



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO**  
**DIPARTIMENTO DI FISICA**

**GUIDA AI PERCORSI**  
**DELLA LAUREA MAGISTRALE**

**ANNO ACCADEMICO 2024/2025**

Aggiornata a maggio 2024

Il Corso di Laurea magistrale in Fisica si articola in due curricula, che lo studente sceglie contestualmente alla domanda di immatricolazione:

- curriculum specialistico focalizzato su specifici settori della Fisica quali: Acceleratori; Astrofisica; Elettronica; Fisica dei dati; Scienze e Tecnologie Quantistiche; Fisica della materia; Fisica medica e sanitaria; Fisica nucleare; Fisica delle particelle elementari; Fisica teorica; Fisica applicata (Fisica dell'ambiente, Fisica per i beni culturali);
- curriculum pluri-settoriale focalizzato su storia e didattica della Fisica con conoscenze distribuite in modo uniforme tra gli ambiti della Fisica, consigliato per l'insegnamento e la divulgazione della scienza o altre attività che richiedano competenze a largo spettro.

Come specificato in dettaglio nel Manifesto degli Studi, [https://apps.unimi.it/files/manifesti/ita\\_manifesto\\_F95of2\\_2025.pdf](https://apps.unimi.it/files/manifesti/ita_manifesto_F95of2_2025.pdf), per il conseguimento della Laurea magistrale lo studente deve acquisire 120 crediti formativi (CFU) in totale.

Per tutti i curricula e percorsi lo studente svolge le seguenti attività formative obbligatorie:

- accertamento della Lingua Inglese a livello B2 (3 CFU);
- insegnamento di Elettrodinamica Classica (6 CFU) al primo semestre;
- accertamento dell'apprendimento di Abilità informatiche e telematiche (3 CFU);
- preparazione della tesi e prova finale (36 CFU).

Nel curriculum specialistico, lo studente deve acquisire 42 CFU in insegnamenti caratterizzanti, scegliendo almeno 6 CFU in ognuno degli ambiti disciplinari "Sperimentale Applicativo", "Teorico e dei Fondamenti della Fisica", "Microfisico e della Struttura della Materia" e "Astrofisico, Geofisico e Spaziale". L'insegnamento di Elettrodinamica Classica appartiene all'ambito "Sperimentale Applicativo" e ne soddisfa la richiesta minima, rappresentando 6 dei 42 CFU qui previsti.

Lo studente deve inoltre acquisire 18 CFU scelti fra gli insegnamenti affini e integrativi.

Lo studente deve anche acquisire 12 CFU scegliendo liberamente fra tutti gli insegnamenti attivati dall'Ateneo, purché culturalmente coerenti con il suo percorso formativo e non sovrapponibili, nei contenuti, agli insegnamenti già utilizzati nel piano di studi.

Lo studente deve infine acquisire 6 CFU relativi a tirocini formativi e di orientamento tipicamente correlati con l'attività di preparazione della tesi di laurea. Il docente tutor di questa attività può essere il relatore della tesi stessa.

Nel curriculum pluri-settoriale, lo studente deve acquisire 48 CFU scegliendo 12 CFU in ognuno degli ambiti disciplinari riportati sopra. L'insegnamento di Elettrodinamica Classica appartiene all'ambito "Sperimentale Applicativo" e rappresenta 6 dei 48 CFU qui previsti.

Lo studente deve inoltre acquisire 12 CFU scelti fra gli insegnamenti affini e integrativi.

Lo studente deve anche acquisire 18 CFU scegliendo liberamente fra tutti gli insegnamenti attivati dall'Ateneo, purché culturalmente coerenti con il suo percorso formativo e non sovrapponibili, nei contenuti, agli insegnamenti già utilizzati nel piano di studi.

Questa Guida riporta vari esempi di percorsi utili ad orientare lo studente nelle sue scelte.

## **Curriculum Specialistico - Percorso di Acceleratori di Particelle e Superconduttività Applicata**

**Docenti di riferimento:** *Lucio Rossi, Massimo Sorbi*

Altri docenti: *Samuele Mariotto, Massimo Sorbi, Lucio Rossi, Stefano Sorti (e team acceleratori del Laboratorio LASA)*

Gli acceleratori di particelle (elettroni, protoni, ioni) sono uno strumento fondamentale per la ricerca nel campo della fisica delle particelle elementari (si vedano i grandi laboratori internazionali quali il CERN di Ginevra e il Fermilab negli USA).

Gli acceleratori di particelle estendono inoltre il loro dominio di applicazione a diversi altri settori, quali la produzione di radiazione di sincrotrone (laboratorio ELETTRA di Trieste), la produzione di neutroni per lo studio della struttura dei materiali, la produzione di radioisotopi a uso diagnostico, la produzione di raggi X per terapia oncologica e la cura di tumori direttamente con fasci di protoni o ioni (adroterapia, il cui centro di rilevanza mondiale in Italia è il CNAO di Pavia). A Milano esiste una notevole tradizione nel campo degli acceleratori, risalente agli anni '60, che ha portato alla costruzione di due ciclotroni, tra cui il ciclotrone superconduttore (CS) dei Laboratori Nazionali del Sud (LNS- Catania), progettato e costruito negli anni '80 nel laboratorio LASA (Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata) del Dipartimento di Fisica, sede principale delle attività sperimentali in fisica degli acceleratori a Milano. I gruppi di ricerca del LASA lavorano all'interno dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), contribuendo ad alcuni dei progetti più importanti del panorama mondiale: l'LHC del CERN, il suo successore, High Luminosity LHC e i futuri collisori come FCC (sia nella versione leptonica che in quella adronica) e il Muon Collider, sempre al CERN, X-FEL di Amburgo (D), il linac per protoni ESS (Svezia) e il futuro PIP-II del Fermilab. Inoltre il progetto PNRR "IRIS" prevede, oltre al potenziamento del LASA, anche lo sviluppo di prototipi di magneti HTS e linee superconduttive.

Il percorso di Fisica degli Acceleratori prevede una descrizione dei principi di funzionamento degli acceleratori e delle macchine acceleratrici più importanti con particolare rilievo per gli acceleratori circolari e lineari per fisica fondamentale (Fisica degli Acceleratori I). 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 (RF), e nei rivelatori per fisica delle particelle e astroparticelle. E' pertanto previsto l'insegnamento di Elementi di Superconduttività e Fisica dei Magneti ad Alto Campo, il Laboratorio di Superconduttività Applicata e il Laboratorio di Acceleratori, dedicato alle tecniche di accelerazione con cavità a radiofrequenza (RF).

Nel laboratorio LASA sono attive le seguenti linee di ricerca, in comune con l'INFN:

1. Magneti superconduttori di tipo avanzato ad alto campo con materiali innovativi (HTS) per acceleratori e collider per la Fisica delle Particelle (HiLumi LHC, FCC-Future Circular Collider, Muon Collider...), nuove configurazioni magnetiche per acceleratori e “Gantry” (guida dei fasci) per terapia oncologica con particelle (collaborazione col CNAO di Pavia e progetti Europei H2020), e per rivelatori di particelle e astro-particelle. Questa linea ha ora anche un filone di studio di superconduttività, in favore della sostenibilità con “energy saving magnets” in HTS e cavi superconduttori, in MgB<sub>2</sub> o HTS, da 1 GW (40 kA - 25 kV) per trasporto verde di energia a zero emissioni.

2. Cavità RF superconduttive per FEL (Free Electron Laser), Fisica delle alte energie (ILC, PIP-II) per acceleratori superconduttivi di protoni per Neutron Spallation Source (ESS). Si studiano e realizzano anche fotocatodi ad alta intensità e brillantezza e cavità normal-conduttive per futuri collisori come il Muon Collider.

3. Sorgenti di elettroni e di protoni con impulsi laser e studio nuovo acceleratore per generazione intensa raggi X per scopi medici e studio materiali (BriXino).

4. Studio di acceleratori innovativi al plasma (progetto EUAPS basato a Frascati).

Sono disponibili tesi o temi di ricerca di dottorato da svolgere sulle linee di ricerca attive al LASA oppure nei laboratori italiani ed esteri con i quali esistono accordi di collaborazione. La preparazione dei laureati e i temi di ricerca affrontati sono molto apprezzati nei laboratori di ricerca sugli acceleratori sia italiani che esteri (CERN, Fermilab, ecc...) nonché nelle industrie del settore.

#### I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica degli Acceleratori 1	b
Metodi Matematici della Fisica: equazioni differenziali 1 o altro insegnamento di ambito disciplinare “Teorico e dei Fondamenti della Fisica”	b	Elementi di Superconduttività e Fisica dei Magneti ad Alto Campo	b

-Laboratorio di Fisica degli Acceleratori (in anni solari dispari) -Laboratorio di Superconduttività Applicata (in anni solari pari)	b	Insegnamento a scelta tra affini e integrativi	c
Introduction to continuum physics (LM in Geophysics) (o altro insegnamento di ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale")	b	Insegnamento a scelta tra affini e integrativi	c
Abilità informatiche e telematiche	3 CFU	Insegnamento a scelta libera	d
Accertamento di lingua inglese - livello B2	3 CFU		
TOTALE CFU	33	TOTALE CFU	30

## II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
- Laboratorio di Fisica degli Acceleratori (in anni solari dispari) - Laboratorio di Superconduttività Applicata (in anni solari pari)	b	Insegnamento a scelta tra affini e integrativi o a scelta libera. Si suggerisce Fisica Nucleare	c
Insegnamento a scelta libera; vengono suggeriti: – Fisica delle Particelle - Interazione e rivelazione della radiazione nucleare	d	Tesi di laurea	36 CFU
		Tirocinio formativo obbligatorio	6 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.

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: Geometria e Gruppi 1.

Ambito “Microfisico e della Struttura della Materia”: Struttura della Materia 2, Laboratorio di Fisica dei Plasmi 1, Laboratorio di Fisica dei Laser 1, Rivelatori di Particelle, Fisica dei Plasmi e della Fusione Controllata, Fisica dei Solidi 1, Fisica dei Dispositivi Elettronici.

## Curriculum Specialistico - Percorso di Astrofisica

**Docente di riferimento:** *Marco Bersanelli*

Altri docenti: *Maria Archidiacono, Giuseppe Bertin, Davide Bianchi, Emanuele Castorina, Loris Colombo, Stefano Facchini, Cristian Franceschet, Claudio Grillo, Luigi Guzzo, Giuseppe Lodato, Marco Lombardi, Davide Maino, Aniello Mennella, Giovanni Rosotti, Maurizio Tomasi*

Sito web: <http://astro.fisica.unimi.it>

L'astrofisica si propone di comprendere i fenomeni fisici che osserviamo nel cosmo, e, in ultima istanza, rispondere alle domande fondamentali sull'origine e il destino dell'Universo. Allo stesso tempo, l'Universo rappresenta di fatto un enorme laboratorio in cui testare le teorie fisiche, spesso in condizioni non ottenibili convenzionalmente. Questi studi richiedono competenze che spaziano pertanto dall'idrodinamica e fisica dei plasmi alla Relatività Speciale e Generale, alla fisica delle particelle elementari e più in generale alla fisica teorica. Il contributo degli studi astrofisici e cosmologici è complementare a quanto si possa fare in laboratorio o negli acceleratori di particelle nel rispondere a domande fondamentali quali: *“Da quali particelle è costituita l'inafferrabile materia oscura? Quanto misura la massa dei neutrini? A cosa è dovuta l'accelerazione dell'espansione cosmica che oggi osserviamo? Cosa sappiamo del meccanismo dell'inflazione cosmologica? Quali sono le condizioni fisiche nelle stelle di neutroni e nei buchi neri, le cui fusioni osserviamo oggi grazie alle onde gravitazionali?”* Accanto a queste, l'astrofisica si trova inoltre oggi in grado di affrontare domande altrettanto fondamentali sul ruolo dell'uomo nell'Universo: *“Come hanno avuto origine e come evolvono le galassie e i sistemi di stelle? Come si sono formate la Terra e i pianeti che oggi possiamo stimare siano centinaia di miliardi nella sola Galassia?”* E quindi, inevitabilmente: *“Siamo soli nell'Universo?”*

Una tale varietà di problematiche scientifiche (e non solo) richiede uno spettro estremamente ampio di competenze. Il Percorso Astrofisico della Laurea Magistrale offre la possibilità di indirizzarsi lungo questi filoni in cui i docenti del Dipartimento sono protagonisti, garantendo allo stesso tempo una formazione di fisica di base ampia e bilanciata, che spazia dall'ambito sperimentale, all'analisi dei dati, ai fondamenti teorici.

In seguito viene data una descrizione generale della proposta didattica. Gli studenti interessati a impostare un percorso in ambito astrofisico, qualora lo desiderassero, sono incoraggiati a contattare i docenti dei corsi per un aiuto a individuare il piano di studi più indicato per valorizzare e approfondire i propri interessi.

Gli insegnamenti generali concentrati nel primo anno puntano ad ampliare le conoscenze di fisica e matematica, accrescendo in parallelo quelle in ambito astrofisico, sia teoriche sia sperimentali: oltre all'insegnamento obbligatorio di *Elettrodinamica Classica*, è fortemente

consigliata, per coloro che desiderino indirizzarsi verso l'ambito relativistico/cosmologico, la frequenza di *Introduzione alla Relatività Generale*; a questi possono essere affiancati insegnamenti astrofisici introduttivi tra cui *Astrofisica Generale 1*, *Astrofisica Generale 2* e *Astrofisica Extragalattica*, oltre ad un insegnamento di Laboratorio. La scelta va fatta rispettando i vincoli prescritti dal Regolamento della Laurea Magistrale nel bilanciare insegnamenti caratterizzanti e affini/integrativi: tra i caratterizzanti, deve apparire almeno un insegnamento di ambito "Microfisico e della Struttura della Materia".

Gli insegnamenti caratterizzanti dell'ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale" (tutti da 6 CFU) sono: *Astrofisica Extragalattica*, *Astrofisica Generale 1*, *Radioastronomia 1*, *Dinamica delle galassie*, *Astrofisica Generale 2*, *Cosmologia 1*, *Fisica dell'Atmosfera*, *Tectonophysics*, *Dinamica dei Fluidi in Astrofisica*, *Astrofisica Nucleare Relativistica 1*, *Introduction to continuum physics*, *Physics of the Hydrosphere and the Cryosphere* (questi ultimi due mutuati dalla LM in Geophysics).

Gli insegnamenti affini e integrativi di ambito Astrofisico (FIS/05) sono: *Cosmologia 2*, *Fisica Gravitazionale Avanzata*, *Processi Radiativi in Astrofisica*, *Laboratorio di Strumentazione Spaziale 1*, *Radioastronomia 2*, *Formation of Stars and Planets* (quest'ultimo mutuato dalla LM in Geophysics).

L'inizio del lavoro tesi può essere 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 introdurrà lo studente al mondo della ricerca e sarà occasione di collaborazione con gruppi (teorici, sperimentali, o osservativi) anche al di fuori dell'Università (come ad es. INAF e INFN, o istituti stranieri).

#### I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Insegnamento di ambito Microfisico e della Struttura della Materia	b (*)
Astrofisica Generale 1	b	Un laboratorio (ad es. Laboratorio di Strumentazione Spaziale 1)	c

Insegnamento a scelta tra: Metodi Matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1 oppure altro di ambito teorico	b	Insegnamento a scelta	d (*)
Abilità informatiche e telematiche	3 CFU	Insegnamento a scelta	b
Accertamento di lingua inglese - livello B2	3 CFU	Insegnamento a scelta	c (*)
Insegnamento a scelta	b (*)		
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

## II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Tesi di Laurea	12 CFU	Tesi di Laurea	24 CFU
Insegnamento a scelta	c (*)	Insegnamento a scelta	d (*)
Insegnamento a scelta	b (*)	Tirocinio formativo obbligatorio	6 CFU
TOTALE CFU	24	TOTALE CFU	36

(\*) 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 gli insegnamenti a scelta, oltre a tutti quelli legati al Settore Scientifico Disciplinare FIS/05: (si veda la lista sopra) sono consigliati in particolare insegnamenti relativi alla fisica dei continui, fisica dei plasmi, idrodinamica, relatività generale, simulazioni numeriche, metodologie di analisi dati, ottica.

## **Curriculum Specialistico - Percorso di Elettronica**

**Docente di riferimento:** *Alberto Stabile*

Altri docenti: *S. Capra, M. Lazzaroni, V. Liberali, 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.

Il percorso elettronico della Laurea in Fisica ha preparato centinaia di professionisti, docenti e ricercatori per i quali il sistema industriale lombardo è stato il principale soggetto di reclutamento. In numerosi casi, questi laureati hanno sviluppato carriere di successo al di fuori di questo contesto, contribuendo a centri di ricerca nazionali ed internazionali, università ed aziende al di là dei confini regionali.

Gli sbocchi professionali della figura dei fisici-elettronici registrano punte di assorbimento particolarmente elevate nell'industria dei componenti elettronici, nel settore aerospaziale e nel settore bio-medico.

La Laurea Magistrale prepara gli studenti per la progettazione e lo sviluppo avanzato di circuiti analogici e digitali, sistemi elettronici e strumentazione, offrendo una visione aggiornata delle tecnologie integrate. La formazione approfondisce gli aspetti fondamentali dell'elettronica, della strumentazione e delle tecnologie elettroniche, con un focus sulle applicazioni pratiche attraverso l'esperienza di tesi. Le competenze sperimentali sono acquisite attraverso corsi di laboratorio dedicati all'elettronica analogica e ai 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 (INFN), 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 e memorie 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 lo studio dell'affidabilità e per il collaudo di apparati 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, la bioinformatica (sistemi per riconoscimento di pattern genomici).

Nelle sedi esterne i campi di prevalente interesse su cui svolgere tesi di laurea sono quelli delle applicazioni aerospaziali, biomediche 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.

Un esempio di piano di studi è riportato nella successiva tabella.

#### I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Elettronica 2	b
Elettronica 1 o Elettronica dei Sistemi Digitali	b	Elettronica Nucleare (attivato ad anni alterni)	b (*)
Laboratorio di Elettronica o Elettronica dei Sistemi Digitali	b	Fisica dei Dispositivi Elettronici	c
Insegnamento a scelta di ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica"	b	Laboratorio di Strumentazione per i Rivelatori di Particelle	c
Insegnamento a scelta di ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale"	b	Insegnamento a scelta	d
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

#### II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Tirocinio formativo obbligatorio		Tesi di laurea	
Abilità informatiche e telematiche			
Accertamento di lingua inglese - livello B2			

Fondamenti di Energetica	c		
Insegnamento a scelta	d		
TOTALE CFU	24		36

(\*) insegnamento erogato ad anni alterni

Tipologie Attività Formative (TAF):

b Caratterizzanti

c Affini e integrative

d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

## Curriculum Specialistico - Percorso di Fisica dei dati

**Docente di riferimento:** Guido Tiana

Altri docenti: *S. Carrazza, M. Cosentino Lagomarsino, D. Galli, M. Lombardi, D. Tamascelli, S. Zapperi*

sito web: <https://sites.unimi.it/dataphysics/>

La Fisica, così come altre discipline scientifiche, produce dati sempre più abbondanti e complessi. Le tecniche classiche di analisi dei dati diventano sempre più inadatte ai nuovi scenari che investono tutti i campi della Fisica, dalla Fisica delle alte energie alla Biofisica, dall'Astrofisica alla Fisica dei materiali, sconfinando poi in tutti gli altri campi della scienza [J. Byers, *The Physics of Data*, Nature 2017]. Il percorso punta a sviluppare nello studente le capacità modellistiche e interpretative che caratterizzano l'approccio della Fisica, anche nelle sue applicazioni interdisciplinari. Gli studenti da un lato apprenderanno competenze specifiche della Fisica, dall'altro acquisiranno gli strumenti che caratterizzano l'analisi dati moderna. Una parte importante di questo percorso è la capacità di implementare sul computer le tecniche apprese, e quindi il percorso punta al "teaching by supervision", dove gli studenti devono affrontare e portare a termine progetti individuali ed esercizi *hands-on*. Gli sbocchi sono molteplici. Uno studente con una preparazione di questo genere trova una collocazione naturale nella ricerca, sia dentro che fuori l'accademia. Inoltre, l'approccio modellistico della Fisica offre strumenti interpretativi fondamentali per orientarsi nei dati di qualunque natura, rendendo lo studente una preziosa risorsa in campo industriale e dei servizi avanzati [Sole24ore, 2017].

Gli insegnamenti suggeriti per questo percorso sono:

### I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Elettrodinamica classica	b	Laboratorio di modellizzazione dati	b
Probabilità e statistica	b	Fisica statistica dei sistemi complessi	b

Strutture dati e algoritmi per la fisica dei dati	b	Fisica statistica avanzata	b
Machine learning con applicazioni	b	Processi stocastici	c
Abilità informatiche e telematiche			
Accertamento lingua inglese B2			

## II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Insegnamento a scelta	c	Deep learning con applicazioni	c
Insegnamento a scelta	d	Tesi di laurea	
Insegnamento a scelta	d	Tirocinio formativo obbligatorio	

Tre insegnamenti del secondo anno sono a scelta dello studente, purché almeno uno scelto tra quelli “affini ed integrativi” (tipologia ‘c’). Consigliamo comunque agli studenti con particolari interessi in specifici campi della Fisica alcune possibili scelte per questi tre insegnamenti, in modo da avere una base riguardo alla fenomenologia dello specifico interesse di studio:

INTERESSE	INSEGNAMENTI
Biofisica	Fisica delle proteine (b, 1sem)

	Simulazioni di materia condensata e biosistemi (c, 2 sem)
	Biofisica (c, 1sem)
Alte energie	Interazioni elettrodeboli (b, 1sem)
	Fisica delle particelle (b, 1sem) oppure Fisica Astroparticellare (b, 1sem)
	Fenomenologia del Modello Standard (c, 2sem)
Astrofisica	Astrofisica Generale 1 (b, 1sem) ed eventualmente Astrofisica Generale 2 (b, 2sem)
	Introduzione all'Astrofisica (c, 1sem)
	Introduzione alla Relatività Generale (c, 2sem)
Atmosfera e ambiente	Fisica dell'ambiente (b, 1sem)
	Introduction to continuum physics (LM in Geophysics) (b, 1sem)
	Laboratorio di climatologia e fisica dell'atmosfera (c, 1sem anni alterni) o Physics of the hydrosphere and the cryosphere (1sem, c- mutuato da LM geophysics)
Quantum information & technology	Teoria quantistica dell'informazione (c, 2sem)
	Teoria quantistica della computazione (c, 1sem)
	Coerenza e controllo dei sistemi quantistici (b, 1sem)
Fisica nucleare	Fisica Nucleare (b, 2 sem)
	Interazione e rivelazione della radiazione nucleare (b, 1sem)
	Laboratorio di strumentazione per i rivelatori di particelle (c, 2sem)
Fisica medica e sanitaria	Fisica Sanitaria (b, 1sem)
	Tecniche Fisiche di Diagnostica Medica (c, 2sem)
	Tecniche di Imaging per Applicazioni Biomediche (c, 1sem)
Fisica dei solidi	Fisica dei Solidi 1 (b, 2sem)
	Struttura della Materia 2 (b, 1sem)
	Laboratorio di Fisica della Materia 2 (c, 2sem)
Fisica dei solidi (ottica)	Fisica Atomica (c, 1sem)

	Ottica 1 (b, 2sem)
	Laboratorio di Fisica dei Laser 1 (b, 2sem) o Laboratorio di Ottica ed Applicazioni (1sem)
Fisica dei solidi (nanostrutture)	Fisica delle Superfici 1 (b, 1sem)
	Proprietà Magnetiche e Analisi Fine della Materia a Bassa Dimensionalità (b, 1sem)
	Caratterizzazione di Nanostrutture e Film Sottili (c, 1sem) oppure Fisica delle Nanoparticelle (c, 2sem)
Fisica dei plasmi	Fisica dei Plasmi e della Fusione Controllata (b, 2sem)
	Laboratorio di Fisica dei Plasmi (b, 2sem)
	Sistemi dinamici 1 (c, 2sem) oppure Fondamenti di energetica (c, 1sem) oppure Sistemi Hamiltoniani e teoria delle perturbazioni (c, 1sem)
Fisica teorica	Metodi computazionali della fisica (c, 2sem)
	Introduzione alla relatività generale (c, 1sem)
	Sistemi Hamiltoniani e teoria delle perturbazioni (c, 1sem)

## Curriculum Specialistico - Percorso di Fisica della Materia

**Docente di riferimento:** *Francesca Baletto*

**Sistemi complessi e biofisica [SCB]** (*S. Bonfanti, M. Carpineti, M. Cosentino-Lagomarsino, M. Gherardi, D. Pini, G. Tiana, A. Vailati, K. Woo Jin, A. Zaccone, S. Zapperi*)

**Sistemi nanostrutturati e caratterizzazione avanzate [SNC]** (*P. Arosio, F. Borghi, M. Di Vece, A. Falqui, A. Giugni, P. Milani, P. Piseri, A. Podestà, F. Orsini, G. Rossi*)

**Ottica e Plasmi [OP]** (*S. Cialdi, G. Maero, B. Paroli, V. Petrillo, M. Potenza, M. Romé, M. Siano*)

**Modelling & Teoria [MT]** (*S. Achilli, F. Baletto, G. Fratesi, R. Guerra, D. Galli, N. Manini, G. Onida*)

La fisica della materia è la scienza dentro *ogni* tecnologia, e responsabile di ogni fenomeno solito o insolito che ci circonda. La materia siamo noi! Questo percorso offre quindi la risposta alle continue sfide che la società odierna ci pone e a cui voi, come fisici futuri, siete chiamati a contribuire. In fisica della materia, lo sviluppo di un esperimento, l'osservazione, e lo sviluppo di un modello hanno un ruolo sinergico e il loro legame è molto più forte che in altri campi della fisica. Partendo dall'osservazione, arrivando a metodi di machine learning e artificial intelligence, la fisica della materia insegna a *disegnare* nuovi materiali con specifiche proprietà per la desiderata applicazione nel mondo della tecnologia e dell'industria. Lo studente con una preparazione in fisica della materia trova una collocazione naturale nella ricerca, sia dentro che fuori l'accademia. Inoltre, acquisisce competenze facilmente trasferibili ad altri campi quali l'economia, la finanza, le scienze della vita, la biologia, l'elettronica, la progettazione di computer neuromorfici e come software engineering. Gli insegnamenti e soprattutto le tesi offerte in questo ambito permettono di acquisire una visione completa e concreta di come svolgere un tema di ricerca: dalla sua idealizzazione alla sua realizzazione.

Gli ambiti di esperienza che offriamo comprendono lo studio teorico, computazionale, e sperimentale di vari sistemi: da fluidi complessi, sia classici che quantistici; plasmi e tecnologie avanzate per il loro confinamento e la fusione termonucleare controllata; sorgenti avanzate di radiazione, ad esempio basate su fasci di elettroni ad alta brillantezza; materia soffice; materiali disordinati; transizioni di fase nei materiali; problemi di inferenza e di machine learning; sistemi biologici ed ecologici; alla realizzazione e caratterizzazione di dispositivi per la sensoristica; elettronica non-convenzionale; spintronica; conversione e accumulazione di energia (fotovoltaico, supercapacitori, nanocatalizzatori) e dispositivi per

il biomedicale (sistemi di analisi per la genomica e la proteomica, materiali polimerici e nanocompositi).

La ricerca che proponiamo è rivolta allo studio delle proprietà elettroniche, strutturali, vibrazionali, meccaniche, catalitiche, ottiche e magnetiche di sistemi a bassa dimensionalità (superfici, materiali 2D, nanofili, nanotubi, nanoparticelle, sistemi nanostrutturati e nanoassemblati), sia alle proprietà dinamiche e ai fenomeni collettivi di coerenza che si sviluppano nelle fasi eccitate (ottica e plasmi) e alle loro applicazioni in altri ambiti (acceleratori, fusione, antimateria e loro diagnostiche), fino alla dinamica di sistemi complessi (materiali disordinati, metamateriali, plasmi, fluidi e sistemi complessi con applicazioni alla biologia ed ecologia, informatica, sociologia, economia). Questi ultimi presentano un comportamento emergente, con dinamiche non lineari, peculiari correlazioni spazio-temporali, e fenomeni a multi-scala. Si sottolinea il vantaggio dell'uso dei sistemi complessi e della fisica statistica in un contesto interdisciplinare in quanto essi forniscono un linguaggio e una metodologia comuni che possono essere applicati a diversi campi di studio. Tutti i docenti afferenti a questo indirizzo partecipano a collaborazioni nazionali e internazionali contribuendo fortemente alla ricerca di base in fisica della materia in tutte le sue diverse applicazioni. La ricchezza della nostra offerta è per soddisfare ogni interesse e per supportare vari percorsi di formazione e prepararvi sia al mondo del lavoro che della ricerca.

Tutti i docenti afferenti a questo indirizzo sono disponibili ad aiutarvi a creare al meglio il vostro piano di studi suggerendo anche soluzioni *ad hoc* relative alla tesi di laurea scelta, ma non esclusive. Le tabelle sottostanti definiscono un sottogruppo dei corsi caratterizzanti e affini altamente suggeriti. Tabella 1 e Tabella 2 raccolgono una selezione degli insegnamenti come da Manifesto degli Studi caratterizzanti (tipo B, suddivisi per Ambiti) e affini (tipo C), rispettivamente. In tabella, indichiamo il docente responsabile, il semestre di svolgimento e la macroarea di ricerca (ALL se suggerito per tutti gli indirizzi). L'inserimento nel piano di studi di *Elettrodinamica Classica* (Ambito "Sperimentale Applicativo") è obbligatorio come per ogni percorso e soddisfa il requisito minimo di crediti in Ambito "Sperimentale Applicativo". Consigliamo che il totale dei CFU nell'ambito di "Struttura della Materia" fra affini e caratterizzanti sia **almeno 36**, di cui **almeno tre affini** dalla Tabella 2.

**Tabella 1: Insegnamenti caratterizzanti** - tipologia "B" - e docente responsabile.

AMBITO	INSEGNAMENTO	SEMESTRE; AREA DI RICERCA	DOCENTE
Sperimentale Applicativo	Strutture dati e algoritmi per la fisica dei dati	1; SCB	Tamascelli
	Applicazioni modellistiche per la fisica dell'ambiente e per i beni culturali	2; MT	Bernardoni
	Elettronica 1	1; SNC, OP	Liberali

	Analisi ottiche per beni culturali	1; SNC, OP	Ludwig
	Laboratorio di Elettronica (attivato ad anni alterni – non attivato nel 24/25)	1; SNC, OP	Pullia
	Fisica degli acceleratori 1	1; OP	L. Rossi
Teorico e dei Fondamenti della Fisica	Meccanica statistica 1	1; ALL	Zapperi
	Metodi matematici della fisica: geometria e gruppi 1	1; ALL	Zaccone
	Metodi matematici della fisica: equazioni differenziali 1	1; ALL	Klemm
	Fisica statistica dei sistemi complessi	1; ALL	Lagomarsino
	Teoria dei sistemi a molti corpi 1	1; SCB, MT, SNC	Molinari
	Teoria dei sistemi a molti corpi 2	1; SNC	Molinari
Astrofisico, Geofisico e Spaziale	Introduction to continuum physics	1; ALL	Maero
	Laboratorio di modellizzazione dati	2; SCB	Lombardi
	Fisica dell'atmosfera	2; SNC, SCB, OP	Maugeri
	Dinamica dei fluidi in astrofisica	1; OP	Lodato
	Dinamica delle galassie	2; OP	Bertin
	Radioastronomia 1	1; OP	Mennella
	Physics of the Hydrosphere and the Cryosphere (Mutuato da LM geophysics)	1; SNC	Giudici
Microfisico e Struttura della Materia	Fisica delle superfici 1	1; SCB, SNC; MT	Onida
	Machine learning con applicazioni	1; SCB, MT	Barbieri
	Struttura elettronica	1; MT, SCB	Fratesi
	Struttura della materia 2	1; SNC, OP	Castelli
	Fisica delle proteine 1	1; SCB; SNC	Tiana
	Fisica dei solidi 1	2; SCB, MT, SNC	Manini
	Fisica dello stato solido su nanoscala	2; SNC, MT, OP	Di Vece
	Fisica statistica avanzata	2; OP, SCB	Galli
	Ottica 1	2; OP, SNC	Petrillo

	Laboratorio di ottica ed applicazioni	1; OP	Potenza
	Fisica dei plasmi e della fusione controllata	1; OP	Romé
	Laboratorio di fisica dei plasmi 1	2; OP	Maero
	Fisica dei dispositivi elettronici	2; SNC	Perego
	Fisica dei semiconduttori (attivato ad anni alterni - attivato nel 24/25)	1; SNC	De Bernardi
	Laboratorio di fisica dei laser 1	2; OP	Cialdi

**Tabella 2: Insegnamenti affini e integrativi - tipologia “C” - e docente responsabile.**

INSEGNAMENTO	SEMESTRE; DI RICERCA	AREA	DOCENTE
Caratterizzazione di nanostrutture e film sottili	1; SNC, OP		Podestà
Simulazioni di materia condensata e biosistemi	1; SCB, MT		Guerra
Fisica atomica	1; OP		Piovella
Biofisica	1; SCB, MT		Tiana
Fisica delle nanoparticelle	2; SCB, MT, SNC		Baletto
Laboratorio di fisica della materia 2	2; SNC, MT, OP		Piseri
Laboratorio di simulazione numerica	2; MT, SCB, OP		Galli
Fisica dei liquidi e della materia soffice	2; SCB, MT		Pini
Fondamenti di microscopia elettronica e spettroscopie associate	2; SNC, MT, OP		Falqui
Processi stocastici	2; SCB		Tiana
Principi fisici ed applicazioni delle tecniche di risonanza magnetica nucleare	2; SNC, SCB		Arosio
Ottica non lineare e fotonica quantistica	2; OP		Castelli
Proprietà Magnetiche e Analisi Fine della Materia a Bassa Dimensionalità	1; SNC		G. Rossi
Elettronica dei sistemi digitali	2; SNC		Riboldi
Metodi computazionali della fisica	2; SCB		Vicini
Fondamenti di energetica	1; OP		Alimonti
Rivelatori di particelle	2; OP		Carminati

Sistemi hamiltoniani e teoria delle perturbazioni	1; OP	Carati
Sistemi dinamici 1	2; OP	Paleari
Laboratorio di simulazione numerica	2; OP	Galli

Essendo un percorso multidisciplinare, lo studente può anche beneficiare di corsi offerti in altri corsi di laurea Magistrale. Per questo consigliamo vivamente allo studente di contattare i docenti nella macroarea considerata per ulteriori informazioni.

La tabella sottostante propone un esempio indicativo di suddivisione per anno in modo da avere dei mesi dedicati al tirocinio formativo obbligatorio e alla tesi.

#### PRIMO ANNO

PRIMO SEMESTRE	Tipologia - CFU	SECONDO SEMESTRE	Tipologia
Elettrodinamica classica	B - 6	Fisica dello stato solido su nanoscala Fisica dei solidi 1	B - 6
Abilità informatiche e telematiche	NA - 3	Fisica delle nanoparticelle Fisica dei liquidi e della materia soffice	C - 6
Accertamento di lingua inglese - livello B2	NA - 3	Laboratorio di simulazione numerica Laboratorio di fisica della materia 2 Laboratorio di fisica dei plasmi 1 Fondamenti di microscopia elettronica e spettroscopie associate	C - 6
Insegnamento Ambito Teorico – vedi tabella 1	B - 6	Ottica Fisica statistica avanzata	B - 6

Insegnamento Astro/Geo/Spa – vedi tabella 1	Ambito B - 6	A scelta	D-6
Fisica delle superfici 1  Laboratorio di ottica ed applicazioni  Struttura elettronica  Fisica statistica avanzata	B - 6		
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

## SECONDO ANNO

PRIMO SEMESTRE	Tipologia - CFU	SECONDO SEMESTRE	Tipologia
Struttura elettronica  Machine learning con applicazioni  Teorico (b)	B - 6	TIROCINIO FORMATIVO OBBLIGATORIO	NA- 6
Caratterizzazione di nanostrutture e film sottili  Simulazioni di materia condensata e biosistemi	C - 6	TESI DI LAUREA	NA-36
A scelta	D-6		
TOTALE CFU	18	TOTALE CFU	42

## Curriculum Specialistico - Percorso di Scienza e Tecnologie Quantistiche

**Docente di riferimento:** *Matteo Paris*

Altri docenti: *Claudia Benedetti, Fabrizio Castelli, Simone Cialdi, Alessandro Ferraro, Marco Genoni, Stefano Olivares, Nicola Piovella, Enrico Prati, Andrea Smirne, Dario Tamascelli, Bassano Vacchini*

Il percorso è dedicato allo studio dei sistemi quantistici a bassa energia nei suoi risvolti fondamentali e applicativi, con particolare enfasi all'interazione radiazione/materia ed ai fenomeni di coerenza quantistica. L'offerta formativa include insegnamenti di base sui sistemi costituiti da atomi e fotoni, insegnamenti di meccanica quantistica avanzata, e insegnamenti su argomenti alla frontiera della ricerca, tra cui i condensati atomici, i sistemi opto-meccanici, i sistemi quantistici aperti, i quantum walks e le tecnologie quantistiche, ovvero le applicazioni della meccanica quantistica a nuovi sistemi computazionali e a nuovi protocolli di misura e di trasmissione dell'informazione. Lo studente potrà avvicinarsi a tematiche teoriche e sperimentali scegliendo tra gli insegnamenti consigliati e impegnandosi nel lavoro di tesi. La ricerca del gruppo punta a risolvere problemi di fondamento con inaspettate applicazioni tecnologiche ed a formare una nuova generazione di ricercatori che possano sfruttare le proprietà quantistiche di radiazione e materia nella trasmissione e manipolazione dell'informazione. 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 e quantum computing, la fisica e la tecnologia dei laser, le comunicazioni e la crittografia quantistiche e la metrologia. Lo schema di insegnamenti che segue è puramente indicativo.

Gli insegnamenti consigliati e di interesse per il percorso sono i seguenti: Coerenza e controllo dei sistemi quantistici, Fondamenti della meccanica quantistica, Fisica Atomica, Laboratorio di fisica dei laser, Laboratorio di ottica quantistica, Ottica non lineare e fotonica quantistica, Ottica quantistica, Quantum walks, Struttura della materia 2, Strutture dati e algoritmi per la fisica dei dati, Teoria dei sistemi quantistici aperti, Teoria quantistica dell'informazione, Teoria quantistica della computazione.

Qui di seguito riportiamo un esempio guidato per la creazione di un piano di studio che copra le diverse tematiche trattate nel percorso. Gli studenti sono comunque caldamente invitati a contattare il referente e/o gli altri docenti per discutere piani di studio alternativi e/o diversamente articolati. GRUPPO 1 e GRUPPO 2 sono definiti subito dopo la tabella.

I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
----------------	-----------	------------------	-----------

Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Teoria quantistica dell'informazione	b
Teoria dei sistemi quantistici aperti	b	Un insegnamento a scelta dal <b>GRUPPO 2</b>	c
Un insegnamento a scelta dal <b>GRUPPO 1</b>	b	Un insegnamento a scelta dal <b>GRUPPO 2</b>	c
Un insegnamento a scelta dal <b>GRUPPO 1</b>	b	Un insegnamento di ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale"	b
Abilità informatiche e telematiche	3 CFU		
Accertamento di lingua inglese - livello B2	3 CFU		
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	24

## II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Un insegnamento a scelta dal <b>GRUPPO 1</b>	b	Tirocinio formativo obbligatorio	6 CFU
Un insegnamento a scelta dal <b>GRUPPO 1</b>	d	Tesi di laurea	36 CFU
Un insegnamento a scelta dal <b>GRUPPO 1</b>	d		
Un insegnamento a scelta dal <b>GRUPPO 1</b>	d		
TOTALE CFU	24	TOTALE CFU	42

### **GRUPPO 1 (insegnamenti erogati nel PRIMO SEMESTRE)**

- Coerenza e controllo dei sistemi quantistici (b/d)
- Fisica atomica (c/d)
- Laboratorio di ottica quantistica (b/d)
- Ottica quantistica (b/d)
- Strutture dati e algoritmi per la fisica dei dati (b/d)
- Struttura della materia 2 (b/d)
- Teoria quantistica della computazione (c/d)

### **GRUPPO 2 (insegnamenti erogati nel SECONDO SEMESTRE)**

- Fondamenti della meccanica quantistica (c/d)
- Ottica non lineare e fotonica quantistica (c/d)
- Quantum walks (c/d)
- Laboratorio di fisica dei laser (b/d) - *per inserire questo insegnamento nel Percorso di Scienza e Tecnologie Quantistiche seguendo l'esempio guidato è necessario scegliere almeno un insegnamento "affine e integrativo" (tipo c) dal GRUPPO 1.*

Tipologie Attività Formative (TAF):

b Caratterizzanti

c Affini e integrative

d A scelta tra tutti quelli di Ateneo (culturalmente compatibili)

## **Curriculum Specialistico - Percorso di Fisica delle Particelle e delle Astroparticelle**

**Docente di riferimento:** *M. Fanti*

Altri docenti:

*Fisica delle Particelle: A. Andreazza, L. Carminati, L. Dell'Asta, S. D'Auria, N. Neri, F. Ragusa, L. Rossi, M. Sorbi.*

*Fisica Astroparticellare: D. D'Angelo, L. Miramonti, A. Re, B. Caccianiga (INFN), L. Caccianiga (INFN), M. Giammarchi (INFN).*

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 quark chiamata "Modello Standard", la cui simmetria è rotta spontaneamente mediante il meccanismo di Higgs. La recente scoperta del bosone di Higgs costituisce la conferma finale di questa teoria, e nello stesso tempo fornisce un'ulteriore sonda per esplorare nuovi fenomeni nella fisica delle particelle elementari. Allo stesso tempo, altri fenomeni, quali le oscillazioni dei neutrini, l'asimmetria fra materia e antimateria nell'Universo, l'evidenza astrofisica della materia oscura, suggeriscono che il Modello Standard non sia in grado di descrivere tutti i fenomeni fondamentali, e sia piuttosto una teoria "efficace", ovvero una manifestazione osservabile alle energie attualmente esplorate di una teoria più fondamentale. Ad oggi diverse teorie che estendono il Modello Standard sono state proposte: un'attenta indagine sperimentale, sia mediante misure di precisione che ricerche di nuovi fenomeni, è di cruciale importanza per indirizzare gli sviluppi teorici in questo senso.

Il Dipartimento di Fisica, in stretta collaborazione con l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), è impegnato in numerose collaborazioni internazionali, sia all'anello di collisioni LHC del CERN che in diversi esperimenti astroparticellari. Tra le numerose attività di ricerca menzioniamo le misure di precisione sul Modello Standard e sul bosone di Higgs, la fisica dei neutrini, la ricerca di particelle supersimmetriche e di materia oscura, la violazione di CP, lo studio dei raggi cosmici ad altissima energia. Possiamo quindi offrire agli studenti una vasta scelta di insegnamenti in questi ambiti, nonché l'opportunità di svolgere tesi sperimentali con possibilità di lavorare in contatto con la ricerca di punta, e con laboratori di ricerca nazionali e internazionali.

Qualche considerazione sugli sbocchi occupazionali: per studenti interessati alla possibilità di proseguire la carriera in ambito accademico, eventualmente con un dottorato di ricerca, gli Enti di riferimento sono: le università (italiane o estere); l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare; istituzioni internazionali che svolgono ricerca in fisica delle particelle elementari, per esempio il CERN; altri enti di ricerca pubblici, qualora ci si sposti su settori di ricerca

diversi dalla Fisica delle Particelle. In ogni caso, in questo percorso, gli studenti acquisiscono solide competenze che spaziano dall'elaborazione statistica dei dati alla formulazione di modelli matematici predittivi e verificabili, e/o conoscenze tecnologiche approfondite in settori quali la microelettronica e la meccanica di precisione; in tutti i casi acquisendo attitudine a lavorare all'interno di grossi gruppi internazionali, con una professionalità molto apprezzata anche nelle aziende e in altri ambienti non accademici.

Insegnamenti fortemente consigliati:

#### I 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
Insegnamento di ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica" o "Astrofisico, Geofisico e Spaziale"	b	Insegnamento di ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica" o "Astrofisico, Geofisico e Spaziale"	b
Abilità informatiche e telematiche	3 CFU	Corso a scelta libera	(*)
Accertamento di lingua inglese – livello B2	3 CFU		
TOTALE CFU	30	TOTALE CFU	30

#### II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Laboratorio di Fisica delle Particelle	c	Tesi di Laurea	36 CFU

Fisica Astroparticellare	b	Tirocinio formativo obbligatorio	6 CFU
Insegnamento a scelta libera	(*)		
TOTALE CFU	18	TOTALE CFU	42

Tipologie Attività Formative (TAF):

b Caratterizzanti

c Affini e integrative

(\*) A scelta tra tutti quelli dell'Ateneo (culturalmente compatibili)

Si riportano inoltre ulteriori insegnamenti, che ogni studente potrà scegliere sulla base del proprio orientamento e dei propri interessi personali:

Ambito “Teorico e dei Fondamenti della Fisica”: Teoria delle Interazioni Fondamentali 1, Metodi Matematici della Fisica: Geometria e Gruppi 1, Fisica Teorica 1

Ambito “Astrofisico, Geofisico e Spaziale”: Astrofisica generale 1, Astrofisica Nucleare Relativistica 1, Cosmologia 1, Dinamica delle galassie

Ambito “Sperimentale applicativo”: Elettronica 1, Fisica degli Acceleratori 1

Ambito “Microfisico e della Struttura della Materia”: Elettronica Nucleare (attivato ad anni alterni).

Affini e integrativi: Elettronica dei Sistemi Digitali, Metodologie di Analisi Dati, Deep Learning con applicazioni, Introduzione alla Relatività Generale

## Curriculum Specialistico - Percorso di Fisica Medica e Sanitaria

**Docenti di riferimento:** *Ivan Veronese, Flavia Groppi*

Altri docenti: *Cristina Lenardi, Paolo Arosio, Francesco Orsini, Emanuele Pignoli, Alberto Torresin*

La Fisica Medica e Sanitaria riguarda l'applicazione di metodologie fisiche, sperimentali e teoriche, alla medicina e alla salute dell'uomo e dell'ambiente. La Fisica Medica e Sanitaria si rivolge all'impiego delle radiazioni ionizzanti e non ionizzanti sia in diagnostica che in terapia, con riferimento a tematiche di dosimetria, di radioprotezione, di radioterapia, di radiobiologia, di radiochimica. Ambiti di formazione e ricerca inerenti al percorso in Fisica Medica e Sanitaria sono ad esempio la risonanza magnetica nucleare (NMR) e la sua applicazione nell'ambito dell'imaging (MRI), lo sviluppo di nuovi materiali per applicazioni dosimetriche, lo studio di nanomateriali per applicazioni teranostiche, la produzione di radionuclidi per applicazioni in medicina nucleare (diagnostica, radioterapia metabolica e teranostica), gli studi legati all'impatto delle nanoparticelle sulla salute dell'uomo (nanosafety), lo sviluppo e la caratterizzazione di rivelatori di radiazioni e acceleratori di ultima generazione in stretta collaborazione con l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Recentemente la Fisica Medica e Sanitaria ha inoltre contribuito allo sviluppo e all'utilizzo di algoritmi di intelligenza artificiale (AI) e *machine learning* in ambito medico.

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

- accedere al Dottorato di Ricerca,
- accedere alla Scuola di Specializzazione in Fisica Medica (<https://ssfm.fisica.unimi.it/>) (che richiede come requisito fondamentale di accesso la Laurea Magistrale in Fisica) per svolgere la professione di Fisico Medico presso Strutture Sanitarie,
- accedere ad attività ad alta professionalità in ambito industriale, in Agenzie per la protezione e il controllo ambientale, in Istituti di Ricerca,
- accedere alla libera professione (si veda Federazione Nazionale degli Ordini dei Chimici e dei Fisici (<https://www.chimicifisici.it>)).
- accedere alla libera professione di Esperto di Radioprotezione secondo la nuova normativa DI 101/2020.

### Tabella degli insegnamenti consigliati:

I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
----------------	-----------	------------------	-----------

Elettrodinamica Classica <sup>1</sup>	b	Principi fisici ed applicazioni delle tecniche di risonanza magnetica nucleare	c
Meccanica Statistica 1 <sup>2</sup>	b	Radiobiologia <sup>1</sup>	b
Interazione e rivelazione della radiazione nucleare <sup>3</sup>	b	Laboratorio di Fisica Sanitaria	c
Introduction to continuum physics (LM in Geophysics) <sup>4</sup>	b	Dosimetria <sup>1</sup>	b
Fisica Sanitaria <sup>1</sup>	b	Tecniche fisiche di diagnostica medica	c
Abilità informatiche e telematiche	3 CFU	Accertamento di Lingua Inglese – Livello B2	3 CFU
TOTALE CFU	33		33

## II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Tecniche di Imaging per Applicazioni Biomediche <sup>1</sup>	b	Tirocinio formativo obbligatorio	6 CFU
Strumentazione per medicina	c	Tesi di laurea	36 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	42

1. Ambito "Sperimentale Applicativo"; 2. Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica"; 3. Ambito "Microfisico e di Struttura della Materia"; 4. Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale"

Ulteriori insegnamenti consigliati in alternativa a quelli presentati nelle precedenti tabelle:

### Caratterizzanti:

Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale": Physics of the Hydrosphere and the Cryosphere (LM in Geophysics, primo semestre); Astrofisica Generale 1 (primo semestre); Fisica dell'Atmosfera (secondo semestre)

Ambito "Microfisico e di Struttura della Materia": Radioattività (secondo semestre); Fisica Nucleare (secondo semestre); Fisica Statistica Avanzata (secondo semestre)

Ambito "Sperimentale Applicativo: Fisica degli acceleratori 1 (secondo semestre)

Affini e Integrativi: Laboratorio di Simulazione Numerica (secondo semestre), Deep learning con applicazioni (secondo semestre)

Si precisa inoltre che due degli insegnamenti consigliati possono essere sostituiti con corsi a scelta tra tutti quelli dell'Ateneo, rispettando i vincoli previsti dal Corso di Laurea.

## **Curriculum Specialistico - Percorso di Fisica del Nucleo Atomico e Interdisciplinare**

**Docente di Riferimento:** *Silvia Leoni*

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

*Struttura e reazioni nucleari - attività teorica (G. Colò, C. Barbieri)*

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

*Astrofisica nucleare sperimentale (R. Depalo, A. Guglielmetti)*

Attualmente la fisica nucleare si occupa dello studio della struttura e delle reazioni di nuclei che si trovano in condizioni estreme di temperatura, di momento angolare, o di rapporto tra numero di protoni e di neutroni. In particolare, la carta dei nuclidi noti si estende ogni anno con la scoperta di nuovi isotopi instabili, ricchi di neutroni o protoni, con vite medie brevi.

Questo tipo di fisica è di grande interesse anche in ambiti interdisciplinari come l'astrofisica nucleare. Infatti, la comprensione delle proprietà degli oggetti compatti come le stelle di neutroni e l'interpretazione delle osservazioni sempre più dettagliate, incluse quelle delle onde gravitazionali emesse in eventi "cataclismici", richiedono la conoscenza dell'equazione di stato della materia ricca di neutroni.

Più in generale, i processi nucleari sono responsabili sia della produzione di energia nelle stelle sia della nucleosintesi. Le probabilità (sezioni d'urto) di alcuni di questi processi possono essere misurati. Inoltre, la produzione in laboratorio dei nuclei "esotici" menzionati prima, ricchi di neutroni o protoni, permette di isolare e studiare le reazioni chiave che avvengono nelle stelle, la cui comprensione porta informazioni utili per comprendere la nucleosintesi degli elementi e le esplosioni di supernova. 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 questo campo si svolge nell'ambito di collaborazioni internazionali presso numerosi laboratori europei, americani ed asiatici, come pure nei laboratori italiani dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Questo tipo di ricerca si basa su apparati sperimentali in continua espansione e allo stato dell'arte per la rivelazione di raggi gamma, particelle cariche e neutroni, su acceleratori per fasci stabili e radioattivi (che permettono di accedere a radionuclidi instabili sempre più lontani dalla valle di stabilità nucleare), nonché su modelli teorici di frontiera. Tali importanti sviluppi sperimentali e teorici hanno 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. Il gruppo di Milano è attivo nello sviluppo di nuovi paradigmi e metodi computazionali per la soluzione del problema a molti corpi nucleari, sia basati su interazioni realistiche (teoria “ab initio”) sia efficaci (teoria del funzionale densità). Un'altra caratteristica importante della fisica nucleare è la sua forte interdisciplinarietà, motivo per cui viene utilizzata in diversi campi applicativi. Le tecniche, soprattutto di tipo sperimentale, sviluppate per affrontare specifici problemi di fisica nucleare sono infatti 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. I metodi di soluzione del complesso sistema a molti corpi si basano su tecniche all'avanguardia di inferenza statistica, di computazione e di “machine learning”, che si ispirano e trovano applicazioni in altri campi della scienza quantitativa.

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. Gli insegnamenti 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 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, Cina, 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.

I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Laboratorio di spettroscopia nucleare	b
Fisica Nucleare	b	Insegnamento a scelta tra: a) Radioattività b) Fisica degli acceleratori 1	b
Insegnamento affine integrativo	c	Insegnamento caratterizzante	b
Insegnamento a scelta tra: a) Metodi Matematici della Fisica: Geometria e Gruppi 1 b) Teoria dei sistemi a molti corpi 1 c) Machine learning con applicazioni	b	Insegnamento affine e integrativo	c
Insegnamento a scelta tra: a) Interazione e Rivelazione della Radiazione Nucleare b) Astrofisica Nucleare Relativistica 1 (2. semestre)	b	Insegnamento affine e integrativo	c
Accertamento di Lingua Inglese – Livello B2	3 CFU		
Abilità informatiche e telematiche	3 CFU		
TOTALE CFU	36	TOTALE CFU	30

## II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
----------------	-----------	------------------	-----------

Insegnamento a scelta libera	d	Tesi di laurea	36 CFU
Insegnamento a scelta libera	d	Tirocinio formativo obbligatorio	6 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	42

Tipologie Attività Formative (TAF):

b Caratterizzanti

c Affini e integrative

d A scelta tra tutti quelli dell'Ateneo

Ulteriori insegnamenti consigliati:

Caratterizzanti: Elettronica 1, Elettronica Nucleare (attivato ad anni alterni), Fisica Teorica, Laboratorio di modellizzazione dati

Affini e Integrativi: Astrofisica Nucleare Relativistica 2 (non attivato nell'AA 2024-25), Dinamica dei fluidi in astrofisica, Metodi computazionali della fisica, Metodologie di Analisi Dati

## **Curriculum Specialistico - Percorso di Fisica Teorica**

**Docente di riferimento:** *Luca Guido Molinari*

*Fisica delle Particelle e Interazioni Fondamentali (M. Archidiacono, S. Carrazza, E. Castorina, G. Ferrera, S. Forte, C. Frugiuele (INFN), R. Roentsch, A. Vicini, M. Zaro)*

*Fisica Statistica e Teoria Statistica dei Campi (M. Gherardi, M. Cosentino Lagomarsino, L.G. Molinari, M. Pernici (INFN))*

*Supersimmetria, Gravità e Superstringhe (A. Amariti (INFN), S. Klemm, A. Santambrogio (INFN))*

*Astrofisica Nucleare Relativistica (B. Haskell)*

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 evolve? Come si spiegano i fenomeni macroscopici a partire dai costituenti microscopici? Per questo la natura viene 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 lontano, suggerendo nuovi esperimenti che le rafforzeranno o ne mostreranno i limiti.

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:

- La fisica delle particelle elementari, in cui si studiano i costituenti della materia e le loro interazioni.
- 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.

- La teoria dei campi quantistici e delle superstringhe, che forniscono il linguaggio unificato in cui si esprimono le teorie fisiche moderne.

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 degli insegnamenti complementari è offerto un ventaglio di opzioni che va da insegnamenti di tipo matematico e di fisica teorica di base, ad altri più legati a specifiche discipline.

### 1) FISICA DELLE PARTICELLE E INTERAZIONI FONDAMENTALI

Lo studio teorico e fenomenologico delle interazioni fondamentali (elettromagnetica, debole e forte) è basato sulla teoria quantistica di campo che va sotto il nome di Modello Standard delle particelle elementari.

L'utilizzo di tecniche perturbative permette di calcolare predizioni teoriche di alta precisione per processi di diffusione ad alta energia che vengono confrontate con risultati sperimentali raccolti presso acceleratori di particelle quali il Large Hadron Collider (LHC) al CERN, i collisori elettrone-positrone e negli esperimenti che analizzano le oscillazioni di neutrini.

Il confronto tra predizioni teoriche e risultati sperimentali permette di migliorare la conoscenza delle interazioni fondamentali e di scoprire eventuali fenomeni di nuova fisica.

Il percorso prevede lo studio del formalismo teorico della teoria quantistica dei campi e della sua applicazione alle interazioni fondamentali, oltre all'acquisizione dei metodi matematici e delle tecniche computazionali ad esso associati.

#### I 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 o Deep Learning con applicazioni	c
3 insegnamenti a scelta	(*)	Teoria delle Interazioni Fondamentali 1	b

Abilità informatiche e telematiche	3 CFU	2 insegnamenti a scelta	(*)
Accertamento di lingua inglese - livello B2	3 CFU		
TOTALE CFU	36	TOTALE CFU	30

## II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Fisica Teorica 2	b	Tesi di laurea	36 CFU
Teoria delle Interazioni Fondamentali 2	c	Tirocinio formativo obbligatorio	6 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	42

(\*) 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 insegnamenti consigliati:

Affini e Integrativi: Cosmologia 2, Deep learning con applicazioni, Fisica Gravitazionale Avanzata, Introduzione alla Relatività Generale, Gravità e superstringhe 2, Laboratorio di Simulazione Numerica, Metodi Computazionali della fisica.

Ambito disciplinare "Teorico e dei Fondamenti della Fisica": Meccanica statistica 1, Gravità e superstringhe 1, Teoria dei sistemi a molti corpi 1, 2.

Ambito disciplinare "Microfisico e della Struttura della Materia": Fisica astroparticellare, Machine learning con applicazioni, Probabilità e statistica.

Ambito disciplinare "Astrofisico, Geofisico e Spaziale": Astrofisica nucleare relativistica 1, Cosmologia 1.

## 2) FISICA STATISTICA E TEORIA STATISTICA DEI CAMPI

Attività di ricerca:

- Applicazioni della fisica statistica ad ambiti interdisciplinari, e in particolare a biologia quantitativa, ecologia, e evoluzione (M. Cosentino Lagomarsino, M. Gherardi)

- Meccanica Statistica del Machine Learning (M. Gherardi)

- Matrici Random e applicazioni (L. G. Molinari, M. Pernici)

### I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Fisica Teorica 1	b
3 insegnamenti a scelta Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1 può sostituire Fisica Teorica 1	(*)  b	Fisica statistica dei sistemi complessi	b
abilità informatiche e telematiche	3 CFU	Fisica Statistica Avanzata	b
Accertamento di lingua inglese - livello B2	3 CFU	2 insegnamenti a scelta	(*)
Probabilità e Statistica	(*)		
TOTALE CFU	36	TOTALE CFU	30

### II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Insegnamento a scelta	(*)	Tesi di laurea	36 CFU

Insegnamento a scelta	(*)	Tirocinio formativo obbligatorio	6 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	42

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

Un corso tra: Metodi Computazionali della Fisica (II sem, c)

Laboratorio di Simulazione Numerica (II sem, c)

Deep Learning con applicazioni (II sem, c)

Tipologie Attività Formative (TAF):

b Caratterizzanti

c Affini e Integrative

d A scelta tra tutti quelli di Ateneo

Ulteriori insegnamenti consigliati:

Affini e Integrativi: Biofisica, Processi stocastici, Simulazioni di Materia Condensata e Biosistemi

Ambito “Teorico e dei Fondamenti della Fisica”: Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1, Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 2, Meccanica Statistica 1

Ambito “Microfisico e di struttura della materia”: Fisica delle Proteine 1

### 3) SUPERSIMMETRIA, GRAVITÀ E SUPERSTRINGHE

Il percorso di Superstringhe, Gravità e Supersimmetria è inteso per studenti interessati agli aspetti della fisica non-perturbativa delle teorie di gauge supersimmetriche e della corrispondenza olografica. E' necessario che lo studente apprenda nozioni della teoria quantistica dei campi, di gravità avanzata, di supersimmetria e di teoria delle stringhe, in modo da potere affrontare un percorso di tesi improntato agli sviluppi moderni del campo di ricerca.

I 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 (non attivato nel 24/25)	c
2 insegnamenti a scelta	(*)	2 insegnamenti a scelta	(*)
Abilità informatiche e telematiche	3 CFU		
Accertamento di lingua inglese - livello B2	3 CFU		
TOTALE CFU	36	TOTALE CFU	30

## II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Fisica Teorica 2	b	Tesi di laurea	36 CFU
Insegnamento a scelta	(*)	Tirocinio formativo obbligatorio	6 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	42

(\*) 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 insegnamenti consigliati, ripartiti per ambito:

Affini e Integrativi: Geometria 2; Metodi Computazionali della Fisica;

Ambito “Microfisico e della Struttura della Materia”: Fisica Statistica Avanzata, Fisica delle Particelle.

Ambito “Astrofisico, Geofisico e Spaziale”: Cosmologia 1, Cosmologia 2,

Ambito “Teorico e dei Fondamenti della Fisica”: Teoria delle Interazioni Fondamentali 1 , 2

#### 4) ASTROFISICA NUCLEARE RELATIVISTICA

Attività di ricerca: studio delle stelle di neutroni come sorgente di onde gravitazionali. L'approccio e' sia a livello microscopico, dove l'attenzione è rivolta soprattutto alla presenza di superfluidi nella stella, e alla modellizzazione della loro dinamica (rilevante anche per le osservazioni di glitch nelle radio pulsar), che a livello macroscopico, dove vengono usati soprattutto modelli magneto-idrodinamici i fenomeni di emissione elettromagnetica e gravitazionale.

##### I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	4 insegnamenti a scelta	(*)
Teoria delle Interazioni Fondamentali 1	b		
Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 1	b		
Teoria dei Sistemi a Molti Corpi 2	b		
Introduzione alla Relatività Generale	c	Astrofisica Nucleare Relativistica 1	b
Abilità informatiche e telematiche	3 CFU		
Accertamento di lingua inglese - livello B2	3 CFU		

TOTALE CFU	36	TOTALE CFU	30
------------	----	------------	----

## II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
		Tesi di laurea	36 CFU
		Tirocinio formativo obbligatorio	6 CFU
TOTALE CFU	12	TOTALE CFU	42

(\*) 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 insegnamenti consigliati, ripartiti per ambito:

Affini e Integrativi: Metodi Computazionali della Fisica.

Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia": Fisica Statistica Avanzata, Fisica Nucleare.

## **Curriculum Specialistico – Percorso di Fisica per l’Ambiente e per i Beni Culturali**

**Docente di riferimento:** *R. Vecchi*

Altri docenti: *V. Bernardoni, L. Bonizzoni, M. Gargano, N. Ludwig*

Negli ultimi anni, il ruolo della Fisica Applicata sta diventando sempre più rilevante poiché sono molteplici le problematiche nelle quali il contributo della fisica può dare risposte concrete e portare ad un avanzamento della conoscenza.

Tra i diversi settori in cui la Fisica Applicata riveste un ruolo chiave, ci sono anche quello relativo a tematiche ambientali (ad es. comprensione dei processi e caratterizzazione fisico-chimica delle componenti atmosferiche che hanno impatti sulla scala locale e globale) e quello che si rivolge a studi sul patrimonio artistico (ad es. indagini fisiche a supporto della verifica dell’originalità e dell’origine di un manufatto oppure tecniche di datazione).

La Fisica per l’Ambiente e per i Beni Culturali hanno molti punti in comune, in primis il fatto di usare spesso gli stessi approcci metodologici per effettuare indagini dettagliate sugli oggetti di studio dei due comparti (ad es. misure di spettrometria XRF od ottiche vengono effettuate sui campioni di aerosol atmosferico ma anche sui beni di interesse artistico; misure di radiocarbonio vengono utilizzate per le datazione ma anche per individuare sorgenti di emissione di particolato carbonioso di origine antropica o naturale). Le tecniche di analisi dei dati – per es. quelle basate su statistiche multivariate – e la modellistica sono spesso comuni alle due applicazioni citate.

Il percorso di Fisica Applicata qui proposto si prefigge l’obiettivo di fornire agli studenti le capacità necessarie per affrontare la complessità dei sistemi reali a cui si rivolgono gli studi sull’ambiente e sui beni culturali. La proposta formativa quindi comprende insegnamenti che forniscono una solida preparazione di base nonché capacità sperimentali, di analisi dati complessi e/o di modellistica fisico-matematica.

Una peculiarità della Fisica per l’Ambiente e per i Beni Culturali è il carattere fortemente interdisciplinare che - come valore aggiunto – fornisce agli studiosi del settore la capacità di comunicare con colleghi di ambiti molto lontani da quello della fisica come ad es. quello della tossicologia o della storia dell’arte. Il rigore proprio dell’approccio fisico porta ai tavoli di discussione dati quantitativi e analisi di dataset spesso molto ampi e complessi, contributi che sono complementari alle informazioni altrettanto utili provenienti da approcci completamente diversi.

Le attività di ricerca sono svolte in collaborazione con altre sedi universitarie a livello nazionale ed internazionale, enti di ricerca (INFN, CNR, ENEA, JRC), enti pubblici come ARPA (Agenzie Regionali per la Protezione dell’Ambiente) e la Soprintendenza per i Beni

Culturali, musei e gallerie d'arte, nonché aziende che hanno settori di R&D molto attivi. Il percorso offre quindi un'ampia possibilità di scelta per tesi di laurea e stage (interni o esterni, anche all'estero) che tipicamente vengono configurate all'interno delle collaborazioni attive.

La proposta formativa del percorso è in evoluzione e attualmente si compone di un'ampia rosa di insegnamenti che gli studenti potranno inserire secondo i loro interessi nel proprio piano di studi. A titolo di esempio, si propone di seguito un elenco – non esaustivo - di possibili scelte per la creazione del piano di studi. Gli studenti interessati a seguire questo percorso sono invitati a contattare la referente del percorso per dettagli su come comporre al meglio il proprio piano di studi, che potrà comprendere anche insegnamenti non esplicitamente elencati sotto.

<b>PRIMO SEMESTRE</b>	<b>SECONDO SEMESTRE</b>
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	
<b>Insegnamenti caratterizzanti (tipologia b)</b>	

<p><b>ambito «Sperimentale Applicativo»</b> Fisica dell'Ambiente Analisi Ottiche per i Beni Culturali</p> <p><b>ambito «Microfisico e della Struttura della Materia»</b> Laboratorio di Ottica con Applicazioni Interazione e rivelazione della radiazione nucleare Machine Learning con Applicazioni</p> <p><b>ambito «Astrofisico, Geofisico e Spaziale»</b> Introduction to continuum physics (mutuato da LM in Geophysics)</p> <p><b>ambito «Teorico e dei Fondamenti della Fisica»</b> Metodi Matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1 Meccanica Statistica 1</p>	<p><b>ambito «Sperimentale Applicativo»</b> Applicazioni modellistiche per la Fisica dell'Ambiente e per i Beni Culturali Dosimetria</p> <p><b>ambito «Microfisico e della Struttura della Materia»</b> Radioattività Ottica 1</p> <p><b>ambito «Astrofisico, Geofisico e Spaziale»</b> Fisica dell'Atmosfera</p> <p><b>ambito «Teorico e dei Fondamenti della Fisica»</b> Fisica Statistica dei Sistemi Complessi</p>
<p><b>Insegnamenti affini e integrativi (tipologia c)</b></p>	
<p>Laboratorio di Climatologia e Fisica dell'Atmosfera (non attivato nel 2024/25, si attiva ad anni alterni) Elettronica dei Sistemi Digitali Fondamenti di Energetica Storia della Fisica Metodologie di Analisi Dati</p>	<p>Laboratorio di Fisica dell'Ambiente Laboratorio di Fisica Sanitaria Fondamenti di microscopia elettronica e spettroscopie associate Deep Learning con Applicazioni</p>

<b>Insegnamenti a scelta</b>	
<i>1. insegnamenti tra quelli non selezionati dagli elenchi sopra riportati (tipologia b/c)</i>	<i>1. insegnamenti tra quelli non selezionati dagli elenchi sopra riportati (tipologia b/c)</i>
<p><i>2. insegnamenti mutuati dalla LM in Scienze per la conservazione e la diagnostica dei beni culturali e dalla LT in Beni culturali: scienze, tecnologie e diagnostica</i></p> <p>Tecniche fisiche avanzate applicate ai beni culturali – laboratorio (annuale)</p> <p>Metodologie Fisiche per i Beni Culturali</p>	<p><i>2. insegnamenti mutuati dalla LM in Scienze per la conservazione e la diagnostica dei beni culturali e dalla LT in Beni culturali: scienze, tecnologie e diagnostica</i></p> <p>Tecniche di Imaging Multibanda per i Beni Culturali</p> <p>Metodologie con raggi X per i beni culturali</p> <p>Microclimatologia per i beni culturali</p> <p>Conservazione e valorizzazione di strumentazione scientifica</p>
<i>3. qualsiasi altro insegnamento coerente col percorso formativo (si suggerisce di contattare la referente del percorso)</i>	<i>3. qualsiasi altro insegnamento coerente col percorso formativo (si suggerisce di contattare la referente del percorso)</i>
Abilità informatiche e telematiche	
Accertamento di lingua inglese - livello B2	

## **Curriculum Pluri-Settoriale – Percorso di Storia e Didattica della Fisica**

**Docente di riferimento:** *Leonardo Gariboldi*

Il Curriculum Pluri-Settoriale è particolarmente rivolto agli studenti interessati all'insegnamento e alla divulgazione della scienza. Dal punto di vista didattico il Curriculum Pluri-Settoriale propone sia insegnamenti di approfondimento distribuiti in modo uniforme sui principali ambiti della Fisica, sia insegnamenti di area delle metodologie e tecnologie didattiche. Per l'accesso ai bandi ministeriali per l'insegnamento, in base alla normativa vigente (Decreto Legge n. 36/2022, legge di conversione n. 79 del 29/06/2022), è necessario conseguire la laurea magistrale per le classi di concorso di interesse. Dopo aver conseguito la laurea magistrale, l'aspirante docente deve iscriversi a un percorso universitario e accademico abilitante di formazione iniziale (corrispondente a non meno di 60 CFU). Il percorso, per ogni classe di concorso, è gestito dalle università ed è attivato sulla base del fabbisogno di cattedre. Nella fase transitoria e in attesa dell'attivazione di questi percorsi abilitanti, chi ha già conseguito entro il 31/10/2022 i 24 CFU previsti dalla precedente legislazione quali requisito di accesso al concorso, è ammesso a partecipare ai concorsi a cattedra entro il 31/12/2024.

Storia della Fisica (*Leonardo Gariboldi*)

Didattica della Fisica

Didattica della Fisica Classica (*Marco Giliberti*)

Didattica della Fisica Moderna (*Marco Giliberti*)

Didattica della Fisica attraverso il Teatro (*Marco Giliberti, Marina Carpineti*)

### 1) STORIA DELLA FISICA

La Storia della Fisica offre allo studente la possibilità di riflettere sulle connessioni tra i vari settori della fisica e di vedere come le principali teorie abbiano affrontato una serie di ostacoli concettuali e osservativo-sperimentali che presentano alcune analogie con alcune difficoltà maggiormente riscontrate nell'apprendimento scolastico 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 Novecento e riguardano i seguenti temi: fisica dell'atmosfera e geofisica, fisica della radiazione cosmica, strumentazione scientifica, fisica italiana durante il Novecento.

Si consiglia un insegnamento di laboratorio attinente a uno degli insegnamenti a scelta libera dello studente.

#### I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Laboratorio	(*)
Storia della Fisica	b	Fondamenti della Fisica	c
Preparazione di Esperienze Didattiche 1	b	Corso a scelta libera	(*)
Insegnamento a scelta libera	(*)	Insegnamento a scelta libera	(*)
Insegnamento a scelta libera	(*)	Insegnamento a scelta libera	(*)
Abilità informatiche e telematiche	3 CFU		
Accertamento di lingua inglese – livello B2	3 CFU		
TOTALE CFU	36	TOTALE CFU	30

#### II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Insegnamento a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	36 CFU
Insegnamento a scelta libera	(*)		

Insegnamento a scelta libera	(*)		
TOTALE CFU	18	TOTALE CFU	36

(\*) 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

Nota: è consigliato inserire almeno un insegnamento dell'ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica" (tra gli insegnamenti della tipologia c).

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

Ambito "Sperimentale Applicativo": Analisi Ottiche per i Beni Culturali; Applicazioni modellistiche per la Fisica dell'Ambiente e per i Beni Culturali; Elettronica 1; Fisica Sanitaria; Fisica dell'Ambiente.

Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica": Preparazione di Esperienze Didattiche 2.

Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia": Fisica dei Dispositivi Elettronici; Fisica delle Particelle; Fisica Nucleare; Interazione e Rivelazione della Radiazione Nucleare; Laboratorio di Ottica ed applicazioni; Laboratorio di Ottica Quantistica; Laboratorio di Spettroscopia Nucleare; Ottica 1; Ottica Quantistica; Radioattività; Rivelatori di Particelle.

Ambito "Astrofisico, Geofisico e Spaziale": Astrofisica Generale 1; Cosmologia 1; Physics of the Hydrosphere and the Cryosphere (LM in Geophysics); Fisica dell'Atmosfera.

Insegnamenti Affini e integrativi (CCD Fisica): Biofisica; Fisica Teorica 1; Fondamenti della Meccanica Quantistica; Introduzione all'Astrofisica; Introduzione alla Relatività Generale; Meccanica Statistica 1; Metodi Computazionali della Fisica; Metodi Matematici della Fisica: Equazioni Differenziali 1.

Insegnamenti del CCD di Matematica: Storia della matematica 1.

## 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.

- a) 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.
- b) Didattica informale e sue ricadute sulla percezione della fisica nella società attraverso il teatro scientifico.
- c) 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).

### I ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Elettrodinamica Classica (obbligatorio)	b	Laboratorio	(*)
Preparazione di Esperienze Didattiche 1	b	Fondamenti della Fisica	c
Storia della Fisica	b	Insegnamento a scelta libera	(*)
Insegnamento a scelta libera	(*)	Insegnamento a scelta libera	(*)
Insegnamento a scelta libera	(*)	Insegnamento a scelta libera	(*)

Abilità informatiche e telematiche	3 CFU		
Accertamento di lingua inglese – livello B2	3 CFU		
TOTALE CFU	36	TOTALE CFU	30

## II ANNO

PRIMO SEMESTRE	TIPOLOGIA	SECONDO SEMESTRE	TIPOLOGIA
Insegnamento a scelta libera	(*)	Tesi di laurea	36 CFU
Insegnamento a scelta libera	(*)		
Insegnamento a scelta libera	(*)		
TOTALE CFU	18	TOTALE CFU	36

(\*) 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

Nota: è consigliato inserire almeno un insegnamento dell'ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica" (tra i corsi della tipologia c).

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

Ambito "Sperimentale Applicativo": Fisica dell'Ambiente; Fisica degli Acceleratori 1.

Ambito "Teorico e dei Fondamenti della Fisica": Preparazione di Esperienze Didattiche 2.

Ambito "Microfisico e della Struttura della Materia": Fisica delle Particelle; Struttura della Materia 2; Ottica 1; Radioattività; Fisica Nucleare; Interazioni Elettrodeboli; Laboratorio di Ottica Quantistica; Laboratorio di Superconduttività Applicata.

Ambito “Astrofisico, Geofisico e Spaziale”: Astrofisica generale 1; Cosmologia 1; Physics of the Hydrosphere and the Cryosphere (LM in Geophysics); Fisica dell’Atmosfera.

Insegnamenti Affini e integrativi (CCD Fisica): Introduzione alla Relatività Generale; Fenomenologia del Modello Standard delle Particelle Elementari; Introduzione all’Astrofisica; Fisica Atomica.