

DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

PARTICLE PHYSICS – FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI 1

INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

A.A.	2026-2027	CdS	FISICA (LM-17)
Codice	8067392 (ENG) - 8065515 (ITA) 8068913	Canale	Unico
CFU	6	Lingua	Inglese

DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Lucio CERRITO

CODOCENTE

Modulo:

OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI

Italiano	OBIETTIVI FORMATIVI: Il corso è volto a fornire allo studente delle solide basi di fisica delle particelle elementari partendo dalle osservazioni sperimentali e con particolare attenzione ai temi di ricerca più attuali. Una trattazione semplificata dei grafici di Feynman dà allo studente lo strumento per svolgere semplici calcoli di sezioni d'urto e di decadimenti. Vengono presentati i meccanismi di produzione e di decadimento delle particelle W, Z, Higgs e le conseguenze sperimentali. Il fenomeno delle oscillazioni e della violazione della simmetria CP in vari tipi di particelle è trattato quantitativamente. Si affronta inoltre il fenomeno dell'oscillazione dei neutrini. CONOSCENZA E CAPACITÀ DI COMPRENSIONE: Al termine del corso lo studente deve avere una comprensione della struttura formale dell'elettrodinamica e della cromodinamica quantistica, della teoria elettrodebole e le relative problematiche sperimentali. Deve conoscere la formulazione delle regole di Feynmann per il calcolo di sezioni d'urto e decadimenti al leading order. Deve inoltre avere una conoscenza di base circa il ruolo e dell'importanza dei test di precisione del Modello Standard, delle oscillazioni di neutrini e delle misure di violazione di CP. CAPACITÀ DI APPLICARE CONOSCENZA E COMPRENSIONE: Al termine del corso lo studente sarà in grado di esprimere gli elementi necessari per il calcolo di processi mediati dalle interazioni forti ed elettrodeboli, riconoscere il livello di approssimazione e svolgere semplici calcoli di sezioni d'urto e decadimenti di particelle. Sarà
----------	---

	inoltre in grado di collegare le formulazioni teoriche con le misurazioni sperimentali anche di ultima generazione. AUTONOMIA DI GIUDIZIO: Lo studente deve essere in grado di effettuare autonomamente ricerche bibliografiche collegando le attività sperimentali con le problematiche teoriche. Deve essere inoltre in grado di riconoscere e giudicare il ruolo delle misure sperimentali attuali e future rispetto all'esigenza di nuove teorie oltre il modello standard. ABILITÀ COMUNICATIVE: Lo studente deve essere in grado di illustrare in modo analitico il ruolo che le osservazioni sperimentali passate hanno avuto nella formulazione della teoria del Modello Standard, precisando i limiti osservativi. Deve essere in grado di riassumere i risultati delle ricerche sperimentali moderne, in maniera quantitativa, utilizzando gli elementi caratterizzanti del Modello Standard. CAPACITÀ DI APPRENDIMENTO: Al termine del corso, lo studente deve essere in grado di orientarsi in maniera autonoma verso lo studio approfondito di nuovi campi. Deve acquisire la capacità di proseguire gli studi in un dottorato di ricerca o altre scuole di specializzazione.
English	LEARNING OUTCOMES: <i>The course aims at giving the student a solid understanding of the physics of elementary particles, starting from the experimental observations and with an emphasis on the most recent research themes. A simplified treatment of Feynmann diagrams gives the student the possibility of performing simple calculations of cross sections and decays. The mechanisms of production and decay of the W, Z, Higgs particles are presented alongside the experimental consequences. The phenomenon of oscillations and CP symmetry violation in various particles is described quantitatively. Furthermore, the phenomenon of neutrino oscillations is discussed in some detail.</i> KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: <i>The student will acquire a comprehension of the formal structure of quantum electrodynamics and chromodynamics, of the electroweak theory and the related experimental measurements. He will have a knowledge of the Feynmann rules required to perform calculations of cross sections and decays at leading order. The student will acquire the basic knowledge related to the role and importance of precision tests of the Standard Model, of the neutrino oscillations and the measurements of CP violation.</i> APPLYING KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: <i>At the end of the course the student will be able to combine together the elements required to perform the computation of processes mediated by strong and electroweak interactions, recognising the level of approximation and execute simple calculations of particle cross</i>

	sections and decay. He will also be able to connect the theoretical formulation of an interaction with the experimental measurements, including from latest generation experiments. MAKING JUDGEMENTS: The student must be able to independently perform bibliographic searches, connecting the experimental activities and the theoretical frameworks. The student must be able to recognise and judge the role played by the current and future experimental measurements with respect to the need of new theories beyond the Standard Model. COMMUNICATION SKILLS: The student must be able to illustrate analytically the role that past experimental observations had on the formulation of the Standard Model, with particular regard to the observational limits. The student must be able to summarise quantitatively the results of the modern experimental campaigns, in the framework of the elements that characterise the Standard Model. LEARNING SKILLS: The student must be able to move comfortably and autonomously towards further studies in the latest areas. The student will acquire the elements needed to pursue studies at doctoral level or further specialisation Master level.
--	---

PREREQUISITI

Italiano	Meccanica Quantistica e Relatività Speciale, Elementi di Fisica Nucleare e Subnucleare
English	Quantum Mechanics and Special Relativity, Introductory Particle and Nuclear Physics

PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

Italiano	Introduzione, particelle e forze, diagrammi di Feynman. Variabili di Mandelstam, regola d'oro di Fermi, spazio delle fasi Lorentz-invariante, decadimenti a due corpi, sezione d'urto; (6 ore). Equazione di Klein-Gordon, equazione di Dirac, densità di probabilità e covarianza, soluzioni dell'equazioni di Dirac per un elettrone a riposo. Soluzioni generali dell'equazione di Dirac, Antiparticelle e loro spinori, normalizzazione della funzione d'onda, Spin, Elicità. Interazione tramite scambio di particella, elemento di matrice $2 \rightarrow 2$ time-ordered, Diagrammi di Feynman, esempi ed algebra di matrici (6 ore). Operatore di Parità, raggio delle forze, potenziale di Yukawa, Elemento di matrice QED per lo scattering elettrone-tau, Regole di Feynman per la QED. QED come teoria perturbativa, Somme di spin nel processo e^+e^- in $\mu^+\mu^-$, la sezione d'urto del processo e^+e^- in $\mu^+\mu^-$ e la sua forma Lorentz-invariante, esempi di applicazione delle regole di Feynman. Operatore di Chiralità, Coniugazione di carica (4 ore). Scattering inelastico $e-p$ ad alto Q^2 (DIS), scaling di Bjorken e relazione di Callan-Gross, Scattering elettrone-quark. Modello a quark-partoni, funzioni di densità dei partoni, quark di
----------	--

	valenza e di mare, scattering elettrone-protone ad HERA. Simmetrie e leggi di conservazione, Simmetria di sapore SU(2), combinazioni di 2 e 3 quark in SU(2), Barioni e mesoni di quark leggeri (ud). Simmetria di sapore SU(3), matrici di Gell-Mann, Mesoni e Barioni di quark leggeri (ground state, uds), Massa degli adroni e constituent mass. Invarianza locale di gauge in QED e QCD, Colore in QCD, confinamento di colore, Funzioni d'onda del colore per Mesoni e Barioni, Gluoni, interazioni quark-gluone e gluone-gluone, Adronizzazione e jet, produzione adronica nelle collisioni e+e-. Costanti d'accoppiamento running in QED e QCD, libertà asintotica, Fattori di colore, Collisioni adroniche e Drell-Yan. Produzione di jet in collisioni adroniche (12 ore). Rapidità e pseudo-rapidità, processo Drell-Yan, Parità negli elementi di matrice di QED e QCD, violazione di Parità nelle interazioni deboli. Struttura V-A dell'interazione debole, Proprietà chirali di V-A, Propagatore del bosone W, Teoria di Fermi, Elicità nel decadimento del pione ed evidenza di V-A, universalità leptonica nell'interazione elettrodebole. Scattering (Anti)neutrino-quark, sezioni d'urto neutrino-nucleone, Esperimento CDHS. Autostati di massa e di sapore del neutrino, oscillazioni di neutrino in 2 e 3 famiglie, Fenomenologia negli esperimenti di neutrino. Violazione di CP nel neutrino mixing, matrice PMNS, Esperimenti di oscillazione di neutrini e determinazione dei parametri PMNS e delle masse (10 ore). Mescolamento di quark nelle interazioni deboli, Angolo di Cabibbo e meccanismo GIM, matrice CKM e sue rappresentazioni. Il sistema di K neutri. Oscillazioni di K, Violazione di CP nelle oscillazioni e decadimenti. Oscillazioni di B e B_s, B factories. Larghezza di decadimento del bosone W e branching ratios. Struttura di gauge elettrodebole SU(2)_L, Corrente neutra, Unificazione elettrodebole, il bosone Z (6 ore). Risonanza Breit-Wigner, sezione d'urto di produzione di Z in collisioni e+e-, misure di massa e larghezza del bosone Z, Asimmetria FB di Z e weak mixing angle, il collider LEP, Massa e larghezza del bosone W. Velocità di decadimento del top quark, produzione di top ai collisionatori adronici, il bosone di Higgs e la sua scoperta (4 ore). NOTA: il numero di ore si riferisce alle ore di lezioni ed esercitazioni in classe.
English	<i>Introduction, particles and forces. Mandelstam variables, Fermi's golden rule, Lorentz invariant phase space, two-body decays, cross section (6 hours). Klein-Gordon equation, Dirac equation, probability density and covariance. Solutions to the Dirac equation for an electron at rest. General solutions of the Dirac Equation, Antiparticles and its spinor, normalisation of the wavefunction. Spin and Helicity. Interaction by particle exchange, time-ordered 2->2 matrix element, Feynman diagrams, examples and algebra of matrices (6 hours). Parity operator, Range of forces, Yukawa potential, QED matrix element for electron-tau scattering, Feynman rules for QED. QED as a perturbative theory, Spin sums in e+e- to mu+mu- annihilation, the e+e- to mu+mu- cross section and its Lorentz-invariant form, examples of application of the Feynman rules. Chirality Operator, Charge Conjugation (4 hours). Electron-proton elastic scattering: Rutherford, Mott, Rosenbluth formulae, Form factors. Electron-proton inelastic scattering at high-Q² (DIS), Bjorken scaling and Callan-Gross relation, Electron-quark scattering. Quark-Parton Model, Parton Density Functions, Valence and Sea quarks, electron-proton scattering at HERA. Symmetries and Conservation laws, SU(2) flavour symmetry, 2 and 3 quarks combinations in SU(2), Light quark (ud) baryons and mesons. SU(3) flavour symmetry, Gell-Mann matrices, Ground state light quark (uds) Mesons and Baryons, Hadron mass and constituent mass. Local gauge invariance in QED and QCD, Colour in QCD, colour confinement, Meson and Baryon colour</i>

	wavefunctions, Gluons, quark-gluon and gluon-gluon interactions, Hadronisation and jets, hadroproduction in e+e- collisions. Running coupling constants in QED and QCD, Asymptotic freedom. Colour factors. Hadronic collisions and Drell-Yan. Jet production in hadronic collisions (12 hours). Rapidity and pseudorapidity, Drell-Yan process, Parity in QED and QCD matrix elements, Parity Violation in weak-interactions. V-A structure of the weak interaction, Chiral properties of V-A, W boson propagator, Fermi theory, Helicity in pion decay and evidence for V-A, lepton universality of the electroweak coupling. (Anti)Neutrino-quark scattering, neutrino-nucleon cross sections, CDHS experiment. Neutrino mass and flavour eigenstates, Neutrino oscillations in 2 and 3 families, Phenomenology of neutrino experiments. CP violation in neutrino mixing, PMNS matrix, Neutrino oscillation experiments and determination of the PMNS parameters and masses (10 hours). Quark mixing in weak interactions, Cabibbo angle and GIM mechanism, CKM matrix and its representations. Neutral kaons system. Kaon oscillations, CP violation in oscillations and decays. B and B_s oscillations, B factories. W boson decay width and branching ratios. Electroweak SU(2)_L gauge structure, Neutral current, Electroweak unification, the Z boson (6 hours). Breit-Wigner resonance, Z production cross section in e+e- collisions, measurements of Z boson mass and width, Z FB asymmetry and weak mixing angle, the LEP collider, W boson mass and width. Decay rate of the top quark, top quark production at hadronic colliders, Higgs boson and its discovery (4 hours). NOTE: the number of hours refers to contact hours in class for lectures and guided exercises.
--	---

TESTI ADOTTATI E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Italiano	M. Thomson, "Modern Particle Physics" (testo principale). Dispense in formato pdf disponibili sul sito didatticaweb Si suggerisce inoltre: Perkins "Introduction to High Energy Physics", F. Halzen & A. Martin: "Quarks and Leptons";
English	M. Thomson, "Modern Particle Physics" (main textbook). Slides in electronic form will be made available on the teaching website didatticaweb Suggested additional reading: Perkins "Introduction to High Energy Physics", F. Halzen & A. Martin: "Quarks and Leptons";

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI SVOLGIMENTO E METODI DIDATTICI ADOTTATI

☒ In presenza ☒ A distanza

Italiano	Lezioni frontali, esercitazioni in classe ed a casa, seminari
English	Frontal teaching, in classroom and at-home exercises, seminars.

MODALITÀ DI FREQUENZA

☐ frequenza obbligatoria ☒ frequenza facoltativa

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI FREQUENZA

Italiano	La frequenza delle lezioni è fortemente consigliata
English	<i>Attendance to lectures is strongly encouraged</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

Docente responsabile del corso e docenti del medesimo settore scientifico-disciplinare
--

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ E DEI CRITERI DI VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

Italiano	La valutazione dello studente/studentessa prevede un esame scritto della durata di 2 ore comprensivo di due parti (A,B). La Parte A consiste di 10 domande su argomenti che coprono tutto il programma e che riguardano le conoscenze di base attese al termine del corso. Il punteggio di ciascuna domanda è riportato a margine, ed il punteggio massimo per la Parte A è 20 trentesimi. La Parte B consiste nello svolgimento di 2 esercizi o dimostrazioni suddivisi a loro volta in vari elementi che mirano a valutare il grado di conoscenza e comprensione degli elementi più avanzati del programma. Il punteggio di ciascuna domanda è riportato a margine dell'elaborato. La lode è assegnata per un punteggio complessivo tra la Parte A e Parte B superiore a 30 trentesimi. Lo scritto viene discusso con lo studente a seguito della correzione e la valutazione finale dell'esame viene finalizzata con la discussione dell'elaborato. Diversi esempi degli esami di anni passati vengono forniti agli studenti tra il materiale del corso.
English	<i>The student evaluation is based on a written test of 2 hours duration which includes two parts (A,B). Part A consists of 10 questions on topics from the entire course programme and that test the basic knowledge expected to be acquired. The number of points for each question is indicated next to it, and the maximum grade for Part A is 20. Part B consists of 2 exercises or analytical demonstrations, which are split in several elements intended to gauge the level of knowledge and comprehension of the more advanced parts of the programme. The number of points for each element is indicated on the exam paper. The maximum grade for Part B is 13. The mention "cum laude" is awarded for a total score between Part A and Part B exceeding 30. The written test is discussed with the student following the marking of the test and the final grade is finalised in the oral discussion of the written test. Several exam paper examples from past exams are given to the students with the course materials.</i>