

DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

TEORIA DEI CAMPI

QUANTUM FIELD THEORY

INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

A.A.	2026-2027	CdS	FISICA (LM-17)
Codice	8067476-8068911	Canale	Unico
CFU	8	Lingua	Inglese

DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Nazario Tantalo

CODOCENTE

Modulo:

OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI

Italiano	OBIETTIVI FORMATIVI: Il corso si propone di fornire agli studenti: - la conoscenza delle moderne tecniche di analisi delle teorie di campo relativistiche; - la conoscenza approfondita delle teorie di campo scalari; - la conoscenza approfondita dell'elettrodinamica quantistica; - una introduzione alle teorie di gauge non-abeliane e al Modello Standard delle interazioni fondamentali CONOSCENZA E CAPACITÀ DI COMPRENSIONE: Alla fine del corso gli studenti dovranno: - essere in grado di studiare una teoria di campo nel formalismo canonico e in quello funzionale; - aver appreso i concetti di regolarizzazione e rinormalizzazione; - essere in grado di analizzare gli aspetti essenziali di una nuova teoria di campo; - essere in grado di comprendere gli aspetti essenziali 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 sezioni d'urto dei così detti "processi elementari" in QED agli ordini più bassi della teoria delle perturbazioni covariante;
----------	--

	- di analizzare una teoria di campo al livello di dettaglio necessario per inquadrare teoricamente i risultati di recenti misure sperimentali nel campo della fisica delle particelle. 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 sperimentali del settore; CAPACITÀ DI APPRENDIMENTO: Alla fine del corso gli studenti dovranno essere in grado di comprendere autonomamente gli aspetti tecnici e fenomenologici di nuove teorie nell'ambito della ricerca teorica nella fisica delle interazioni fondamentali.
English	LEARNING OUTCOMES: <i>The students will master:</i> - the modern techniques required to analyze relativistic quantum field theories; - scalar field theories at an advanced level; - quantum electrodynamics (QED) at an advanced level; - non-abelian field theories and the Standard Model of fundamental interactions at an introductory level; KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: <i>At the end of the class the students should:</i> - be able to study a quantum field theory by using both the canonical and the functional formalism; - have mastered the concepts of regularization and renormalization; - be able to analyze the essential implications of a new quantum field theory; - be able to understand the essential aspects of new researches in the field of theoretical particle physics;

	APPLYING KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: <i>At the end of the class the students should be able to:</i> - calculate the cross-sections of the so-called "elementary processes" in QED at the leading orders of covariant perturbation theory; - analyze a quantum field theory at the level of details needed to provide a first theoretical interpretation of recent experimental measurements in particle physics; MAKING JUDGEMENTS: <i>At the end of the class the students should be able to:</i> - 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 do a new theoretical calculation in particle physics; - to judge the relevance and originality of a new result in theoretical particle physics; COMMUNICATION SKILLS: <i>At the end of the class the students should be able to communicate their knowledge in theoretical particle physics:</i> - clearly, at the required level of details, correctly; - in such a way to be comprensible to colleagues and expert researchers in theoretical and experimental particle physics; LEARNING SKILLS: <i>At the end of the class the students should be able to understand by themselves the technical subtleties and the phenomenological implications of new theories in the field of theoretical particle physics.</i>
--	---

PREREQUISITI

Italiano	Solida conoscenza della meccanica quantistica non-relativistica e dei metodi matematici della fisica
English	<i>Solid knowledge of non-relativistic quantum mechanics and of the mathematical methods of physics</i>

PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

Italiano	1. La matrice S, [1, 10] • splitting dell'Hamiltoniana: H_0 e H devono avere lo stesso spettro; • funzioni di Green causali ed operatori di Moeller;
----------	--

- espressioni esplicite per la matrice S ;
 - numeri quantici conservati nello scattering: la relazione di intertwining;
 - teoria delle perturbazioni old-fashioned: la serie di Born;
2. I campi, [1, 4, 6, 8]
- descrizione delle particelle nello spazio di Fock: algebra degli operatori di creazione e distruzione per bosoni e fermioni;
 - proprietà di trasformazione sotto Poincarè degli stati di singola particella;
 - proprietà di trasformazione sotto Poincarè degli operatori di creazione e distruzione;
 - condizioni sufficienti per avere matrice S Poincarè invariante: località e causalità;
 - la matrice S Poincarè invariante scritta in termini dei campi;
 - rates di decadimento e sezioni d'urto in teorie Poincarè invarianti;
3. Il formalismo canonico, [1, 4, 6]
- relazioni di commutazione tra campi e momenti coniugati: il caso dei bosoni e dei fermioni;
 - Hamiltoniana e Lagrangiana per teorie di campi fermionici e bosonici;
 - Le equazioni di campo per bosoni e fermioni;
4. Il formalismo funzionale, [1, 3, 4]
- derivazione dell'integrale sui cammini Minkowskiano per i bosoni partendo dal formalismo canonico;
 - derivazione dell'integrale sui cammini Euclideo per i bosoni partendo dal formalismo canonico: stessa fisica diverso andamento temporale dei correlatori;
 - connessione formale Mikowskiano–Euclideo attraverso la rotazione di Wick;
 - l'integrale funzionale fermionico;
 - le sorgenti: il funzionale generatore $Z[J]$ per il calcolo delle funzioni di Green;
5. La teoria delle perturbazioni covariante, [3, 7]
- espansione perturbativa del funzionale generatore $Z[J]$;
 - calcoli espliciti di funzioni di correlazione in teoria delle perturbazioni in $\lambda \phi^4$;

- calcoli espliciti di funzioni di correlazione nel caso fermionico;
 - deduzione delle regole di Feynman dall'espansione di $Z[J]$;
 - le funzioni di Green connesse e il funzionale $W[J]$;
6. Elementi di matrice S estratti dai correlatori, [1, 4, 6]
- polologia dei propagatori liberi sia nel caso Minkowskiano che Euclideo;
 - rappresentazione di Heisenberg e decomposizione spettrale dei correlatori;
 - il concetto di operatore interpolante e decomposizione di Kallen–Lehmann dei correlatori a due punti;
 - L'ipotesi asintotica;
 - formule di riduzione LSZ per i bosoni;
 - formule di riduzione LSZ per i fermioni;
 - verifica diagrammatica che in $\lambda \phi^4$ si ottiene lo stesso elemento di matrice S usando sia ϕ che ϕ^3 come operatore interpolante;
7. Regolarizzazione e schemi fisici di rinormalizzazione, [1, 3, 9]
- divergenze ultraviolette nello spazio delle coordinate: i campi sono distribuzioni e il prodotto di distribuzioni nello stesso punto è singolare;
 - hard–cutoff regularization;
 - il reticolo come regolatore;
 - la regolarizzazione dimensionale;
 - analisi all–orders in teoria delle perturbazioni delle divergenze ultraviolette: criterio di rinormalizzabilità da power–counting;
 - in una teoria rinormalizzabile i parametri liberi vanno fissati in termini di un egual numero di input fisici (sperimentali se la teoria deve riprodurre il mondo reale);
 - calcolo della massa fisica in $\lambda \phi^4$;
 - calcolo di Z_ϕ in $\lambda \phi^4$;
 - calcolo della sezione d'urto fisica $2 \rightarrow 2$ in $\lambda \phi^4$;
 - l'azione efficace $\Gamma[\phi]$;
 - la serie in $\hbar$ e calcolo esplicito di $\Gamma[\phi]$ all'ordine $O(\hbar)$ in $\lambda \phi^4$: le correzioni quantistiche generano tutti gli operatori permessi dalle simmetrie;

- concetto generale di teoria effettiva;

8. Equazioni di Dyson–Schwinger e Identità di Ward, [3]

- formula generica per la derivazione di equazioni di campo: i termini di contatto;
- il caso delle simmetrie: gli effetti quantistici possono rompere le simmetrie classiche (anomalie);
- formula generica per derivare le identità di Ward non anomale;

9. La QED, [1, 4, 6]

- quantizzazione di sistemi vincolati: esempio in meccanica quantistica non-relativistica;
- quantizzazione canonica della QED: il ruolo della gauge di Coulomb;
- quantizzazione covariante della QED nel formalismo funzionale mediante metodo di Faddeev–Popov;
- connessione quantizzazione covariante e canonica mediante identità di Ward;
- le regole di Feynman della QED;

10. Processi al tree-level, [1, 4, 6]

- sezione d'urto $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$;
- lo spazio delle fasi a tre corpi e il diagramma di Dalitz;
- decadimento del muone nella teoria di Fermi;

11. Cenni di teoria dei gruppi, [5]

- gruppi di Lie non-abeliani;
- concetto di rappresentazione, mappa esponenziale e generatori dell'algebra;
- costanti di struttura e rappresentazione aggiunta;

12. Teorie di gauge non-abeliane, [2, 7]

- 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; Riferimenti bibliografici [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] A. Duncan, "The conceptual framework of quantum field theory" [5] H. Georgi, "Lie algebras in particle physics," Front. Phys. 54 (1999) 1. [6] C. Itzykson and J. B. Zuber, "Quantum Field Theory," New York, Usa: Mcgraw-hill (1980) 705 P.(International Series In Pure and Applied Physics) [7] L. H. Ryder, "Quantum Field Theory," [8] M. D. Schwartz, "Quantum Field Theory and the Standard Model," [9] S. Coleman, "Aspects of Symmetry : Selected Erice Lectures," doi:10.1017/CBO9780511565045 [10] R. G. Newton, "Scattering Theory Of Waves And Particles," New York, Usa: Springer (1982) 743p
English	1. The S matrix, [1, 10] • <i>splitting of the Hamiltonian: H_0 e H must have the same spectrum;</i> • <i>causal Green functions and Moeller operators;</i> • <i>explicit expressions for the S matrix;</i> • <i>conserved quantum numbers in a scattering process: intertwining identities;</i> • <i>old-fashioned perturbation theory: the Born series;</i> 2. The fields, [1, 4, 6, 8] • <i>particles in the Fock space: creation and annihilation operators algebra for bosons and fermions;</i> • <i>Poincarè covariance of single-particle states;</i> • <i>Poincarè transformations of creation and annihilation operators;</i>



- sufficient conditions for a Poincarè invariant S matrix: locality and causality;
- the Poincarè invariant S matrix in terms of the fields;
- decay-rates and cross-sections in a Poincarè invariant theory;

3. The canonical formalism, [1, 4, 6]

- commutation relations for fields and canonical momenta: bosons and fermions;
- canonical Hamiltonian and Lagrangian for bosonic and fermionic field theories;
- The field equations for bosons and fermions;

4. The functional formalism, [1, 3, 4]

- the bosonic path-integral in Minkowski space starting from the canonical formalism;
- the bosonic path-integral in Euclidean space starting from the canonical formalism: the same physics;
- connecting Euclidean and Minkowski space with the Wick rotation;
- the fermionic path integral;
- sources: the generating functional $Z[J]$;

5. Covariant perturbation theory, [3, 7]

- perturbative expansion of $Z[J]$;
- explicit calculations of correlators in perturbation theory in $\lambda \phi^4$;
- explicit calculations of correlators in perturbation theory in fermionic theories;
- Feynman rules from the expansion of $Z[J]$;
- connected Green functions and the functional $W[J]$;

6. S matrix elements from correlators, [1, 4, 6]

- polology of free propagators in Minkowski and Euclidean times;
- Heisenberg representation and spectral decomposition of correlators;
- the concept of interpolating operator and the Kallen–Lehmann representation;
- The asymptotic hypothesis;
- LSZ reduction formulae for bosons;
- LSZ reduction formulae for fermions;
- diagrammatic proof that in $\lambda \phi^4$ the same S matrix element can be obtained by using either ϕ or ϕ^3 as interpolating operator;

7. Regularization and physical renormalization schemes, [1, 3, 9]

- ultraviolet divergences in coordinate space: arising from the fact that fields are distributions;
- hard–cutoff regularization;
- lattice regularization;
- dimensional regularization;



- all-orders perturbation theory analysis ultraviolet divergences: power-counting renormalizability criterion;
- in a renormalizable field theory the parameters must be fixed by using an equal number of physical inputs (experimental quantities if the theory is meant to reproduce the physical world);
- calculation of the physical mass in $\lambda \phi^4$;
- calculation of Z_ϕ in $\lambda \phi^4$;
- calculation of the physical cross-section $2 \rightarrow 2$ in $\lambda \phi^4$;
- the effective action $\Gamma[\phi]$;
- the series in $\hbar$ and the explicit calculation of $\Gamma[\phi]$ up to $O(\lambda \hbar)$ in $\lambda \phi^4$: quantum corrections generate all the operators allowed by the symmetries;
- the general concept of effective field theories;

8. Dyson–Schwinger equations and Ward identities, [3]

- generic derivation of field equations: the contact terms;
- symmetries: quantum corrections can break classical symmetries (anomaly);
- generic derivation of non-anomalous Ward identities;

9. QED, [1, 4, 6]

- quantization of constrained systems: an example in non-relativistic quantum mechanics;
- canonical quantization of QED: the role of the Coulomb gauge;
- covariant quantization of QED with the Faddeev-Popov method;
- connection between the canonical and covariant quantization through the Ward Identities of QED;
- QED Feynman rules;

10. Tree-Level processes, [1, 4, 6]

- the cross-section for $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$;
- the three-body phase-space and the Dalitz diagram;
- the muon decay in the Fermi theory;

11. Introduction to group-theory, [5]

- non-abelian Lie groups;
- representations of a group, the exponential map and the generators of the algebra;
- structure constants and the adjoint representation;

12. Non-abelian gauge theories, [2, 7]

- the geometric origin of the covariant derivative;
- gauge-invariant quantities built using the parallel transporter;
- the gauge field and its transformation rule;

	• <i>gauge field action starting from Wilson-loops;</i> • <i>Haar measure;</i> • <i>covariant quantization of a non-abelian gauge theory with the Faddeev-Popov method: the ghosts;</i> <i>Suggested books</i> [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," <i>Int. Ser. Monogr. Phys.</i> 113 (2002) 1. [4] A. Duncan, "The conceptual framework of quantum field theory" [5] H. Georgi, "Lie algebras in particle physics," <i>Front. Phys.</i> 54 (1999) 1. [6] C. Itzykson and J. B. Zuber, "Quantum Field Theory," New York, Usa: Mcgraw-hill (1980) 705 P.(International Series In Pure and Applied Physics) [7] L. H. Ryder, "Quantum Field Theory," [8] M. D. Schwartz, "Quantum Field Theory and the Standard Model," [9] S. Coleman, "Aspects of Symmetry : Selected Erice Lectures," doi:10.1017/CBO9780511565045 [10] R. G. Newton, "Scattering Theory Of Waves And Particles," New York, Usa: Springer (1982) 743p
--	--

TESTI ADOTTATI E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Italiano	[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," <i>Int. Ser. Monogr. Phys.</i> 113 (2002) 1. [4] A. Duncan, "The conceptual framework of quantum field theory" [5] H. Georgi, "Lie algebras in particle physics," <i>Front. Phys.</i> 54 (1999) 1. [6] C. Itzykson and J. B. Zuber, "Quantum Field Theory," New York, Usa: Mcgraw-hill (1980) 705 P.(International Series In Pure and Applied Physics) [7] L. H. Ryder, "Quantum Field Theory," [8] M. D. Schwartz, "Quantum Field Theory and the Standard Model," [9] S. Coleman, "Aspects of Symmetry : Selected Erice Lectures," doi:10.1017/CBO9780511565045 [10] R. G. Newton, "Scattering Theory Of Waves And Particles," New York, Usa: Springer (1982) 743p
English	[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," <i>Int. Ser. Monogr. Phys.</i> 113 (2002) 1. [4] A. Duncan, "The conceptual framework of quantum field theory" [5] H. Georgi, "Lie algebras in particle physics," <i>Front. Phys.</i> 54 (1999) 1. [6] C. Itzykson and J. B. Zuber, "Quantum Field Theory," New York, Usa: Mcgraw-hill (1980) 705 P. (International Series In Pure and Applied Physics) [7] L. H. Ryder, "Quantum Field Theory," [8] M. D. Schwartz, "Quantum Field Theory and the Standard Model," [9] S. Coleman, "Aspects of Symmetry : Selected Erice Lectures," doi:10.1017/CBO9780511565045 [10] R. G. Newton, "Scattering Theory Of Waves And Particles," New York, Usa: Springer (1982) 743p
--	---

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 con lo scopo di comunicare agli studenti che la complessità della materia è gestibile. L'esame finale è un colloquio orale.
English	<i>The subject is taught in a series of frontal lectures. The explicit calculations are done at the blackboard from the teacher with the aim of demonstrating to the students that it is possible to cope with the complexity of the subject.</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

Nazario Tantalo, Fabio Guglietta, Michele Buzzicotti

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>