

## PERCORSO DI ACCELERATORI DI PARTICELLE E SUPERCONDUTTIVITÀ APPLICATA

**Docenti di riferimento:** M. Sorbi, G. Bellomo, C. Pagani

Superconduttività D.C. – Magneti superconduttori (M. Sorbi, G. Bellomo)

Superconduttività R.F. – Cavità Acceleranti (C. Pagani)

L'utilizzo degli acceleratori di particelle (elettroni, protoni, ioni) rimane fondamentale nella ricerca nel campo della fisica delle particelle elementari (vedi grandi laboratori internazionali quali il CERN di Ginevra o il laboratorio nazionale LNF di Frascati) e nella Fisica nucleare delle basse energie (due laboratori nazionali: LNL a Legnaro-Padova e LNS a Catania).

Altre specifiche applicazioni sono basate su acceleratori di particelle, quali la produzione di radiazione di sincrotrone (laboratorio ELETTRA di Trieste) e di neutroni per lo studio della struttura dei materiali, la produzione di radioisotopi a uso diagnostico in medicina, la cura di tumori con fasci di protoni o ioni (adroterapia), la sterilizzazione di materiale sanitario.

È in corso di studio, con finanziamenti e su programmi dell'Unione Europea, l'utilizzo di acceleratori per la trasmutazione delle scorie delle centrali nucleari riducendo in tale modo il problema dello stoccaggio delle scorie in depositi geologici.

A Milano esiste una notevole tradizione nel campo degli acceleratori risalenti agli anni 1960 che ha portato alla costruzione di due ciclotroni. Il ciclotrone superconduttore del Laboratorio Nazionale del Sud (LNS) è stato progettato e costruito negli anni 80 nel laboratorio LASA (Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata) del Dipartimento di Fisica.

L'indirizzo di Fisica degli Acceleratori prevede una sistematica descrizione dei principi di funzionamento degli acceleratori e delle macchine acceleratrici più importanti con particolare rilievo per gli acceleratori circolari e lineari per elettroni e protoni (Fisica Acceleratori I, Prof. Bellomo). Una particolare enfasi è posta sulla tecnologia superconduttiva, che è oggi predominante negli acceleratori di ultima generazione (protoni ed elettroni), sia per i magneti che per le cavità a radiofrequenza, e nei rivelatori per alte energie. Sono pertanto previsti un corso di base di Superconduttività Applicata (Prof. M. Sorbi) ed un corrispondente Laboratorio di Superconduttività Applicata (Dott. Volpini, INFN).

Il Laboratorio di Acceleratori (Dott. Bosotti, INFN) è dedicato alle tecniche di accelerazione (cavità a radiofrequenza normalconduttive e superconduttive).

Nel laboratorio LASA sono attive le seguenti linee di ricerca:

1. magneti superconduttori per sincrotroni e collider per la Fisica delle alte energie
2. magneti superconduttori solenoidali e toroidali per rivelatori di particelle
3. acceleratori lineari di elettroni superconduttivi per FEL (Free Electron Laser) e Fisica delle alte energie
4. acceleratori superconduttivi di protoni per Neutron Spallation Source e per la trasmutazione di scorie nucleari

Sono pertanto disponibili numerose tesi da svolgere internamente al LASA oppure nei laboratori italiani ed esteri con i quali esistono accordi di collaborazione. La preparazione (e gli argomenti di tesi) dei laureati sono molto ben apprezzati nei laboratori di ricerca di acceleratori sia italiani che esteri nonché nei laboratori industriali nei settori delle tecnologie avanzate.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica degli Acceleratori mod. I	b
Metodi Matematici della Fisica: equazioni differenziali 1 o altro corso di ambito disciplinare "Teorico e dei Fondamenti della Fisica"	b	Superconduttività Applicata	b
-Lab. di Fisica degli Acceleratori (in anni solari dispari) Lab. di Superconduttività Applicata (in anni solari pari)	b	Corso a scelta tra affini e integrativi	c
Elementi di Fisica dei Continui (o altro corso di ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale")	b	Corso a scelta tra affini e integrativi	c
Corso a scelta libera, suggerendo tra: - Fisica Nucleare - Fisica delle Particelle - Interazione e rivelazione della radiazione nucleare	d	Corso a scelta libera	d
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
- Lab. di Fisica degli Acceleratori (in anni solari dispari)  - Lab. di Superconduttività Applicata (in anni solari pari)	b	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta tra affini e integrativi	c	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti  
c Affini e Integrative  
d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

#### Si riportano nel seguito ulteriori scelte consigliate, ripartite per ambito

**Affini e Integrativi:** Elettronica 1, Elettronica dei Sistemi Digitali, Metodologie di Analisi Dati, Laboratorio di Fisica delle Particelle, Laboratorio di Strumentazione Spaziale 1, Elettronica 2, Fisica dei Dispositivi Elettronici, Fondamenti di Energetica, Laboratorio di Strumentazione per i Rivelatori di Particelle, Metodi Computazionali della Fisica, Laboratorio di Fisica della Materia 2, Fondamenti della Fisica

**Ambito "Sperimentale Applicativo":** Laboratorio di Elettronica Analogica

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1, Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 2

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia":** Struttura della Materia 2, Laboratorio di Fisica dei Plasmi 1, Sviluppi recenti in Fisica delle Particelle e Astroparticelle, Rivelatori di Particelle, Fisica dei Plasmi e della Fusione Controllata, Fisica dei Solidi 1, Fisica dei Dispositivi Elettronici

## PERCORSO DI ASTROFISICA

#### Docente di riferimento: G. Bertin

Astrofisica Generale (G. Bertin, G. Lodato, M. Lombardi, P. Pizzochero) - <http://astro.fisica.unimi.it/>  
Cosmologia (M. Bersanelli, D. Maino, A. Mennella, M. Tomasi) - <http://cosmo.fisica.unimi.it>

L'Astrofisica moderna si poggia su grandi iniziative a livello internazionale: si pensi al Very Large Telescope, gestito dallo European Southern Observatory, e al telescopio spaziale di nuova generazione James Webb Space Telescope, per quanto riguarda l'astronomia ottica e dell'infrarosso vicino, alla missione Ulysses, per quanto riguarda la fisica dello spazio, alla missione Planck, per quanto riguarda lo studio della radiazione di fondo di origine cosmologica, all'interferometro ALMA, per l'astronomia millimetrica e sub-millimetrica, e alla missione Gaia, per astrometria di altissima precisione. Parallelamente, l'Astrofisica moderna si poggia sullo sviluppo di un adeguato quadro teorico di riferimento, in relazione ad alcuni importanti centri di interesse (ad esempio, formazione ed evoluzione delle galassie oppure materia oscura e caratteristiche della radiazione di fondo in cosmologia oppure formazione e proprietà delle stelle normali e delle stelle dense). La varietà delle misure effettuate e delle problematiche affrontate è tale che le competenze da acquisire in una Laurea Magistrale possono quindi concretizzarsi in uno spettro estremamente ampio di realizzazioni, sia dal punto di vista osservativo/sperimentale, che dal punto di vista generale della fisica fondamentale (con collegamenti importanti tra i problemi astrofisici trattati e la fisica teorica, la fisica dei plasmi e della materia, la fisica dei nuclei e delle particelle elementari). Lo scopo del presente Percorso è quello di offrire allo studente interessato competenze specialistiche nell'ambito dell'Astrofisica moderna tramite una formazione il più possibile ampia e bilanciata.

Per questo obiettivo, la strategia del presente Percorso affida un ruolo importante ad alcuni corsi molto generali, concentrati nel primo anno (a sviluppare conoscenze avanzate di fisica, matematica, astronomia e laboratorio); in particolare, oltre all'insegnamento obbligatorio di "Elettrodinamica Classica", sono fortemente consigliati i corsi di "Astronomia 1 (6 CFU) e 2 (6 CFU)", di "Laboratorio di Strumentazione Spaziale 1 (6 CFU) e 2 (6 CFU)", e quello di "Metodi Matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1 (6 CFU)". Lo studente sceglierà altri insegnamenti, rispettando i vincoli prescritti dal Regolamento della Laurea Magistrale in termini di insegnamenti caratterizzanti e affini: in particolare, tra i corsi caratterizzanti, deve apparire almeno un corso di ambito "Microfisico e della Struttura della Materia" (essendo gli altri ambiti già soddisfatti con i corsi di Elettrodinamica Classica e quelli fortemente consigliati indicati sopra).

L'inizio del lavoro di preparazione della tesi è in pratica previsto già nel secondo semestre del primo anno, sebbene nella tabella esemplificativa riportata qui sotto sia indicato all'inizio del secondo anno. Il lavoro di tesi darà allo studente una prima introduzione al mondo della ricerca e sarà occasione di collaborazione con gruppi (teorici, sperimentali, o osservativi) anche al di fuori dell'Università (per esempio, gruppi attivi presso altri istituti di ricerca italiani o stranieri).

Gli sbocchi per coloro che otterranno la Laurea Magistrale nel Percorso di Astrofisica sono molteplici. Oltre a quelli generali che si applicano a tutti i Percorsi del Corso di Laurea Magistrale in Fisica, vanno ricordati in particolare quelli relativi all'impiego presso istituti di ricerca in ambito astronomico (osservatori e laboratori, nazionali e internazionali) e presso le industrie che fanno da supporto alle grandi iniziative astronomiche (industria spaziale, ottica, meccanica). Particolarmente per questi sbocchi di tipo tecnologico, rispetto a chi proviene da Lauree Magistrali più tecniche, lo studente laureato nel presente Percorso sarà caratterizzato dal possedere una più chiara visione degli obiettivi scientifici ai quali le tecnologie sono mirate e in generale una maggior sensibilità ed attenzione verso i problemi di modellizzazione.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Astronomia 2	b
Astronomia 1	b	Laboratorio di Strumentazione Spaziale 2	c
Metodi Matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1	b	Corso a scelta	(*)
Laboratorio di Strumentazione Spaziale 1	c	Corso a scelta	(*)
Corso a scelta	(*)	Corso a scelta	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Tesi di Laurea	18 CFU	Tesi di laurea	27 CFU
Corso a scelta	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
Corso a scelta	(*)		
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

- b Caratterizzanti
- c Affini e Integrative
- d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

Per i corsi a scelta, oltre a tutti i corsi legati al Settore Scientifico Disciplinare FIS/05 (Astrofisica Nucleare Relativistica 1 (6 CFU) e 2 (6 CFU), Astrofisica Teorica 1 (6 CFU) e 2 (6 CFU), Cosmologia (6 CFU), Fisica Cosmica (6 CFU)) sono consigliati in particolare corsi relativi a fisica dei continui, fisica dei plasmi, relatività generale, simulazioni numeriche, metodologie di analisi dati, meccanica celeste, ottica.

## PERCORSO DI ELETTRONICA

**Docenti di riferimento:** V. Liberali, M. Lazzaroni, A. Pullia, S. Riboldi

La formazione è orientata a costruire una figura professionale predisposta all'innovazione e all'evoluzione tecnologica, adatta ad inserirsi in tutti gli ambiti applicativi dell'elettronica e particolarmente in quelli interdisciplinari. L'indirizzo elettronico della laurea in fisica, attivo da circa mezzo secolo, ha preparato centinaia di professionisti, docenti e ricercatori per i quali il sistema industriale lombardo è stato il principale soggetto di reclutamento. In molti casi questi laureati hanno costruito brillanti carriere al di fuori di tale ambito, in centri di ricerca nazionali ed internazionali, atenei e gruppi industriali extra-regionali.

Gli sbocchi professionali dei Fisici-Elettronici registrano punte di assorbimento particolarmente alte nell'industria dei componenti elettronici, nel settore aerospaziale e nel settore bio-medico.

La Laurea Magistrale qualifica per la progettazione e lo sviluppo di circuiti analogici e digitali, sistemi elettronici, strumentazione, offrendo una visione tecnologicamente aggiornata del sistema elettronico integrato. Gli aspetti di elettronica generale, strumentazione, tecnologie elettroniche e misure vengono trattati diffusamente nella Laurea Magistrale, nella quale vi è spazio per un approfondimento applicativo delegato principalmente all'esperienza di tesi. Le competenze sperimentali vengono efficacemente impartite nei corsi di laboratorio, riguardanti l'elettronica analogica e i sistemi digitali.

La tesi di laurea potrà essere svolta all'interno del Dipartimento di Fisica, nei laboratori di ricerca del gruppo di elettronica e nei laboratori elettronici dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, oppure all'esterno anche in qualificate sedi industriali o in centri di ricerca sulla base di collaudate collaborazioni che il corpo docente del dipartimento ha in atto da decenni.

Le attività di ricerca all'interno del Dipartimento di Fisica riguardano la progettazione e lo sviluppo di circuiti elettronici innovativi e strumentazione avanzata, tra cui specificamente: circuiti integrati resistenti alle radiazioni, circuiti multi-canale di front-end e/o back-end per rivelatori di radiazioni ionizzanti, rivelatori di particelle, sistemi dedicati per l'acquisizione e l'elaborazione digitale di segnali negli esperimenti di fisica nucleare e delle alte energie, sistemi per l'affidabilità e il collaudo di sistemi elettronici di potenza e point-of-load, circuiti elettronici per applicazioni interdisciplinari quali le nanotecnologie, lo studio dei materiali, la microscopia, la granulometria, la geofisica.

Nelle sedi esterne i campi di prevalente interesse su cui svolgere tesi di laurea sono quelli delle applicazioni aerospaziali, bio-mediche e nucleari. Circuiti integrati, memorie a semiconduttore e sistemi integrati micro-elettro-meccanici, in tutta la gamma dei problemi di ricerca e sviluppo che comportano, costituiscono gli altri ambiti di tesi svolte in collaborazione con la principale industria europea di semiconduttori.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Elettronica 2	c
Elettronica 1	c	Elettronica Nucleare	b
Laboratorio di Elettronica Analogica	b	Laboratorio di Elettronica Digitale	b
Corso a scelta di ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica"	b	Fisica dei Dispositivi Elettronici	d
Corso a scelta di ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale"	b	Fondamenti di Energetica oppure Laboratorio di Strumentazione per i Rivelatori di Particelle	d
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Tesi di Laurea	18 CFU	Tesi di laurea	27 CFU
Elettronica dei Sistemi Digitali	c	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
Corso a scelta	b		
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

- b Caratterizzanti
- c Affini e Integrative
- d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

## PERCORSO DI FISICA DELLA MATERIA

Le innumerevoli possibili fasi e stati della materia, la loro interazione con la radiazione, e le molteplici strutture naturali ed artificiali che la materia può realizzare dal nanometro alla dimensione della nostra galassia pongono continue sfide ai ricercatori: da un lato, per lo sviluppo di nuovi materiali, di sorgenti di radiazione, e di sistemi con caratteristiche ed applicazioni innovative, dall'altro per migliorarne la comprensione fondamentale e consentirci di progettare e modificare le loro proprietà. Nel nostro dipartimento, come illustrato negli allegati, affrontiamo molte di queste sfide usando approcci sia teorici che sperimentali.

Consigliamo agli studenti che intendono scegliere un percorso formativo nel settore della Fisica della Materia di inserire nel piano di studi, oltre all'insegnamento obbligatorio di Elettrodinamica Classica, quello (caratterizzante) di Struttura della Materia 2. È inoltre consigliato l'inserimento di Fisica Statistica e di un laboratorio sperimentale. Lo studente deve quindi scegliere altri 10 insegnamenti, rispettando i vincoli prescritti dal Regolamento della Laurea Magistrale in termini di insegnamenti caratterizzanti e affini: si devono inserire necessariamente 5 ulteriori corsi "caratterizzanti", più 3 corsi "Affini e integrativi". Tra i 5 corsi caratterizzanti, deve apparire almeno un corso di ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica" e uno di ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale" (essendo gli ambiti "Sperimentale Applicativo" e "Microfisico e della Struttura della Materia" già soddisfatti con i corsi di Elettrodinamica Classica e di Struttura della Materia 2). Gli ulteriori 2 corsi sono a scelta completamente libera. Per aiutare lo studente nella scelta, riportiamo nel seguito alcuni esempi che si riferiscono a diversi percorsi didattici nell'ambito di fisica della materia. Per ciascun percorso vengono forniti suggerimenti, non vincolanti, per la scelta degli insegnamenti da inserire nel piano di studi.

### 1) BIOFISICA

#### Docente di riferimento: S. Zapperi

Biofisica computazionale (G. Tiana, S. Zapperi)

Studio di interazioni cellulari e biomolecolari in sistemi e interfacce nanostrutturati (A. Podestà, C. Lenardi, P. Milani)

Sistemi biologici nativi e nanoparticelle (A. Lascialfari, F. Orsini)

Lo studio dell'interazione tra la materia inorganica e sistemi organici di rilevanza biologica si avvale dell'applicazione di tecniche (raggi X, NMR, SEM, AFM, ipertermia magnetica, tecniche ottiche, simulazioni) e di concetti fisici (transizioni di fase, scale-free networks, ecc.) a problemi quali, ad esempio, il ripiegamento delle proteine, la struttura del DNA e dei complessi proteici, la dinamica della regolazione genica, lo sviluppo fenotipico di cellule staminali, modelli computazionali per i processi cellulari e per la biomeccanica della cellula, delle membrane cellulari, di filamenti come i microtubuli. Si studiano anche nuovi agenti teranostici per applicazioni biomediche. Il percorso prevede corsi obbligatori di fisica di base e di fisica applicata alla biologia. A integrazione di questi sono previsti corsi facoltativi che appartengono anche al CCD di scienze biologiche.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica Statistica	b
Struttura della Materia 2	b	Laboratorio ambito "Microfisico e della Struttura della Materia" o Affine e Integrativo	b oppure c
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta libera	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

- b Caratterizzanti
- c Affini e Integrative
- d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

#### Si riportano nel seguito ulteriori scelte consigliate, ripartite per ambito

**Corsi Affini e integrativi:** Biofisica, Biofisica Computazionale, Caratterizzazione di Nanostrutture e Film Sottili, Fisica delle Superfici 2, Fisica dei Liquidi e della Materia Soffice, Fisica delle Proteine 2, Fisica delle Superfici 2, Chimica Biologica\* Biochimica delle Proteine\*, Proteomica Strutturale\*\*, Metodi d'indagine biochimica\*, Biochimica Applicata allo sviluppo di molecole biologicamente attive\*\*, Bioinformatica e Biostatistica\*\*

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Meccanica Statistica 1, Meccanica Statistica 2, Teoria Statistica dei Campi

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia":** Fisica delle Proteine 1, Laboratorio di Ottica e Applicazioni, Fisica delle Superfici 1, Fisica Statistica, Fisica dei Solidi 1

\*CCD Scienze biologiche; \*\*CCD Biotecnologie

## 2) FISICA DEI PLASMI

#### Docente di riferimento: M. Romé

Fisica dei Plasmi (M. Romé, G. Maero)

Si studia il comportamento complesso del plasma, lo stato della materia più diffuso nell'universo (99.9%). Lo studio è centrale in un ampio insieme di tematiche di ricerca, che vanno da problemi a carattere fondamentale, quali lo sviluppo di turbolenza e strutture coerenti, lo studio di fenomeni collettivi in plasmi di laboratorio e in plasmi astrofisici, il confinamento di particelle cariche e la misura di proprietà fondamentali della materia, ad applicazioni tecnologiche, quali la fusione termonucleare controllata, le sorgenti avanzate di radiazione, l'accelerazione di particelle, la propulsione spaziale. Nel percorso formativo si conduce lo studente ad apprendere i fondamenti della fisica dei plasmi e ad indirizzarsi verso ricerche sui plasmi di laboratorio, sulla fusione controllata, su plasmi astrofisici e spaziali. Su queste tematiche è ben consolidata in dipartimento, e ben inserita in ambito internazionale, attività di ricerca sperimentale e teorica.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica Statistica	b
Laboratorio di Fisica dei Plasmi 1	b	Fisica dei Plasmi e della Fusione Controllata	b
Metodi matematici della Fisica: Equazioni differenziali 1	b	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta libera	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

- b Caratterizzanti
- c Affini e Integrative
- d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

#### Si riportano nel seguito ulteriori scelte consigliate, ripartite per ambito

**Corsi Affini e integrativi:** Laboratorio di Fisica dei Laser 1, Fondamenti di Energetica, Fisica degli Acceleratori 1, Laboratorio di Fisica degli Acceleratori

**Ambito "Sperimentale Applicativo":** Corso a scelta

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Metodi Matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1, Meccanica Analitica 2

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia":** Struttura della Materia 2, Ottica 1

**Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale":** Astrofisica Teorica 1, Astrofisica Teorica 2, Fisica Cosmica 1, Elementi di Fisica dei Continui

## 3) MAGNETISMO E LUCE DI SINCROTRONE

#### Docenti di riferimento: A. Lascialfari, G. Rossi

Magnetismo e Superconduttività (A. Lascialfari, F. Orsini)

Proprietà magnetiche di superficie (G. Rossi)

Analisi fine della materia (G. Rossi)

L'analisi fine della materia allo stato condensato richiede metodiche e strumenti capaci di risoluzione atomica e di risoluzione temporale. Si sviluppano sonde e tecniche adatte all'analisi strutturale (a scala nanometrica), all'analisi della struttura elettronica e magnetica (alla scala energetica dei meV) e all'analisi della dinamica di processi collettivi nei solidi (magnetizzazione, dinamica di spin, ordinamento orbitale, transizioni di fase a partire dalla scala dei femtosecondi), anche utilizzando Spettroscopia Muonica e NMR. Tale attività richiede una preparazione sperimentale e teorica che spazia dalla struttura della materia alla fisica atomica e delle superfici, ma anche alla fisica degli acceleratori, che sono le tecnologie di base per le sorgenti per spettroscopia con radiazione elettromagnetica (luce di sincrotrone), neutroni e muoni. L'accesso alle sorgenti Elettra e FERMI nel quadro del corso Fisica Superfici 2, e per tesi sperimentali permette di utilizzare strumentazione avanzata e metodi di analisi dati complessi.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica Statistica	b
Struttura della Materia 2	b	Laboratorio ambito "Microfisico e della Struttura della Materia" o Affine e Integrativo	b oppure c
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta libera	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti  
c Affini e Integrative  
d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

#### Si riportano nel seguito ulteriori scelte consigliate, ripartite per ambito

**Corsi Affini e integrativi:** Fisica delle Superfici 2, Biofisica Computazionale, Fisica dei Dispositivi Elettronici, Fisica delle Proteine 2, Laboratorio di Fisica della Materia 2, Metodi computazionali della Fisica, Modellistica geofisica e ambientale, Caratterizzazione di Nanostrutture e film sottili, Teoria Quantistica dell'Informazione, Elettronica 1, Elettronica dei sistemi digitali, Fisica Atomica, Storia della Scienza e della Tecnica, Biofisica, Fisica delle proteine 2, Fisica dei Liquidi e della materia Soffice, Laboratorio di Fisica dell'Atmosfera, Elettronica 2

**Ambito "Sperimentale Applicativo":** Laboratorio di Elettronica Analogica, Laboratorio di Elettronica Digitale, Fisica dell'Ambiente

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1, Teoria dei Sistemi a molti corpi 2, Metodi matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1, Meccanica Statistica 1, Meccanica Statistica 2

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia":** Struttura della Materia 2, Fisica Statistica, Fisica dei Semiconduttori, Fisica delle Proteine 1, Laboratorio di Ottica Quantistica, Laboratorio di Ottica e applicazioni, Fisica Statistica, Fisica dei Solidi 1, Fisica delle Superfici 1, Ottica 1, Ottica Quantistica, Laboratorio di Fisica dei Laser

**Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale":** Elementi di Fisica dei Continui, Fisica dell'Atmosfera, Fisica Terrestre, Fisica dell'Atmosfera

## 4) NANOSTRUTTURE E MATERIALI NANOSTRUTTURATI

#### Docente di riferimento: P. Milani

Sintesi e caratterizzazione (P. Milani, C. Lenardi, A. Podestà, P. Piseri)

Fasci supersonici (P. Milani, P. Piseri)

Spettroscopia fotoelettronica (C. Lenardi)

Nanocompositi e nanopolimeri (P. Milani, C. Lenardi)

Tecniche scanning probe per lo studio di sistemi e interfacce nanostrutturati (A. Podestà)

In questo settore nel Dipartimento di Fisica esistono attività sperimentali e teoriche ben consolidate e riconosciute internazionalmente nel campo delle nanoscienze e nanotecnologie, della fisica dei solidi e delle superfici. La sinergia di queste attività supporta un'offerta formativa molto ricca in questo campo. I problemi affrontati vanno dalla coesistenza di effetti classici e quantistici in oggetti di dimensioni nanometriche, allo studio di fenomeni e sistemi di interesse biofisico, alla realizzazione di dispositivi per la sensoristica, conversione e accumulazione di energia (fotovoltaico, supercapacitori) e per il biomedicale (sistemi di analisi per la genomica e la proteomica, nuovi materiali polimerici e nanocompositi). L'attività teorica comprende lo sviluppo di metodi di frontiera per il calcolo degli spettri di eccitazione. Il percorso è caratterizzato da un'elevata interdisciplinarietà, con una forte base di fisica della materia (fisica dei solidi, delle superfici, dei semiconduttori) e di corsi di laboratorio. Le competenze acquisite offrono ottime opportunità lavorative sia in campo di ricerca industriale applicata, sia di ricerca di base.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica Statistica	b
Struttura della Materia 2	b	Laboratorio ambito "Microfisico e della Struttura della Materia" o Affine e integrativo	b oppure c
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta libera	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti  
c Affini e Integrative  
d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

#### Si riportano nel seguito ulteriori scelte consigliate, ripartite per ambito

**Corsi Affini e integrativi:** Fisica delle Superfici 2, Biofisica Computazionale, Fisica dei Dispositivi Elettronici, Fisica delle Proteine 2, Laboratorio di Fisica della Materia 2, Metodi computazionali della Fisica, Modellistica geofisica e ambientale, Caratterizzazione di Nanostrutture e film sottili, Teoria dei Sistemi Quantistici Aperti, Teoria Quantistica dell'Informazione, Elettronica 1, Elettronica dei sistemi digitali, Fisica Atomica, Storia della Scienza e della Tecnica, Biofisica, Fisica dei Liquidi e della materia Soffice, Laboratorio di Fisica dell'Atmosfera, Elettronica 2

**Ambito "Sperimentale Applicativo":** Laboratorio di Elettronica Analogica, Laboratorio di Elettronica Digitale, Fisica dell'Ambiente

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1, Teoria dei Sistemi a molti corpi 2, Metodi matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1, Meccanica Statistica 1, Meccanica Statistica 2

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia":** Struttura della Materia 2, Fisica Statistica, Fisica dei Semiconduttori, Fisica delle Proteine 1, Laboratorio di Ottica Quantistica, Laboratorio di Ottica e applicazioni, Fisica Statistica, Fisica dei Solidi 1, Fisica delle Superfici 1, Ottica 1, Ottica Quantistica, Laboratorio di Fisica dei Laser

**Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale":** Elementi di Fisica dei Continui, Modellistica Geofisica e Ambientale, Fisica dell'Atmosfera, Fisica Terrestre, Fisica dell'Atmosfera

## 5) SISTEMI COMPLESSI

**Docente di riferimento:** A. Vailati

Fluidi complessi (A. Vailati, M. Potenza, M. Carpineti)

Plasmi Complessi (M. Romé, G. Maero)

Meccanica statistica teorica e sistemi disordinati (S. Caracciolo, S. Zapperi, M. Gherardi)

Fisica statistica della materia (D. Galli, D. Pini)

Biofisica computazionale (G. Tiana)

Fisica dei fasci di particelle e di radiazione (V. Petrillo)

Cosa succede quando un numero elevato di entità elementari, siano esse granelli di sabbia, catene polimeriche, cellule, esseri viventi..., vengono fatte interagire tra loro? La scienza è in grado di fornire una descrizione dettagliata del comportamento di singole entità di questo tipo. Quando però vengono considerate collettivamente emergono comportamenti cooperativi inattesi, come la formazione di strutture auto-organizzate. Sistemi complessi di questo tipo presentano una fenomenologia molto ricca. La loro dinamica è spesso non lineare, accompagnata dallo sviluppo di correlazioni spazio-temporali complesse, che presentano frequentemente invarianza di scala. Di particolare rilevanza in questi sistemi è il ruolo delle fluttuazioni, soprattutto in presenza di transizioni di fase e di turbolenza. Il nostro Gruppo si occupa di studiare teoricamente e sperimentalmente sistemi complessi quali fluidi complessi classici e quantistici, plasmi complessi, materia soffice, materiali disordinati, sistemi biologici ed ecosistemi.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica Statistica	b
Struttura della Materia 2	b	Laboratorio ambito "Microfisico e della Struttura della Materia" o Affine e integrativo	b oppure c
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta libera	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti

c Affini e Integrative

d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

### Si riportano nel seguito ulteriori scelte consigliate, ripartite per ambito

**Corsi Affini e integrativi:** Sistemi Dinamici 1, Fisica delle Proteine 2, Biofisica Computazionale, Fisica dei Liquidi e della Materia Soffice, Biofisica

**Ambito "Sperimentale Applicativo":** Corso a scelta

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Teoria Statistica dei Campi 1, Meccanica Statistica 1, Meccanica Statistica 2

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia":** Fisica dei Plasmi e della Fusione Controllata, Fisica delle Proteine 1, Laboratorio di Ottica e Applicazioni, Laboratorio di Fisica dei Plasmi 1, Fisica Statistica, Ottica 1

**Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale":** Elementi di Fisica dei continui, Corso a scelta

Inoltre, è possibile scegliere corsi esterni su argomenti non coperti internamente (da valutare caso per caso): statistica avanzata, genetica e genomica, bioinformatica avanzata, biologia molecolare, finanza, ecologia, scienze sociali, tecniche sperimentali avanzate

## 6) FENOMENI DI COERENZA QUANTISTICA

**Docente di riferimento:** M. Paris

(M. Paris, F. Castelli, S. Cialdi, S. Olivares, N. Piovella, D. Tamascelli, B. Vacchini)

Il percorso è dedicato allo studio dell'interazione tra radiazione e materia, nei suoi risvolti fondamentali e applicativi, con particolare enfasi ai fenomeni di coerenza quantistica. L'offerta formativa include corsi di base sui sistemi costituiti da atomi e fotoni, corsi di meccanica quantistica avanzata, e corsi su argomenti di frontiera della ricerca, tra cui l'interazione tra radiazione e condensati atomici o atomi esotici, i sistemi quantistici aperti e le tecnologie quantistiche, ovvero le applicazioni della meccanica quantistica a nuovi protocolli di misura e di trasmissione dell'informazione. Lo studente potrà avvicinarsi sia a tematiche teoriche, sia sperimentali, scegliendo tra i corsi consigliati e impegnandosi nel lavoro di tesi all'interno di gruppi di ricerca attivi e riconosciuti a livello internazionale. Oltre alla ricerca fondamentale e applicata in centri di ricerca nazionali ed internazionali, gli sbocchi professionali principali sono la ricerca e sviluppo in ambito opto-elettronico, la fisica e la tecnologia dei laser, la crittografia e le comunicazioni quantistiche e la metrologia.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Ottica Quantistica (fondamentale)	b
Struttura della Materia 2	b	Laboratorio di fisica dei Laser (1)	b
Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1 (2)	b	Un corso di ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale" (3)	b
Teoria Quantistica dell'informazione (4)	c	Teoria Quantistica della Computazione (4)	c
Fisica Atomica (4)	d	Corso a scelta libera (5)	d
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Teoria dei sistemi quantistici aperti (4)	c	Tesi di laurea	45 CFU
Laboratorio di Ottica Quantistica (1)	b	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti

c Affini e Integrative

d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

### Note

- possibili alternative in ambito "Microfisico e della Struttura della Materia": Laboratorio di Ottica ed applicazioni, Fisica statistica
- possibili alternative in ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica": Meccanica Statistica 1
- ad esempio: Fisica Cosmica o Elementi di Fisica dei Continui
- possibili alternative in Affini e integrativi: Metodi computazionali della fisica
- ad esempio: Fisica Statistica, Fisica dei solidi

## 7) TEORIA DELLA MATERIA CONDENSATA

**Docente di riferimento:** G. Onida

Gas, Fluidi e Solidi Quantistici (D. Galli)  
Teoria del funzionale densità: metodi e applicazioni a solidi, superfici e nanostrutture (G. Onida, G. Fratesi, N. Manini)  
Fenomeni di attrito su scala nanometrica (N. Manini)  
Materia soffice (D. Pini)  
Fluttuazioni statistiche e effetti di scala nei materiali (S. Zapperi)

In questo percorso verranno forniti strumenti concettuali e algoritmici avanzati per lo studio e la previsione delle proprietà fisiche di sistemi e materiali complessi. Le tematiche richiedono sia tecniche classiche che quantistiche e riguardano: gas diluiti ultrafreddi, superfluidi, solidi quantistici, sistemi a molti elettroni, struttura e dinamica a scala nanometrica. Inoltre ci occupiamo di "materia soffice" (es.: liquidi e soluzioni di molecole complesse) e tematiche a carattere interdisciplinare tra fisica, chimica e biologia. Le attività includono lo studio computazionale e statistico dei materiali con particolare riferimento alle proprietà funzionali rilevanti per le applicazioni. Le competenze acquisite sono teoriche e sono spendibili anche in ambiti diversi, in particolare per la simulazione numerica avanzata.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica Statistica	b
Struttura della Materia 2	b	Laboratorio ambito "Microfisico e della Struttura della Materia" o Affine e integrativo	b
Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1	b	Metodi Computazionali della Fisica	c
Modellistica Geofisica e Ambientale o Fisica Terrestre o Elementi di Fisica dei Continui	b	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta libera	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti  
c Affini e Integrative  
d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

### Si riportano nel seguito ulteriori scelte consigliate, ripartite per ambito

**Corsi Affini e integrativi:** Fisica delle Superfici 2, Biofisica, Biofisica Computazionale, Fisica delle Proteine 2, Laboratorio di Fisica della Materia 2, Metodi computazionali della Fisica, Modellistica geofisica e ambientale, Caratterizzazione di Nanostrutture e film sottili, Teoria dei Sistemi Quantistici Aperti, Teoria Quantistica dell'Informazione, Fisica Atomica, Storia della Scienza e della Tecnica, Fisica dei Liquidi e della materia Soffice, Calcolatori Quantistici, Fisica dei Dispositivi Elettronici

**Ambito "Sperimentale Applicativo":** Fisica dell'Ambiente

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1, Teoria dei Sistemi a molti corpi 2, Metodi matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1, Meccanica Statistica 1, Meccanica Statistica 2

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia":** Struttura della Materia 2, Fisica Statistica, Fisica dei Semiconduttori, Fisica delle Proteine 1, Laboratorio di Ottica e applicazioni, Laboratorio di Ottica Quantistica, Fisica dei Solidi 1, Fisica delle Superfici 1, Ottica 1, Ottica Quantistica

**Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale":** Elementi di Fisica dei Continui, Fisica dell'Atmosfera, Fisica Terrestre

## 8) OTTICA E APPLICAZIONI

**Docente di riferimento:** M. Potenza

Light scattering, ottica statistica (M. Potenza, A. Vailati)  
Ottica classica, imaging coerente e incoerente, olografia (M. Potenza, A. Vailati)  
Laser, interazione radiazione materia (S. Cialdi)  
Fisica dei fasci di particelle e di radiazione (V. Petrillo, M. Potenza)

In questo percorso verranno forniti strumenti concettuali, di laboratorio e di calcolo numerico per lo studio delle proprietà fisiche di sistemi ottici e per le loro applicazioni in ambito diagnostico avanzato. Le tematiche richiedono l'utilizzo di metodi classici e quantistici e riguardano sia lo studio delle tecniche ottiche intese come applicazione di fenomeni specifici delle proprietà della radiazione, sia le applicazioni dell'ottica come mezzo di indagine della materia. Il percorso ha connessioni strette con lo studio della "materia soffice" (es.: liquidi complessi fuori dall'equilibrio termodinamico) e tematiche a carattere interdisciplinare tra fisica, chimica e fisica dei fasci di particelle. Le attività su cui si centra il percorso sono di carattere prevalentemente sperimentale e portano all'acquisizione delle competenze necessarie per la gestione di esperimenti che comprendano parti importanti ottica. Le competenze acquisite sono spendibili anche in ambiti diversi della fisica.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica Statistica	b
Struttura della Materia 2	b	Laboratorio ambito "Microfisico e della Struttura della Materia" o Affine e integrativo	b
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta libera	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti  
c Affini e Integrative  
d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

### Si riportano nel seguito ulteriori scelte consigliate, ripartite per ambito

**Corsi Affini e integrativi:** Sistemi Dinamici 1, Fisica delle Proteine 2, Biofisica Computazionale, Fisica dei Liquidi e della Materia Soffice, Biofisica

**Ambito "Sperimentale Applicativo":** Corso a scelta

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Teoria Statistica dei Campi 1, Meccanica Statistica 1, Meccanica Statistica 2

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia":** Fisica dei Plasmi e della Fusione Controllata, Fisica delle Proteine 1, Laboratorio di Ottica e Applicazioni, Laboratorio di Fisica dei Plasmi 1, Fisica Statistica, Ottica 1

**Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale":** Elementi di Fisica dei continui, Corso a scelta



## PERCORSO DI FISICA MEDICA E SANITARIA

### Referenti linee di ricerca:

- Fisica Nucleare applicata all'adroterapia (G. Battistoni)
- Radiobiologia in adroterapia (D. Bettega)
- Radioprotezione, dosimetria e fisica medica (M. Cantone, I. Veronese)
- Dosimetria per adroterapia (protoni, neutroni) (G. Gambarini)
- Produzione di radionuclidi per applicazioni in Medicina e Nanoteragnostica (F. Groppi., M. Bonardi)

La Fisica Medica e Sanitaria comprende i settori di ricerca, sviluppo e applicazioni della Fisica che possono dare contributi per la salute, la sicurezza, una migliore qualità della vita e dell'ambiente. Si avvale anche degli sviluppi conoscitivi e tecnologici di altri campi della fisica (es la fisica nucleare, la fisica degli acceleratori) per il loro trasferimento e utilizzo a beneficio della salute dell'uomo. Esempio: la fisica delle radiazioni (ionizzanti e non) utilizzate in campo medico per la diagnostica e per la terapia.

Nel nostro dipartimento si sono sviluppate in un arco di trent'anni, soprattutto grazie all'attenzione per questi temi da parte dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), una serie di linee di ricerca che hanno come comune interesse la radiazione ionizzante nelle sue applicazioni al campo medico e biomedico. Riguardano in particolare studi per lo sviluppo di tecniche diagnostiche, terapeutiche e di radiofarmaci, analitiche e dosimetriche, la radiobiologia, la radioprotezione e studi di supporto agli aspetti decisionali relativi alla valutazione dei rischi e alla gestione dei problemi di radioecologia. Su questa esperienza e competenze è stato costruito il percorso di Fisica Medica e Sanitaria.

Il percorso di Fisica Medica e Sanitaria della Laurea Magistrale in Fisica si propone di fornire ai laureati una preparazione:

- per il proseguimento degli studi (nel Dottorato di Ricerca, nella Scuola di Specializzazione, necessaria per chi intenda accedere alla carriera di Fisico Medico presso aziende ospedaliere)
- per l'inserimento in qualificate attività lavorative (nel campo della ricerca, sviluppo e produzione industriale, nell'Università e negli Istituti di Ricerca, nelle Agenzie per la protezione e il controllo ambientale)

1° ANNO					
Primo Semestre	TAF	CFU	Secondo Semestre	TAF	CFU
Elettrodinamica Classica (*) (Amb. Sper. Appl.)	b	6	Radioprotezione dell'uomo e dell'ambiente (Amb. Sper. Appl.)	b	6
Metodi Matematici della Fisica: equazioni differenziali ( Amb. Teo)	b	6	Radiobiologia (Amb. Sper. Appl.)		6
Interazione e rivelazione della radiazione nucleare (Amb. Microfis.)	b	6	Laboratorio di Fisica Sanitaria	c	6
Elementi di Fisica dei continui (Amb. Geofis.)	b	6	Corso della Tabella A	c	6
Fisica Sanitaria 1 (Amb. Sper. Appl.)	b	6	Corso a scelta	c	6

2° ANNO					
Primo Semestre	TAF	CFU	Secondo Semestre	TAF	CFU
Tesi di Laurea	e	18	Tesi di Laurea	e	27
Corso della Tabella A	c	6	Abilità informatiche	f	3
Corso a scelta	d	6			

(\*) *Obbligatorio*

TAF b: caratterizzanti

TAF c: affini e integrativi

TAF d: a scelta tra tutti quelli di Ateneo. Sono particolarmente coerenti con il progetto formativo del percorso di Fisica Medica e Sanitaria: i corsi di Tab. A ed inoltre Fisica nucleare, Fisica degli acceleratori, Radioattività.

Tabella A TAF c; 6 CFU/Corso; (^) si attivano ad anni alterni

Primo Semestre	Secondo Semestre
Strumentazione per medicina	Dosimetria
Laboratorio Radiotraccianti (^)	Fisica Medica
	Radiochimica (^)
	Tecniche fisiche di diagnostica medica (^)

## PERCORSO DI FISICA DEL NUCLEO ATOMICO E INTERDISCIPLINARE

### Docente di riferimento: A. Bracco

Struttura e reazioni nucleari – attività sperimentale (A. Bracco, F. Camera, F. Crespi, S. Leoni)

Sviluppo di rivelatori (A. Bracco, F. Camera, F. Crespi, S. Leoni)

Astrofisica nucleare sperimentale (A. Guglielmetti)

Teoria della struttura e reazioni nucleari (P. F. Bortignon, G. Colò, X. Roca-Maza)

La fisica nucleare moderna si occupa in gran parte dello studio delle proprietà di nuclei che si trovano in condizioni estreme di temperatura, di momento angolare o di rapporto tra numero di protoni e neutroni. Questa problematica è di particolare interesse non solo per lo studio della struttura del nucleo e dei meccanismi di reazione, ma anche in ambiti interdisciplinari quali l'astrofisica nucleare. Infatti i processi nucleari sono responsabili sia della produzione di energia nelle stelle sia della creazione di elementi via via più pesanti a partire da quelli più leggeri. In particolare, la produzione in laboratorio dei nuclei cosiddetti "esotici", con fasci di ioni stabili o radioattivi, permette di isolare e studiare alcune reazioni chiave che si producono nelle stelle, la cui comprensione porta informazioni utili per molti problemi astrofisici quali ad esempio la nucleosintesi degli elementi, le esplosioni di supernova o le proprietà delle stelle di neutroni. La fisica nucleare è fondamentale anche per comprendere problemi legati alle particelle elementari: solo tramite osservabili nucleari è possibile ad esempio ricavare la massa dei vari tipi di neutrino.

L'attività sia sperimentale che teorica in quest'ambito viene fatta in collaborazioni internazionali presso numerosi laboratori europei, americani ed asiatici, come pure nei laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Questo tipo di ricerca, che si basa su innovativi sviluppi degli apparati sperimentali (inclusi gli acceleratori) e dei modelli teorici, ha rilanciato in questi anni il settore della fisica nucleare che ha attualmente un programma di ricerca a lungo termine molto ben definito e di avanguardia. Dal punto di vista teorico, il nucleo atomico costituisce un esempio unico di sistema quantistico a molti corpi il cui comportamento è governato dall'interazione forte, ma nel quale anche la forza debole e quella elettromagnetica si manifestano in maniera peculiare. Lo studio dei modelli nucleari è un'ottima scuola data la sua complessità e ricchezza.

Un'altra caratteristica importante della fisica nucleare è la sua forte interdisciplinarietà, motivo per cui viene utilizzata in diversi campi applicativi. Infatti le tecniche, soprattutto di tipo sperimentale, sviluppate per affrontare specifici problemi di fisica nucleare sono largamente e con successo impiegate in altri campi di ricerca tra cui il settore medico (adroterapia e radioprotezione in ambito spaziale) e quello dei beni culturali. Le metodologie teoriche legate al problema dei sistemi quantistici a molti corpi sono poi impiegate in molti altri settori quali la fisica della materia o la biofisica.

Il gruppo di docenti di questo indirizzo partecipa alle nuove iniziative in collaborazioni internazionali contribuendo fortemente sia alla ricerca di base in fisica nucleare che a quella interdisciplinare, mettendo a buon frutto la notevole e consolidata tradizione nel campo della struttura nucleare, della dinamica delle reazioni, e delle applicazioni. I corsi e i lavori di tesi offerti in questo ambito permettono allo studente di avere una visione completa di come una ricerca venga non solo realizzata ma anche pianificata e impostata, e questa esperienza si dimostra preziosa anche per la soluzione di numerosi problemi nell'ambito di contesti non accademici.

Gli sbocchi occupazionali per coloro che otterranno una laurea specialistica in questo indirizzo sono molteplici e riguardano sia il settore accademico che industriale.

Per il settore accademico, tra le varie possibilità ci sono quelle presso:

- università e centri o laboratori di ricerca (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare ed i suoi laboratori)
- laboratori esteri (Europa, Stati Uniti, Giappone)

Per quanto riguarda il settore aziendale e ospedaliero le possibilità sono:

- industrie e aziende nel campo dell'elettronica e dei rivelatori
- aziende informatiche, meccaniche e di strumentazione per la fisica sanitaria

Va sottolineato che il fatto di essere inseriti durante il lavoro di tesi in collaborazioni internazionali fornisce una particolare professionalità ben riconosciuta nel mondo del lavoro moderno.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Laboratorio di spettroscopia gamma	b
Fisica Nucleare	b	Corso a scelta tra: a) Radioattività b) Cosmologia	b
Struttura e reazioni Nucleari 1	b	Corso affine e integrativo	c
Corso a scelta tra: a) Metodi Matematici della Fisica: equazioni differenziali 1 b) Teoria dei sistemi a molti corpi 1	b	Corso affine e integrativo	c
Corso a scelta tra: a) Interazione e Rivelazione della Radiazione Nucleare b) Astrofisica Nucleare Relativistica 1	b	Corso affine e integrativo	c
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta libera	d	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta libera	d	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti

c Affini e Integrative

d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

## PERCORSO DI FISICA DELLE PARTICELLE E DELLE ASTROPARTICELLE

### Docente di riferimento: A. Andreatta

Altri docenti: L. Carminati, D. D'Angelo, M. Fanti, E. Meroni, L. Miramonti, F. Palombo, L. Perini, F. Ragusa

Negli ultimi decenni un'intensa attività teorica e sperimentale ha portato ad una comprensione molto dettagliata delle interazioni elettromagnetiche, deboli e forti che sono ben descritte da una teoria di gauge di leptoni e quarks chiamata "Modello Standard", la cui simmetria è rotta spontaneamente mediante il meccanismo di Higgs. Il modello Standard ha però dei problemi di "consistenza interna" o di "naturalità" che fanno pensare che si tratti in realtà di una teoria approssimata (alle scale di energie cui la teoria stessa è stata studiata e verificata) e che a scale di energie maggiori si debba far ricorso ad una teoria più generale. Ulteriori indicazioni in questo senso provengono da misure sperimentali quali le misure di precisione di LEP e del Tevatron, le oscillazioni dei neutrini, le fluttuazioni nella radiazione del fondo cosmico di microonde, l'accelerazione dell'espansione dell'universo, l'evidenza astrofisica di materia oscura. Esistono molte possibilità teoriche per questa generalizzazione ma è oggi indispensabile ottenere dei risultati sperimentali che indichino quali delle tante possibilità siano da studiare più attentamente.

Le attività di ricerca del nostro dipartimento in questo settore vedono rilevanti partecipazioni di fisici del nostro dipartimento e dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare di Milano e permetteranno agli studenti interessati di svolgere tesi di laurea sugli argomenti indicati, con possibilità di soggiorno presso i principali laboratori nazionali e internazionali in collaborazione con i quali si svolgono le ricerche.

Il curriculum proposto parte dal presupposto che l'interesse dello studente sia diretto verso la comprensione dei fenomeni di Fisica delle Particelle e ha l'obiettivo di dotare lo studente delle conoscenze necessarie per comprendere le attuali problematiche del settore mediante lo studio dei più recenti risultati quali la fisica del modello standard, la ricerca del bosone di Higgs, la fisica dei neutrini, la ricerca di nuove particelle supersimmetriche e di materia oscura, la violazione dell'invarianza CP.

Per gli studenti con interessi maggiormente orientati verso gli aspetti tecnologici della strumentazione del settore sono possibili piani di studio alternativi con maggiore enfasi verso materie di tipo tecnologico o applicativo. Lo studente ha la possibilità di completare la sua preparazione con almeno un corso nell'ambito di Fisica Teorica (suggeriti sono Fisica Teorica 1, Relatività Generale 1, Metodi Matematici della Fisica: Geometria e Gruppi 1, Teoria delle Interazioni Fondamentali 1), almeno un corso nell'ambito Astrofisico (suggeriti sono Astronomia 1, Cosmologia, Astrofisica Nucleare e Relativistica 1, Astrofisica Teorica) e privilegiando i suoi personali interessi con due corsi a scelta, per i quali segnaliamo: Metodologie di Analisi dei Dati, Rivelatori di Particelle, Fisica degli Acceleratori 1, Elettronica 1, Elettronica dei Sistemi Digitali, Elettronica Nucleare.

Per finire qualche considerazione sugli sbocchi occupazionali: trattandosi di un curriculum rivolto allo studio di problemi fondamentali, pensiamo che gli studenti siano molto interessati alla possibilità di proseguire la carriera in ambito accademico, eventualmente dopo un dottorato di ricerca. Per la carriera accademica i principali enti sono: a) le università (italiane o estere); b) l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare; c) istituzioni internazionali che svolgono ricerca in fisica delle particelle elementari, fra questi segnaliamo in particolare il CERN (il laboratorio europeo che ospita i più grandi acceleratori del mondo); d) altri enti di ricerca pubblici qualora ci si sposti su settori di ricerca diversi dalla Fisica delle Particelle.

Per attività lavorative di tipo non accademico gli studenti possono far conto su una solida preparazione che li porta ad avere competenze in campi quali elaborazioni statistiche di dati, capacità di formulare modelli matematici e di utilizzarli con competenza, conoscenze tecnologiche in settori quali la microelettronica, la meccanica di precisione e comunque la capacità di lavorare all'interno di grossi gruppi internazionali con ritmi e professionalità molto apprezzate nelle aziende.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fenomenologia del Modello Standard delle Particelle Elementari	c
Interazioni Elettrodeboli	b	Laboratorio di Strumentazione per Rivelatori di Particelle	c
Fisica delle Particelle	b	Rivelatori di Particelle	b
Corso di ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica" o "Astrofisico, Geofisico e Spaziale"	b	Corso di ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica" o "Astrofisico, Geofisico e Spaziale"	b
Corso a scelta libera	d	Corso a scelta libera	d
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Laboratorio di Fisica delle Particelle	c	Tesi di Laurea	30 CFU
Sviluppi recenti in Fisica delle Particelle e delle Astroparticelle	b		
Abilità informatiche e telematiche	3 CFU		
Tesi di Laurea	15 CFU		
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti  
c Affini e Integrative  
d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

### Si riportano nel seguito ulteriori scelte consigliate

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Teoria delle Interazioni Fondamentali 1, Metodi Matematici della Fisica: Geometria e Gruppi 1, Relatività Generale, Fisica Teorica 1

**Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale":** Astronomia 1, Astrofisica Nucleare e Relativistica 1, Cosmologia, Astrofisica Teorica

### Per soddisfare eventuali obblighi per l'ambito "Microfisico e della Struttura della Materia" o per corsi a scelta segnaliamo infine i seguenti corsi

**Affini e integrativi:** Elettronica 1, Elettronica dei Sistemi Digitali

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia:** Metodologie di Analisi Dati, Fisica degli Acceleratori 1, Elettronica Nucleare

## PERCORSO DI FISICA TEORICA E DEI FONDAMENTI DELLA FISICA

**Docente di riferimento:** L. Molinari

Teoria Quantistica dei Campi e Interazioni Fondamentali (S. Forte, A. Vicini, G. Ferrera, F. Caravaglios)

Teoria Quantistica dei Campi e Meccanica Statistica (S. Caracciolo, L. Molinari, S. Zapperi, B. Bassetti)

Supersimmetria, Gravità e Superstringhe (D. Klemm, A. Santambrogio)

Teoria dei Sistemi Quantistici Aperti (B. Vacchini)

Astrofisica Nucleare Relativistica (P. Pizzochero)

La Fisica ambisce a rispondere a domande come: di cosa è fatta la materia? Quali sono le forze fondamentali e le leggi che la governano? Qual è l'origine dell'universo, e come esso evolve? Come si spiegano i fenomeni macroscopici a partire dai costituenti microscopici? Per questo la natura è interrogata con esperimenti e misure sempre più sofisticate, che scaturiscono dalla conoscenza raggiunta.

La Fisica teorica è una architettura complessa di teorie, che inquadrano in leggi e modelli i fenomeni conosciuti, e il cui contenuto può essere molto più ampio rispetto a quanto è tecnicamente accessibile alle verifiche sperimentali. Lo sviluppo delle conseguenze concettuali delle teorie è un'attività molto importante della Fisica teorica, che può portare molto lontano, suggerendo nuovi esperimenti che le rafforzeranno o ne mostreranno i limiti. La precisa formulazione delle domande fondamentali fa parte del lavoro, e indirizza la ricerca sperimentale per meglio e univocamente leggere le risposte.

È grazie alle teorie che il fisico teorico guarda lontano, e focalizza la ricerca dove la natura non cessa di svelarsi, e manifestarci talvolta l'incompletezza dello stato raggiunto. Così la Fisica teorica avanza, allarga i confini, si ramifica e aspira a grandi sintesi. Queste si sono compiute più volte, come nella sintesi di Maxwell, nelle leggi della termodinamica, nella meccanica quantistica, nel modello standard, nel modello cosmologico. Ogni volta è una conquistata bellezza formale e concettuale.

Il percorso di studi in Fisica teorica nell'ambito della Laurea Magistrale in Fisica ha lo scopo di fornire in primo luogo una formazione generale avanzata in Fisica teorica, e di concentrarsi poi su uno dei principali aspetti della Fisica teorica contemporanea, e cioè:

1. La Fisica delle particelle elementari, in cui si studiano i costituenti della materia e le loro interazioni.
2. La meccanica statistica, in cui si studiano i sistemi con molti gradi di libertà, dalle scale più piccole delle particelle elementari, alle scale più grandi dei sistemi astrofisici, e i sistemi complessi, come quelli biologici.
3. La teoria dei campi quantistici e delle corde quantistiche, che forniscono il linguaggio unificato in cui si esprimono le teorie fisiche moderne.
4. I fondamenti della meccanica quantistica, e gli aspetti matematici della teoria.

Gli studi teorici si avvalgono di metodi matematici, di simulazioni numeriche, e dell'interpretazione dei dati sperimentali. La Fisica teorica è una struttura concettuale unica, e nella maggioranza delle ricerche molti aspetti teorici e metodologici si combinano. Il suo ruolo è all'intersezione delle discipline che formano la Fisica moderna, dalla Fisica della materia alla Fisica delle particelle, dall'astrofisica alla biofisica. Per questo, nella scelta dei corsi complementari è offerto un ventaglio di opzioni che va da corsi di tipo matematico, a corsi di Fisica teorica di base, a corsi più legati a specifiche discipline.

### 1) TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI E INTERAZIONI FONDAMENTALI

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica Teorica 1	b
Metodi Matematici della Fisica: Geometria e Gruppi 1	b	Metodi Computazionali della Fisica	c
Corso a scelta	(*)	Corso a scelta	(*)
Corso a scelta	(*)	Corso a scelta	(*)
Corso a scelta	(*)	Corso a scelta	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Fisica Teorica 2	b	Tesi di laurea	45 CFU
Teoria delle Interazioni Fondamentali 1	b	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti

c Affini e Integrative

d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

#### Ulteriori corsi consigliati

Affini e Integrativi: Introduzione alla Relatività Generale

### 2) TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI E MECCANICA STATISTICA

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Meccanica Statistica 1	b
Corso a scelta	(*)	Meccanica Statistica 2	b
Corso a scelta	(*)	Teoria Statistica dei Campi 1	b
Corso a scelta	(*)	Corso a scelta	(*)
Corso a scelta	(*)	Corso a scelta	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti

c Affini e Integrative

d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

#### Ulteriori corsi consigliati

Affini e Integrativi: Biofisica, Metodi computazionali della fisica

Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica": Fisica teorica 1, Fisica teorica 2; oppure Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1; Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 2 (consultare i docenti dei corsi)

### 3) SUPERSIMMETRIA, GRAVITÀ E SUPERSTRINGHE

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica Teorica 1	b
Introduzione alla Relatività Generale	c	Gravità e Superstringhe 1	b
Metodi Matematici della Fisica: Geometria e Gruppi 1	b	Gravità e Superstringhe 2	c
Corso a scelta	(*)	Corso a scelta	(*)
Corso a scelta	(*)	Corso a scelta	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Fisica Teorica 2	b	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti  
c Affini e Integrative  
d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

#### Ulteriori corsi consigliati

Affini e Integrativi: Geometria 2; Metodi Computazionali della Fisica  
Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia": Sviluppi Recenti in Fisica delle Particelle e Astroparticelle; Fisica Statistica; Fisica delle Particelle  
Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale": Cosmologia; Elementi di Fisica dei Continui

### 4) TEORIA DEI SISTEMI QUANTISTICI APERTI

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Corso a scelta	(*)
Teoria dei Sistemi Quantistici Aperti	c	Meccanica Statistica 1 <sup>(1)</sup>	b
Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1 <sup>(1)</sup>	b	Meccanica Statistica 2 <sup>(1)</sup>	b
Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 2 <sup>(1)</sup>	b	Fisica Teorica 1 <sup>(1)</sup>	b
Corso a scelta	(*)	Corso a scelta	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

<sup>(1)</sup> Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1/2 e/o Meccanica Statistica 1/2 e/o Fisica Teorica 1

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti  
c Affini e Integrative  
d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

#### Ulteriori corsi consigliati, ripartiti per ambito

Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia": Ottica Quantistica

### 5) ASTROFISICA NUCLEARE RELATIVISTICA

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Corso a scelta	(*)
Teoria delle Interazioni Fondamentali 1	b	Corso a scelta	(*)
Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1	b	Corso a scelta	(*)
Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 2	b	Corso a scelta	(*)
Corso a scelta	(*)	Corso a scelta	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Astrofisica Nucleare Relativistica 1	b	Tesi di laurea	45 CFU
Astrofisica Nucleare Relativistica 2	b	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*): b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti  
c Affini e Integrative  
d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

#### Ulteriori corsi consigliati

Affini e Integrativi: Introduzione alla Relatività Generale, Metodi Computazionali della Fisica.  
Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia": Fisica Statistica, Fisica Nucleare.

## PERCORSO DI GEOFISICA, FISICA PER L'AMBIENTE E FISICA PER I BENI CULTURALI

**Docente di riferimento:** M. Maugeri

Altri docenti: B. Crippa, M. Giudici, N. Ludwig, R. Sabadini, R. Vecchi

Il pianeta Terra è un sistema estremamente complesso, che può essere suddiviso schematicamente in varie parti (la litosfera e l'interno della Terra, l'idrosfera, l'atmosfera e la criosfera), ciascuna delle quali è essa stessa un sistema complesso ed eterogeneo. Questo percorso si prefigge l'obiettivo di fornire allo studente le conoscenze necessarie per studiare i meccanismi che regolano i processi che avvengono nelle diverse parti del nostro pianeta e le modalità di interazione tra queste. La metodologia di studio è basata su un approccio rigoroso ed integrato tra la modellistica fisico-matematica, l'acquisizione e l'analisi dei dati sperimentali e il confronto tra questi ultimi e i risultati dei modelli. La Fisica per i Beni Culturali, in particolare l'archeometria, ha molti punti di contatto con le discipline geofisiche e della fisica dell'ambiente, sia per la metodologia di misura che per l'oggetto di studio, ad esempio nel caso delle datazioni delle rocce. L'archeometria ("misura di ciò che è antico") include diverse discipline scientifiche (fisica, chimica, geologia, biologia). Tra queste, la fisica riveste un ruolo peculiare perché le tecniche fisiche di indagine, ad esempio quelle nucleari, offrono metodi non distruttivi e non invasivi per l'esecuzione di analisi con elevatissime sensibilità, senza richiedere alcuna preparazione del campione o lo spostamento di oggetti antichi o preziosi dalle sedi dove sono conservati.

L'attività didattica proposta per questo percorso, strettamente collegata alla ricerca svolta presso i Dipartimenti di Fisica e di Scienze della Terra, riguarda sia problemi di base (Quali sono le leggi fisiche che regolano i processi che avvengono nella litosfera, nell'atmosfera, nella idrosfera? Quali sono le principali cause di modifica delle condizioni ambientali su scala globale, dell'effetto serra, del buco dell'ozono, delle piogge acide?) sia problemi applicativi (Come si fanno le previsioni del tempo? Come incidono le attività umane sulla produzione di inquinanti nelle aree urbane? Come possiamo osservare la distribuzione dei contaminanti in aria, in acqua e nei suoli e prevederne l'evoluzione? Come possiamo osservare e prevedere eventuali effetti legati alle variazioni climatiche?). Le attività di ricerca sono svolte in collaborazione con altre sedi universitarie ed enti di ricerca (CNR, ENEA, JRC, ASI, ESA), che permettono anche l'effettuazione di stage presso laboratori europei, con le ARPA (Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente) e le amministrazioni locali e, per l'archeometria, con i laboratori dei principali musei mondiali, come il Louvre.

Consigliamo agli studenti che intendono scegliere un percorso formativo in questo settore di inserire nel piano di studi, oltre all'insegnamento obbligatorio di Elettrodinamica Classica (Ambito Sperimentale Applicativo), i seguenti corsi: Metodi Matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1 (corso caratterizzante – ambito Teorico e dei Fondamenti della Fisica), Modellistica Geofisica e Ambientale (corso affine-integrativo), Elementi di Fisica dei Continui (corso caratterizzante – ambito Astrofisico, Geofisico e Spaziale), Laboratorio di Fisica Terrestre (corso affine-integrativo) e Laboratorio di Misure Fisiche per l'Ambiente e l'Arte (corso affine-integrativo). Lo studente deve inoltre scegliere un altro insegnamento caratterizzante dell'ambito Microfisico e della Struttura della Materia che suggeriamo di individuare tra Fisica Nucleare, Fisica Statistica e Radioattività.

Lo studente deve quindi scegliere altri 5 insegnamenti, rispettando i vincoli prescritti dal Regolamento della Laurea Magistrale in termini di insegnamenti caratterizzanti e affini-integrativi: si devono quindi inserire necessariamente ulteriori 3 corsi "caratterizzanti". Gli ulteriori 2 corsi sono a scelta completamente libera.

Per i corsi caratterizzanti suggeriamo Fisica dell'ambiente, Fisica dell'atmosfera, Fisica terrestre e Tettonofisica, mentre per i corsi a scelta libera suggeriamo Fisica dell'interno della Terra\*, Sismologia\*, Modellistica numerica dei processi geodinamici e laboratorio\*, Esplorazione geofisica a piccola profondità\*, Dinamica dei fluidi geofisici\*, Microclimatologia per i beni culturali\*\*, Analisi ottiche (mutuato da Metodi di analisi per i BC)\*\*, Metodologie con raggi X per i BC\*\*, Tecniche fisiche avanzate applicate ai beni culturali (Laboratorio)\*\*\*, Conservazione e valorizzazione di strumentazione scientifica\*\*, Laboratorio di ottica ed applicazioni, Interazione e rilevazione della radiazione nucleare, Fondamenti di energetica e Storia della scienza.

\* Corsi della Laurea Magistrale in Scienze della Terra

\*\* Corsi della Laurea in Scienze per la conservazione dei Beni Culturali

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Un corso tra: a) Fisica statistica b) Fisica nucleare (I sem) c) Radioattività	b
Metodi Matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1	b	Laboratorio di Fisica Terrestre	c
Modellistica geofisica e ambientale	c	Corso a scelta	Vedi testo
Elementi di Fisica dei Continui	b	Corso a scelta	Vedi testo
Corso a scelta	Vedi testo	Corso a scelta	Qualsiasi
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Laboratorio di Misure Fisiche per l'Ambiente e l'Arte	c	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta	Vedi testo	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti

c Affini e Integrative

## PERCORSO DI STORIA E DIDATTICA DELLA FISICA

Il percorso di Storia e Didattica della Fisica permette agli studenti di consolidare la loro formazione in fisica, sia classica sia moderna e contemporanea, e di applicare le loro conoscenze disciplinari allo studio dello sviluppo storico-filosofico e della didattica della Fisica.

**Docente di riferimento:** L. Gariboldi

Storia della Fisica (L. Gariboldi)

Didattica della Fisica (M. Cavinato, M. Giliberti)

### 1) STORIA DELLA FISICA

L'analisi dello sviluppo storico e filosofico delle ricerche in fisica, sia in un contesto interno-disciplinare sia in uno esterno che tenga conto delle interazioni con la società, richiede per la fisica moderna e contemporanea una preparazione disciplinare che riflette così la tendenza in atto dal secondo dopoguerra nella costituzione di una comunità di storici della scienza di formazione scientifica che affianca quelli di formazione umanistica. Le ricerche in storia della fisica nel nostro dipartimento si concentrano soprattutto sul primo Novecento e riguardano i seguenti temi: fisica dell'atmosfera e geofisica, fisica della radiazione cosmica, fisica per applicazioni mediche, fisica teorica e sperimentale della transizione tra fisica classica e fisica quantistica/relativistica, strumentazione scientifica.

Gli studenti che intendono seguire il percorso di storia e didattica della fisica, con particolare riguardo alle tematiche storiche, devono inserire nel piano di studi gli insegnamenti caratterizzanti di Storia della Scienza e della Tecnica 1 e di Fondamenti della Fisica. Si consigliano, inoltre, il corso di Conservazione e valorizzazione di strumentazione scientifica (del CCD di Scienze per la conservazione e la diagnostica dei beni culturali) e un corso di laboratorio attinente a uno dei corsi a scelta libera dello studente.

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Laboratorio	(*)
Storia della Scienza e della Tecnica 1	c	Corso a scelta libera	(*)
Fondamenti della Fisica	c	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta libera	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

#### Tipologie Attività Formative (TAF)

b Caratterizzanti

c Affini e Integrative

d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

Si riportano nel seguito ulteriori corsi consigliati, ripartiti per ambito, tra i quali si suggerisce in particolare di scegliere i corsi caratterizzanti con il vincolo di uno per ambito

**Ambito "Sperimentale Applicativo":** Fisica Sanitaria; Fisica dell'Ambiente

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Metodi Matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1; Meccanica Statistica 1

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia":** Fisica delle Particelle; Fisica Nucleare; Interazione e rivelazione della radiazione nucleare; Fisica Statistica; Ottica 1; Radioattività; Rivelatori di particelle

**Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale":** Astronomia 1; Fisica terrestre; Fisica dell'Atmosfera

**Corsi Affini e integrativi (CCD Fisica):** Introduzione alla Relatività Generale; Armi Nucleari, Disarmo e Proliferazione Nucleare; Fenomenologia del Modello Standard delle Particelle Elementari; Fondamenti della Fisica; Fondamenti di Energetica; Introduzione all'Astrofisica

**Corsi Affini e integrativi (CCD Scienze per la conservazione e la diagnostica dei beni culturali):** Conservazione e valorizzazione di strumentazione scientifica

**Corsi Affini e integrativi (CCD Matematica):** Storia della matematica 1

**Corsi Affini e integrativi (CCD Filosofia):** Filosofia della scienza

### 2) DIDATTICA DELLA FISICA

La ricerca in didattica della fisica si occupa di trovare strumenti e metodi per migliorare l'insegnamento/apprendimento della fisica a tutti i livelli di età.

Per questo, da un lato è importante riflettere su nodi concettuali disciplinari importanti e, dall'altro, studiare le modalità di apprendimento. Inoltre, dato che il contesto e l'immagine sociale della disciplina influenzano il processo di apprendimento, sembra opportuno proporre anche metodi di didattica informale.

Le ricerche in didattica della fisica nel nostro dipartimento si concentrano pertanto sulle seguenti tre tematiche.

- Analisi e revisione di nodi concettuali disciplinari particolarmente interessanti; nell'ambito della fisica classica con particolare attenzione alle oscillazioni e all'elettromagnetismo; nell'ambito della fisica moderna (argomento di punta della ricerca in didattica) con particolare attenzione alla fisica quantistica e alla superconduttività.
- Didattica informale e sue ricadute sulla percezione della fisica nella società attraverso il teatro scientifico.
- Sviluppo di nuove tecniche atte a migliorare l'insegnamento/apprendimento della fisica seguendo le indicazioni della Commissione Europea. Attualmente siamo interessati alle tecniche IBSE (Inquiry Based Science Education).

Invitiamo gli studenti che intendono seguire il percorso di storia e didattica della fisica, con particolare riguardo alla didattica della disciplina, a inserire nel piano di studi l'insegnamento di Fondamenti della Fisica e di Storia della Scienza e della Tecnica 1. Si consigliano, inoltre, i corsi di Preparazione di Esperienze Didattiche 1 e 2 (del CCD di Matematica).

1° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Laboratorio	(*)
Fondamenti della fisica	c	Corso a scelta libera	(*)
Storia della Scienza e della Tecnica 1	c	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
Corso a scelta libera	(*)	Corso a scelta libera	(*)
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

2° ANNO			
Primo Semestre	Tipologia	Secondo Semestre	Tipologia
Corso a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	45 CFU
Corso a scelta libera	(*)	Abilità informatiche e telematiche	3 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	48

(\*) b, c o d rispettando i vincoli del CdS

**Tipologie Attività Formative (TAF)**

- b Caratterizzanti
- c Affini e Integrative
- d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

**Si riportano nel seguito ulteriori scelte consigliate, ripartite per ambito**

**Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica":** Metodi Matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1; Meccanica Statistica 1; Teoria delle Interazioni Fondamentali 1; Fisica Teorica 1

**Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia":** Fisica delle Particelle; Struttura della Materia 2; Sviluppi recenti in Fisica delle Particelle e Astroparticelle; Ottica 1; Radioattività

**Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale":** Astronomia 1; Cosmologia; Astrofisica Nucleare Relativistica 1

**Corsi Affini e integrativi (CCD Fisica):** Introduzione alla Relatività Generale; Fenomenologia del Modello Standard delle Particelle Elementari; Introduzione all'Astrofisica; Fisica Atomica

**Corsi Affini e integrativi (CCD Matematica):** Preparazione di Esperienze Didattiche 1; Preparazione di Esperienze Didattiche 2