

DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Acceleratori di Particelle -

Particle Accelerators for Science and Interdisciplinary Applications

INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

A.A.	2026-2027	CdS	FISICA (LM-17)
Codice	8068870	Canale	Unico
CFU	6	Lingua	Inglese

DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Manuela Angela

CODOCENTE

Modulo:

OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI

Italiano	OBIETTIVI FORMATIVI: Il corso si propone di fornire agli studenti una conoscenza degli aspetti fondamentali delle tecniche di accelerazione e trasporto dei fasci di particelle. Verranno approfondite le prestazioni, le applicazioni e le caratteristiche di funzionamento delle principali tipologie di acceleratori di particelle, con particolare attenzione alle equazioni del moto di una singola carica e di un pacchetto di particelle in presenza di campi elettrici e magnetici. Il corso introduce inoltre la fenomenologia dell'emissione di radiazione da parte di cariche elettriche e presenta alcune tra le tecniche e soluzioni più innovative nel campo degli acceleratori di particelle, attraverso l'esplorazione di nuove applicazioni e delle attuali linee di ricerca e sviluppo. CONOSCENZA E CAPACITÀ DI COMPRENSIONE: Lo studente acquisirà conoscenze di base e avanzate sui principi fisici che regolano l'accelerazione, il trasporto e il controllo dei fasci di particelle. In particolare, comprenderà il funzionamento delle principali tipologie di acceleratori, le loro caratteristiche operative, le prestazioni ottenibili e i principali ambiti applicativi. Lo studente sarà inoltre in grado di comprendere le equazioni del moto di particelle cariche e fasci di particelle in campi elettrici e magnetici, nonché i meccanismi fondamentali di emissione di radiazione da parte di cariche elettriche. CAPACITÀ DI APPLICARE CONOSCENZA E COMPRENSIONE: Lo studente sarà in grado di applicare le conoscenze acquisite all'analisi del moto di particelle cariche e di pacchetti di particelle in sistemi acceleranti e di trasporto. Saprà interpretare le principali grandezze fisiche che descrivono le prestazioni di un acceleratore e valutare, a livello introduttivo o intermedio, le soluzioni più adatte in funzione delle diverse applicazioni scientifiche, tecnologiche, mediche o industriali. Sarà inoltre in grado di utilizzare i modelli fisici trattati nel
-----------------	---

	corso per affrontare semplici problemi relativi alla dinamica dei fasci e all'interazione delle particelle cariche con campi elettromagnetici. AUTONOMIA DI GIUDIZIO: Il corso contribuisce a sviluppare la capacità dello studente di analizzare criticamente le caratteristiche di funzionamento di diverse tipologie di acceleratori di particelle, riconoscendone vantaggi, limiti e ambiti di applicazione. Lo studente sarà stimolato a valutare la rilevanza dei parametri fisici coinvolti nei processi di accelerazione e trasporto dei fasci, nonché a individuare le implicazioni scientifiche e tecnologiche delle soluzioni innovative attualmente oggetto di ricerca e sviluppo. ABILITÀ COMUNICATIVE: Lo studente svilupperà la capacità di descrivere in modo chiaro, rigoroso e scientificamente corretto i principi di funzionamento degli acceleratori di particelle, le tecniche di trasporto dei fasci e i principali fenomeni fisici associati. Sarà inoltre in grado di utilizzare un linguaggio tecnico appropriato per presentare modelli, applicazioni e risultati relativi alla dinamica di particelle cariche e fasci di particelle CAPACITÀ DI APPRENDIMENTO: Il corso favorisce lo sviluppo della capacità di apprendimento autonomo dello studente, stimolandolo a integrare le conoscenze acquisite a lezione con lo studio di manuali, articoli scientifici e materiali di approfondimento. Lo studente sarà inoltre incoraggiato a seguire l'evoluzione delle tecniche innovative e delle linee di ricerca emergenti nel settore degli acceleratori di particelle, acquisendo strumenti utili per affrontare successivi percorsi di studio o attività di ricerca.
English	LEARNING OUTCOMES <i>The course aims to provide students with knowledge of the fundamental aspects of particle beam acceleration and transport techniques. It covers the performance, applications, and operating characteristics of the main types of particle accelerators, with particular attention to the equations of motion of a single charged particle and of a particle bunch in electric and magnetic fields. The course also introduces the phenomenology of radiation emission by electric charges and presents some of the most interesting innovative techniques and solutions in the field of particle accelerators, through the exploration of new applications and current lines of research and development.</i> KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING <i>Students will acquire basic and advanced knowledge of the physical principles governing the acceleration, transport, and control of particle beams. In particular, they will understand the operating principles of the main types of accelerators, their operational characteristics, achievable performance, and main fields of application. Students will also be able to understand the equations of motion of charged particles and particle beams in electric and magnetic fields, as well as the fundamental mechanisms of radiation emission by electric charges.</i> APPLYING KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING <i>Students will be able to apply the knowledge acquired to the analysis of the motion of charged particles and particle bunches in acceleration and transport systems. They will be able to interpret the main physical quantities describing accelerator performance and to assess, at an introductory or intermediate level, the most suitable solutions for different scientific, technological, medical, or industrial applications. Students will also be able to use</i>

	<i>the physical models discussed in the course to address simple problems concerning beam dynamics and the interaction of charged particles with electromagnetic fields.</i> MAKING JUDGEMENTS <i>The course contributes to developing students' ability to critically analyse the operating characteristics of different types of particle accelerators, identifying their advantages, limitations, and fields of application. Students will be encouraged to assess the relevance of the physical parameters involved in beam acceleration and transport processes, as well as to recognise the scientific and technological implications of innovative solutions currently under research and development.</i> COMMUNICATION SKILLS <i>Students will develop the ability to describe clearly, rigorously, and scientifically the operating principles of particle accelerators, beam transport techniques, and the main associated physical phenomena. They will also be able to use appropriate technical language to present models, applications, and results related to the dynamics of charged particles and particle beams.</i> LEARNING SKILLS <i>The course fosters students' ability to learn independently by encouraging them to integrate the knowledge acquired during lectures with the study of textbooks, scientific papers, and additional reference materials. Students will also be encouraged to follow the development of innovative techniques and emerging research lines in the field of particle accelerators, acquiring useful tools for further studies or research activities.</i>
--	---

PREREQUISITI

Italiano	Conoscenze di base di fisica generale I e II
<i>English</i>	<i>Basic knowledge of general physics I and II</i>

PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

Italiano	<i>Parte I: Introduzione. L'importanza degli acceleratori nella ricerca e nella società. Rigidità elettrica e magnetica. Differenza tra urti a bersaglio fisso e fasci collidenti. Principi di funzionamento degli acceleratori elettrostatici. Legge di Paschen. Acceleratore di Cockroft e Walton, acceleratore di Van der Graff. Acceleratori tandem. Limite degli acceleratori elettrostatici.</i> <i>Parte II: Acceleratori elettrodinamici. Acceleratore di Wideroe, stabilità di fase. Differenza tra macchine lineari e circolari.</i> <i>Parte III: Macchine. Il betatrone, stabilità dell'orbita, oscillazioni di betatrone. Principio del focheggiamento debole e forte, differenze. Principi generali dei fondamentali tipi di acceleratori: ciclotroni, microtroni, sincrotroni, anelli di accumulazione. Corrente di picco e media. Acceleratori per applicazioni mediche.</i>
-----------------	---



Parte IV: Moto nel piano trasverso. Ottica lineare. Il dipolo, il quadrupolo e il solenoide. Moto di cariche in questi dispositivi. Equazioni del moto nel piano trasverso. Matrici di trasporto di semplici dispositivi magnetici, caratteristiche delle matrici di trasporto, determinante, traccia, stabilità del moto. Parametri di Twiss. Soluzione delle equazioni del moto. Spazio delle tracce e spazio delle fasi. Teorema di Liouville. Definizione di emittanza geometrica e normalizzata. Smorzamento adiabatico delle oscillazioni di betatrone. Figure di merito: Brillanza e Luminosità di un acceleratore. Moto di particelle con momento differente da quello nominale. Errori dipolari e quadrupolari, il problema delle risonanze. Il cromatismo e sua correzione.

Parte V: Fasci laminari ed equazione di inviluppo. Emittanza RMS. La carica spaziale. Il parametro di laminarità. Equazione di inviluppo in presenza di carica spaziale. Proprietà slice. Moto dentro un solenoide, oscillazioni di emittanza. Compensazione di emittanza. Accelerazione.

Parte VI: La radiazione. Campo di una carica in moto a velocità relativistiche. Origine della emissione di radiazione di una carica accelerata. Potenziali di Lienard-Wiechert. Energia irradiata da una carica in moto rettilineo e in moto circolare. Distribuzione in angolo e in frequenza della radiazione emessa. La radiazione di Sincrotrone. Frequenza critica. Ondulatori. Radiazione emessa da una carica in moto all'interno di un onduttore o di un Wiggler, distribuzione angolare, lunghezza d'onda emessa. Larghezza della linea spettrale.

Parte VII: Radiazione coerente. Definizione di coerenza spaziale e temporale e loro importanza. Brevi cenni sulla fisica del Laser, sistemi a tre e quattro livelli, coefficienti di Einstein. I laser di potenza. Stato dell'arte dei laser di potenza.

Parte VIII: I Free electron lasers. Equazioni del FEL nel regime di piccolo guadagno. Meccanismo di scambio dell'energia tra un campo e le cariche in moto. Analisi dello spazio fasi. Limiti della teoria a basso guadagno. Fenomeno del microbunching. Crescita esponenziale della radiazione. Saturazione. Equazione di Pellegrini. La Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE). Lo Slippage. La lunghezza di cooperazione. Le differenza tra regime SASE e regime Seeding.

Parte IX: Sorgenti di radiazione. Le sorgenti di luce di I-IV generazione. Fotoiniettori che pilotano FEL. Cenni sulla compressione magnetica e a radiofrequenza. Acceleratori lineari che iniettano in anelli.

Parte X: Strutture acceleranti. La risonanza elettrica. Cavità risonanti. Fattore di merito Q. Fattore tempo di transito, equazione di Panosky. Differenza tra strutture superconduttrici e strutture calde. I limiti al campo accelerante, il breakdown. Il multipacting. Propagazione di una onda elettromagnetica in una guida d'onda liscia. Velocità di fase e di gruppo. Diagramma di Brillouin. Guida caricata con dischi. Strutture ad onda viaggiante e onda stazionaria. Sorgenti di potenza RF: i Klystron.

Parte XI: Dinamica longitudinale. Fase sincrona, guadagno di energia, equazione del moto longitudinale. Oscillazioni di Sincrotrone. Emittanza longitudinale. Momentum Compaction. Fase stabile. Significato di transizione. Bunch, bucket, accettanza fisica e dinamica. Smorzamento adiabatico delle oscillazioni di sincrotrone. Effetto dell'irraggiamento nello smorzamento delle oscillazioni di betatrone.

Parte XII: Accelerazione al plasma. Limiti degli acceleratori convenzionali. Definizione di plasma, schermo di Debye, frequenza di plasma. Equazioni per la teoria lineare: equazioni di Maxwell, di Eulero, di continuità. Campo longitudinale e radiale in regime lineare. Transformer ratio. Limiti del regime

	lineare. Il regime quasi non lineare e quello di bolla. Condizioni sulle dimensioni trasversali e longitudinali di un fascio di particelle in un acceleratore al plasma. Accelerazione beam driven e laser driven. Somiglianze e differenze. L'iniezione esterna. Le lenti al plasma.
English	<i>Part I: Introduction.</i> The importance of accelerators in research and society. Electric and magnetic rigidity. Difference between fixed-target collisions and colliding beams. Operating principles of electrostatic accelerators. Paschen's law. Cockcroft-Walton accelerator, Van de Graaff accelerator. Tandem accelerators. Limits of electrostatic accelerators. <i>Part II: Electrodynamic Accelerators.</i> Widerøe accelerator, phase stability. Difference between linear and circular machines. <i>Part III: Accelerator Machines.</i> The betatron, orbit stability, betatron oscillations. Principle of weak and strong focusing, and their differences. General principles of the main types of accelerators: cyclotrons, microtrons, synchrotrons, storage rings. Peak and average current. Accelerators for medical applications. <i>Part IV: Motion in the Transverse Plane.</i> Linear optics. The dipole, quadrupole, and solenoid. Motion of charged particles in these devices. Equations of motion in the transverse plane. Transport matrices of simple magnetic devices, properties of transport matrices, determinant, trace, and stability of motion. Twiss parameters. Solution of the equations of motion. Trace space and phase space. Liouville's theorem. Definition of geometric and normalized emittance. Adiabatic damping of betatron oscillations. Figures of merit: brilliance and luminosity of an accelerator. Motion of particles with momentum different from the nominal momentum. Dipole and quadrupole errors, the resonance problem. Chromaticity and its correction. <i>Part V: Laminar Beams and Envelope Equation.</i> RMS emittance. Space charge. The laminarity parameter. Envelope equation in the presence of space charge. Slice properties. Motion inside a solenoid, emittance oscillations. Emittance compensation. Acceleration. <i>Part VI: Radiation.</i> Field of a charge moving at relativistic velocity. Origin of radiation emission from an accelerated charge. Liénard-Wiechert potentials. Energy radiated by a charge in rectilinear and circular motion. Angular and frequency distribution of the emitted radiation. Synchrotron radiation. Critical frequency. Undulators. Radiation emitted by a charge moving inside an undulator or a wiggler, angular distribution, emitted wavelength. Spectral linewidth.

	<i>Part VII: Coherent Radiation.</i> Definition of spatial and temporal coherence and their importance. Brief overview of laser physics, three-level and four-level systems, Einstein coefficients. High-power lasers. State of the art of high-power lasers. <i>Part VIII: Free-Electron Lasers.</i> FEL equations in the small-gain regime. Mechanism of energy exchange between a field and moving charges. Phase-space analysis. Limits of low-gain theory. Microbunching phenomenon. Exponential growth of radiation. Saturation. Pellegrini equation. Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE). Slippage. Cooperation length. Differences between SASE and seeding regimes. <i>Part IX: Radiation Sources.</i> First- to fourth-generation light sources. Photoinjectors driving FELs. Brief overview of magnetic and radio-frequency compression. Linear accelerators injecting into rings. <i>Part X: Accelerating Structures.</i> Electric resonance. Resonant cavities. Quality factor Q. Transit-time factor, Panofsky equation. Difference between superconducting and normal-conducting structures. Limits to the accelerating field, breakdown. Multipacting. Propagation of an electromagnetic wave in a smooth waveguide. Phase and group velocity. Brillouin diagram. Disk-loaded waveguide. Travelling-wave and standing-wave structures. RF power sources: klystrons. <i>Part XI: Longitudinal Dynamics.</i> Synchronous phase, energy gain, equation of longitudinal motion. Synchrotron oscillations. Longitudinal emittance. Momentum compaction. Stable phase. Meaning of transition. Bunch, bucket, physical and dynamic acceptance. Adiabatic damping of synchrotron oscillations. Effect of radiation on the damping of betatron oscillations. <i>Part XII: Plasma Acceleration.</i> Limits of conventional accelerators. Definition of plasma, Debye shielding, plasma frequency. Equations for linear theory: Maxwell equations, Euler equation, continuity equation. Longitudinal and radial fields in the linear regime. Transformer ratio. Limits of the linear regime. Quasi-nonlinear and bubble regimes. Conditions on the transverse and longitudinal dimensions of a particle beam in a plasma accelerator. Beam-driven and laser-driven acceleration. Similarities and differences. External injection. Plasma lenses.
--	--

TESTI ADOTTATI E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Italiano	K. Wille, "The Physics of Particle Accelerators: An Introduction" Oxford University Press, H. Wiedemann, "Particle Accelerator Physics", Springer,
----------	---

	AA.VV. CERN Accelerator Schools.
<i>English</i>	K. Wille, "The Physics of Particle Accelerators: An Introduction" Oxford University Press, H. Wiedemann, "Particle Accelerator Physics", Springer, AA.VV. CERN Accelerator Schools.

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI SVOLGIMENTO E METODI DIDATTICI ADOTTATI

☒ In presenza ☐ A distanza

Italiano	Lezioni frontali in aula, integrate da presentazioni Power Point, uso della lavagna e altro materiale didattico
<i>English</i>	<i>Classroom lessons, integrated with Power Point presentations, chalkboard and other didactic material</i>

MODALITÀ DI FREQUENZA

☐ frequenza obbligatoria ☒ frequenza facoltativa

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI FREQUENZA

Italiano	Lezioni in aula
<i>English</i>	<i>Class lectures</i>

MODALITÀ DI VALUTAZIONE

☐ Prova scritta ☒ Prova orale ☐ Prova di laboratorio ☐ Prova pratica
☐ Valutazione in itinere ☐ Valutazione di progetto ☐ Valutazione di tirocinio

COMPOSIZIONE DELLA COMMISSIONE VALUTATRICE

Alessandro Cianchi, Francesco Stellato, Mattia Gaboardi

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ E DEI CRITERI DI VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

Italiano	L'esame consiste in un colloquio orale volto a verificare il livello di conoscenza degli argomenti trattati. Per superare l'esame occorre riportare un voto non inferiore a 18/30; più in particolare, la prova di esame sarà valutata secondo i seguenti criteri: Non idoneo: importanti carenze e/o inaccuratezza nella conoscenza e comprensione degli argomenti; limitate capacità di analisi e sintesi, frequenti generalizzazioni.
-----------------	---

	18-20: conoscenza e comprensione degli argomenti appena sufficiente con possibili imperfezioni; capacità di analisi, sintesi e autonomia di giudizio sufficienti. 21-23: Conoscenza e comprensione degli argomenti routinaria; Capacità di analisi e sintesi corrette con argomentazione logica coerente. 24-26: Discreta conoscenza e comprensione degli argomenti; buone capacità di analisi e sintesi con argomentazioni espresse in modo rigoroso. 27-29: Conoscenza e comprensione degli argomenti completa; notevoli capacità di analisi, sintesi. Buona autonomia di giudizio. 30-30L: Ottimo livello di conoscenza e comprensione degli argomenti. Notevoli capacità di analisi e di sintesi e di autonomia di giudizio. Argomentazioni espresse in modo originale.
English	<i>The exam consists of an oral interview aimed at verifying the level of knowledge of the topics covered in class.</i> <i>To pass the exam, a grade of not less than 18/30 must be obtained; more specifically, the vote is determined as follows:</i> <i>18-21, if the student has acquired the basic concepts of the discipline, with sufficiently correct and appropriate language;</i> <i>22-25, if the student has acquired the basic concepts of the discipline in depth, and is adequately able both to make connections between the various topics and to explain concepts with appropriate and correct language;</i> <i>26-29, if the student has a complete and well-organized background of knowledge, being able both to apply and re-elaborate independently, without any error, the acquired knowledge, and to highlight logical-analytical skills with an appropriate and rigorous mathematical language;</i> <i>30 and 30 cum laude, if the student has a complete and in-depth knowledge that can be applied to complex cases and new situations as well; the student must explain the topics brilliantly with perfect language properties, as well as mastering the mathematical tools at the basis of the discipline.</i>