

DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

TEORIA DEI CAMPI E PARTICELLE 2

THEORY OF PARTICLES AND FIELDS 2

INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

A.A.	2026-2027	CdS	FISICA (LM-17)
Codice	8065530-8068898	Canale	Unico
CFU	6	Lingua	Inglese

DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Roberto Frezzotti

CODOCENTE

Modulo:

OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI

Italiano	OBIETTIVI FORMATIVI: Il corso si propone di fornire agli studenti: - una introduzione ai metodi di analisi fondati sulle simmetrie in teoria quantistica dei campi, con focus particolare sulle teorie di gauge; - una conoscenza approfondita del Modello Standard delle interazioni fondamentali a livello classico, con cenni alle sue proprietà chiave a livello quantistico; - un'introduzione ai metodi di regolarizzazione e rinormalizzazione necessari per trattare gli effetti quantistici in teorie di campo, nonché alle idee base del gruppo di rinormalizzazione; - una rigorosa introduzione alla fisica adronica e ai metodi di analisi non-perturbativa in teoria dei campi. CONOSCENZA E CAPACITÀ DI COMPrensIONE: Alla fine del corso gli studenti dovranno: - essere in grado di studiare una teoria di campo nel formalismo funzionale sia a livello classico sia con inclusione di correzioni quantistiche (almeno ad 1 loop); - aver compreso i concetti di regolarizzazione e rinormalizzazione di una teoria di campo; - aver compreso gli aspetti chiave delle ricerche recenti nel settore della fisica teorica delle interazioni fondamentali. CAPACITÀ DI APPLICARE CONOSCENZA E COMPrensIONE: Alla fine del corso gli studenti dovranno essere in grado:
----------	--



	- di calcolare le ampiezze di probabilità di processi nel Modello Standard ai primi ordini della teoria delle perturbazioni covariante; - di analizzare la teoria di campo note al livello di dettaglio necessario per fornire una solida interpretazione teorica dei risultati di recenti misure sperimentali nel campo della fisica delle particelle. - essere in grado di individuare ed analizzare gli aspetti essenziali di una nuova teoria di campo. AUTONOMIA DI GIUDIZIO: Alla fine del corso gli studenti dovranno essere in grado: - di valutare autonomamente la complessità di un progetto di ricerca nel settore della fisica teorica delle particelle elementari; - di reperire autonomamente il materiale bibliografico necessario a contestualizzare un progetto di ricerca e ad impostare un nuovo calcolo teorico nel settore; - di valutare la rilevanza e l'originalità di un nuovo risultato nel settore. ABILITÀ COMUNICATIVE: Alla fine del corso gli studenti dovranno essere in grado di comunicare la loro conoscenza delle teorie di campo relativistiche in maniera: - chiara, esaustiva e corretta; - comprensibile ad un pubblico di esperti teorici e/o sperimentali del settore; CAPACITÀ DI APPRENDIMENTO: Alla fine del corso gli studenti dovranno essere in grado di leggere e comprendere autonomamente testi avanzati ed articoli di rassegna sulla fisica teorica delle alte energie; nonché di cogliere e valutare i principali aspetti tecnici e fenomenologici delle teorie di campo oggi adottate nell'ambito della fisica delle interazioni fondamentali.
English	LEARNING OUTCOMES: <i>The students will be given in the class:</i> - <i>an introduction to the analysis methods based on symmetries in quantum field theory, with focus on gauge theories;</i> - <i>a detailed knowledge of the Standard Model of fundamental interactions at the classical level, with hints at key properties at the quantum level;</i> - <i>an introduction to the methods of regularization and renormalization that are necessary to deal with quantum effects in field theories, and to the basics of the renormalization group;</i> - <i>a rigorous introduction to hadron physics and the methods of nonperturbative analysis in field theories.</i> KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: <i>At the end of the class the students should:</i>

	- be able to study a quantum field theory in the functional formalism both at the classical level and at quantum (at least one-loop) level; - understand the concepts of regularization and renormalization; - be able to analyze the essential implications of a new quantum field theory; - be able to understand the key aspects of recent research in the field of theoretical particle physics. APPLYING KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: At the end of the class the students should be able to: - calculate probability amplitudes of processes in the Standard Model at low orders of covariant perturbation theory; - analyze a quantum field theory at the level of details needed to provide a solid theoretical interpretation of recent experimental measurements in particle physics; - find out and analyze the key aspects of a new field theory. MAKING JUDGEMENTS: At the end of the class the students should be able to: - judge the complexity of a research project in theoretical particle physics; - find all the bibliography needed to make a feasibility study of a new research project and to carry out a new theoretical calculation in particle physics; - judge the relevance and originality of a new result in theoretical particle physics. COMMUNICATION SKILLS: At the end of the class the students should be able to communicate their knowledge in theoretical particle physics: - clearly, at the required level of details, correctly; - in such a way to be comprehensible to colleagues as well as expert researchers in theoretical and/or experimental particle physics. LEARNING SKILLS: At the end of the class the students should be able to read and understand by themselves advanced textbooks and review papers about theoretical high energy physics; as well as to master the technical subtleties and the phenomenological implications of new field theories in particle physics.
--	---

PREREQUISITI

Italiano	Per sostenere l'esame di questo insegnamento occorre aver superato l'esame dell'insegnamento di TEORIA DEI CAMPI E PARTICELLE 1. Per seguire le lezioni di questo insegnamento è di aiuto avere una buona familiarità con gli argomenti trattati negli insegnamenti di Teoria dei Campi e Particelle 1, Meccanica
----------	--

	Quantistica 2, Metodi Matematici della Fisica 2, nonché negli insegnamenti di Meccanica Quantistica 1 e Metodi Matematici della Fisica 1 del corso di Laurea Triennale in Fisica.
English	<i>To be admitted to the exam it is mandatory to have passed the exam of THEORY OF PARTICLES AND FIELDS 1.</i> <i>To follow the lectures of this class it is helpful to have a good familiarity with the topics covered in the classes of Theory of Particles and Fields 1, Quantum Mechanics 2, Mathematical Methods of Physics 2, as well as in the classes of Quantum Mechanics 1 and Mathematical Methods of Physics 1 of the Bachelor course in Physics.</i>

PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

Italiano	1. Cenni di teoria dei gruppi (circa 4 ore): • gruppi di Lie non-abeliani; • concetto di rappresentazione, mappa esponenziale e generatori dell'algebra; • costanti di struttura e rappresentazione aggiunta; 2. Teorie di gauge non-abeliane (circa 6 ore): • origine geometrica del concetto di derivata covariante; • quantità gauge-invarianti scritte in termini del trasporto parallelo; • il campo di gauge e sua regola di trasformazione; • azione per il campo di gauge partendo dal trasporto parallelo su circuiti chiusi; • misura di integrazione invariante per campi di gauge; • quantizzazione di una teoria di gauge non-abeliana col metodo di Faddeev-Popov: i ghosts; 3. Teorie di gauge chirali (circa 4 ore): • diverse regole di trasformazione per fermioni left e right; • connessione gauge-covariante spazi left e right; • quantità gauge invarianti costruite in termini di ϕ_{LR}; • azione per il campo ϕ_{LR}; 4. Modello Standard delle interazioni fondamentali (circa 14 ore):
----------	--

	• campi di materia del MS: leptoni e quarks; • simmetrie di gauge del MS: $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$; • i numeri quantici dei campi di materia; • ϕ_{LR} nel MS: il campo di Higgs; • spinori di Majorana (possibile estensione del MS nel settore dei neutrini); • i termini di Yukawa nel MS; • la rottura spontanea della simmetria nel MS; • i termini di massa dei quarks e la matrice CKM; • violazione di CP nel MS; • focus sulla rottura spontanea: il teorema di Goldstone in generalità; 5. Cenni di fisica adronica (circa 6 ore): • i numeri quantici di flavour della QCD; • la classificazione degli adroni in base ai numeri quantici di flavour; • estrazione della massa di un adrone da opportune funzioni di correlazione a due punti; 6. Gruppo di rinormalizzazione (circa 14 ore): • esempio in $\lambda \phi^4$: la fisica deve essere indipendente dall'osservabile fisica usata per imparare i parametri della teoria; • schemi di rinormalizzazione intermedia: arbitrarietà solo a livello intermedio dei calcoli; • equazioni del gruppo di rinormalizzazione come condizioni sull'invarianza della fisica rispetto a scelta di scala; • schema di rinormalizzazione MS; • le beta/gamma-functions in schema MS; • analisi delle divergenze della QED mediante identità di Ward; • la beta-function per la QED: il polo di Landau; • la beta-function per la QCD: il fenomeno della libertà asintotica.
English	1. Introduction to group theory (about 4 hours): • non-abelian Lie groups; • representations of a group, the exponential map and the generators of the algebra;



- *structure constants and the adjoint representation;*
- 2. *Non-abelian gauge theories (about 6 hours):*
 - *the geometric origin of the covariant derivative;*
 - *gauge-invariant quantities built using the parallel transporter;*
 - *the gauge field and its transformation rule;*
 - *gauge field action starting from Wilson-loops;*
 - *Haar measure;*
 - *covariant quantization of a non-abelian gauge theory with the Faddeev-Popov method: the ghosts;*
- 3. *Chiral gauge theories (about 4 hours):*
 - *left and right fermions with different quantum numbers;*
 - *gauge-invariant connection of the left and right worlds, ϕ_{LR} ;*
 - *gauge-invariant quantities built with ϕ_{LR} ;*
 - *the action for the ϕ_{LR} field;*
- 4. *The Standard Model of Fundamental Interactions (about 14 hours):*
 - *matter fields in the SM: leptons and quarks;*
 - *gauge symmetries of the SM: $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$;*
 - *the quantum numbers of the matter fields;*
 - *ϕ_{LR} within the SM: the Higgs field;*
 - *Majorana spinors as possible extensions of the SM in the neutrino sector;*
 - *the Yukawa interactions within the SM;*
 - *spontaneous symmetry breaking within the SM;*
 - *the quark mass terms and the CKM matrix;*
 - *CP violation within the SM;*
 - *focus on symmetry breaking: the Goldstone theorem;*
- 5. *Introduction to hadronic physics (about 6 hours):*
 - *the flavour quantum numbers of QCD;*
 - *classification of hadrons in terms of quantum numbers;*
 - *non-perturbative calculation of the mass of an hadron by starting from a two-point correlator;*
- 6. *The renormalization group (about 14 hours):*
 - *an example in $\lambda\phi^4$: physics must not depend on the observables used to fix the parameters of the theory;*
 - *auxiliary renormalization schemes: at intermediate levels of the calculations there is some freedom to define finite quantities;*

	• <i>renormalization group equations as conditions for the independence of physics from the choice of the renormalization scale;</i> • <i>the MS scheme;</i> • <i>beta/gamma-functions in the MS scheme;</i> • <i>analysis of UV divergences in QED by using Ward identities;</i> • <i>the QED beta-function: Landau pole;</i> • <i>the QCD beta-function: asymptotic freedom.</i>
--	---

TESTI ADOTTATI E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Italiano	Testi adottati: [1] S. Weinberg, "The Quantum theory of fields. Vol. 1: Foundations," [2] S. Weinberg, "The quantum theory of fields. Vol. 2: Modern applications," [3] J. Zinn-Justin, "Quantum field theory and critical phenomena," Int. Ser. Monogr. Phys. 113 (2002) 1. [4] M. E. Peskin - D. V. Schroeder, "An introduction to Quantum Field Theory" [5] J. F. Donoghue, E. Golowitch, B. R. Holstein, "Dynamics of the Standard Model" Testi di riferimento: [A] H. Georgi, "Lie algebras in particle physics", Front. Phys. 54 (1999) 1 [B] C. Itzykson and J.B. Zuber, "Quantum Field Theory", New York, USA - McGraw Hill (1980) 705 p. (International Series in Pure and Applied Physics) [C] A. Duncan, "The conceptual framework of quantum field theory" [D] M. D. Schwartz, "Quantum Field Theory and the Standard Model" [E] S. Coleman, "Aspects of Symmetry - Selected Erice Lectures", doi:10.1017/CBO9780511565045
<i>English</i>	Adopted textbooks: [1] S. Weinberg, "The Quantum theory of fields. Vol. 1: Foundations," [2] S. Weinberg, "The quantum theory of fields. Vol. 2: Modern applications," [3] J. Zinn-Justin, "Quantum field theory and critical phenomena," Int. Ser. Monogr. Phys. 113 (2002) 1. [4] M. E. Peskin - D. V. Schroeder, "An introduction to Quantum Field Theory" [5] J. F. Donoghue, E. Golowitch, B. R. Holstein, "Dynamics of the Standard Model" Reference textbooks: [A] H. Georgi, "Lie algebras in particle physics", Front. Phys. 54 (1999) 1 [B] C. Itzykson and J.B. Zuber, "Quantum Field Theory", New York, USA - McGraw Hill (1980) 705 p. (International Series in Pure and Applied Physics) [C] A. Duncan, "The conceptual framework of quantum field theory" [D] M. D. Schwartz, "Quantum Field Theory and the Standard Model"

	[E] S. Coleman, "Aspects of Symmetry - Selected Erice Lectures", doi:10.1017/CBO9780511565045
--	--

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI SVOLGIMENTO E METODI DIDATTICI ADOTTATI

☒ In presenza ☐ A distanza

Italiano	La materia è insegnata in una serie di lezioni frontali. I calcoli espliciti sono effettuati dal docente alla lavagna e/o su dispense scritte con lo scopo di comunicare agli studenti come complessità della materia sia gestibile. L'esame finale è un colloquio orale.
English	<i>The subject is taught in a series of frontal lectures. The explicit calculations are described at the blackboard or on written notes by the teacher with the aim of demonstrating to the students how the complexity of the subject can be handled.</i> <i>The final exam is an oral interview.</i>

MODALITÀ DI FREQUENZA

☐ frequenza obbligatoria ☒ frequenza facoltativa

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI FREQUENZA

Italiano	La frequenza non è obbligatoria ma è fortemente consigliata.
English	<i>Lessons attendance is not mandatory but highly recommended.</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

Roberto Frezzotti, Nazario Tantalo, Giulia Maria de Divitiis

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ E DEI CRITERI DI VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

Italiano	Il voto finale sarà quantificato 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 final grade will be quantified according to the following criteria:</i> <i>Ineligible: imajor deficiencies and/or inaccuracy in knowledge and understanding of topics; limited analytical and synthesis skills, frequent generalizations.</i> <i>18-20: knowledge and understanding of topics only sufficient with possible imperfections; analytical skills, synthesis and judgment autonomy just sufficient.</i> <i>21-23: knowledge and understanding of topics at a basic level; Correct analysis and synthesis skills with consistent logical reasoning.</i> <i>24-26: Fair knowledge and understanding of the topics; good analytical and synthesis skills with rigorous arguments.</i> <i>27-29: Ccomplete knowledge and understanding of the topics; remarkable ability of analysis, synthesis. Good autonomy of judgment.</i> <i>30-30L: Excellent level of knowledge and understanding of topics. Remarkable ability of analysis and synthesis and autonomy of judgment. Arguments expressed in an original way</i>