propagazione della radiazione ottica per poi descrivere gli aspetti basilari del funzionamento dei sensori interferometrici e spettroscopici.

**Programma:** Principali argomenti del corso saranno: Concetti di base su onde elettromagnetiche, ottica fisica ed ottica geometrica; interferometri ottici e cavità ottiche; cenni di interazione radiazione-materia; Laser; fibre ottiche; principi di funzionamento di sensori inerziali, telemetri, sensori FBG, giroscopi ottici, particle imaging velocimetry, LIDAR. Le applicazioni descritte spazieranno dal monitoraggio di stress meccanici e di processi di combustione, ai sensori inerziali integrati ed ai sistemi di monitoraggio ambientali.

### **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 effettuare 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 per la trattazione della materia in condizioni estreme di temperatura e densità, laddove gli effetti quantistici e relativistici diventano importanti. È consigliato, seppure non obbligatorio, seguire il corso al secondo anno della laurea magistrale.

**Programma:** Meccanica statistica e termodinamica relativistica di equilibrio. Insieme 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 e fondamenti della fisica (Prof. A. Baracca, Prof. R. Livi)**

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

Il corso si propone di fornire agli studenti un percorso ragionato che ripercorre le principali tappe dello sviluppo della fisica moderna, a partire dalla Prima Rivoluzione Industriale in Inghilterra, attraverso le successive svolte nell'organizzazione tecnologica, industriale e scientifica. Si ricostruisce, anche in base all'esame di alcuni dei lavori scientifici fondamentali, il progressivo processo di formalizzazione e astrazione, che ha condotto dall'iniziale approccio empirico al livello estremo della meccanica quantistica. Si analizzano infine alcuni dei principali sviluppi successivi, della fisica dei solidi, la fisica nucleare, e l'astrofisica.

**Programma:** Nascita dei concetti energetici. Macchina a vapore e termodinamica. Nascita dei modelli cinetico e dell'etere e.m. Seconda rivoluzione industriale in Germania, sviluppi della chimica. Dalla teoria cinetica alla meccanica statistica: paradossi e difficoltà, atomismo e anti-atomismo a fine '800. Dal problema del corpo nero alla rivoluzione dei quanti e della relatività, 1900-1905. Ulteriori sviluppi (Einstein, Nernst, Debye, de Broglie, Schrödinger). Modelli dell'atomo. Nascita della meccanica quantistica ortodossa. Nuove branche scientifiche specializzate: fisica dei solidi e invenzione del transistor; fisica nucleare dalla scoperta del neutrone alla bomba atomica; nascita e primi sviluppi della fisica delle particelle elementari. Alcune tappe dello sviluppo dell'astrofisica.

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

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

#### **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 I (Prof. D. Dominici)**

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

Lo scopo del corso sarà di fornire un'introduzione moderna alla teoria quantistica dei campi basata sul formalismo dell'integrale sui cammini di Feynman. Il corso tratterà argomenti di base ed applicazioni d'interesse generale della teoria dei campi. Con gli strumenti appresi gli studenti saranno in grado di affrontare argomenti più avanzati in vari settori della fisica teorica. Prerequisito per il corso è il corso di Fisica teorica.

**Programma:** Richiami sulla teoria relativistica dei campi. Integrale sui cammini in meccanica quantistica. Formalismo funzionale in teorie di campo. Temperatura finita. Elettrodinamica quantistica. Teoria della rinormalizzazione. Esempi di correzioni radiative in elettrodinamica e teorie scalari. Operatori effettivi. Divergenze infrarosse. Introduzione a teorie di gauge non abeliane.

### **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. Segue 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. Introduzione alle teorie di gauge non-abeliane. Path-integral in teoria dei campi, metodi funzionali e serie perturbativa. Rottura spontanea della simmetria. Interazioni deboli prima del modello standard. Modello standard elettrodebole:  $SU(2) \times U(1)$ , meccanismo di Higgs, gauge rinormalizzabile e unitaria, mescolamento delle famiglie. Matrice CKM, violazione di CP, meccanismo GIM. Fenomenologia del modello standard: alcuni processi. Rinormalizzazione e gruppo di rinormalizzazione. Equazione di Callan-Symanzik e costante d'accoppiamento mobile. Rinormalizzazione col path-integral delle teorie di gauge nonabeliane. Calcolo della beta function. Introduzione alla QCD e al modello a partoni.

### **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. R. Livi, Prof. A. Torcini)**

#### **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 della fisica; 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 Poincarè. 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.