UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

COURSE SYLLABUS

Theory and Phenomenology of Fundamental Interactions

2627-1-F1703Q055

Obiettivi

Contenuto:

- Studio degli aspetti teorici alla base del Modelllo Standard (nei suoi settori elettrodebole e forte).
- Apprendimento di tecniche di calcolo per sezioni d'urto e larghezze di decadimento.
- Approfondimento della fenomenologia delle interazioni fondamentali.

Obiettivi:
Sinteticamente, al termine del corso, lo studente avra' completato la conoscenza del settore EW del modello standard acquisita in corsi precedenti (in particolare per quanto riguarda la teoria e fenomenologia del settore di Yukawa della Lagrangiana). Inoltre conoscera' l'apparato teorico e le tecniche di calcolo della QCD perturbativa ai collisori leptonici e adronici.

Schematicamente gli obiettivi si possono suddividere in 5 categorie:

- Conoscenza e capacità di comprensione: lo studente dovrà completare lo studio dei concetti fondamentali del settore EW del modello standard e dovra' conoscere l'apparato teorico e le tecniche di calcolo della QCD perturbativa.
- Conoscenza e capacità di comprensione applicate: lo studente dovrà essere in grado di applicare le tecniche di calcolo perturbative in teoria dei campi relativistica per il calcolo di quantita' di interesse per la fenomenologia ai collisori.
- Autonomia di giudizio: lo studente svilupperà capacità critiche e di giudizio nel saper scegliere tra gli strumenti forniti a lezione quello più appropriato per la soluzione di un determinato problema specifico.
- Abilità comunicative: lo studente dovrà acquisire un linguaggio scientifico corretto e appropriato alle tematiche svolte nel corso.
- Capacità di apprendere: lo studente sarà in grado di approfondire concetti specifici, non presentati durante il corso, e di proseguire in modo autonomo nello studio avanzato su testi scientifici specializzati.

In maggiore dettaglio:

1. conoscera' il termine di Yukawa della Lagrangiana elettrodebole e gli aspetti teorici e fenomenologici rispettivi (quark mixing, CP violation)
2. sapra' discutere in modo semi-quantitativo aspetti della fenomenologia elettrodebole ai collisori e+e- e del bosone di Higgs ai collisori adronici
3. conoscera' le problematiche e i concetti fisici che emergono dai limiti soffici e collineari nell'ambito del calcolo di correzioni radiative in QCD perturbativa, anche facendo riferimento all'uso della regolarizzazione dimensionale
4. a partire dalle evidenze sperimentali, conoscera' i fondamenti del modello a partoni e i concetti fisici che emergono quando si calcolano correzioni radiative
5. sara' in grado di calcolare sezioni d'urto (o larghezze di decadimento) in tutti gli step (passare dalle regole di Feynman al calcolo dell'ampiezza quadra, calcolare lo spazio delle fasi, esprimere la cinematica usando invarianti relativistici) e commentare i risultati ottenuti.

Contenuti sintetici

Aspetti teorici del Modello Standard delle interazioni elettrodeboli e forti (SU(3)xSU(2)xU(1)) e sue applicazioni, principalmente per la fenomenologia ai collisori leptonici e adronici (passati, presenti e futuri).

Programma esteso

Richiami vari:

- rappresentazioni del gruppo di Lorentz (in particolare spinori e loro proprieta' di trasformazione)
- Teorie di gauge abeliane.
- Teorie di gauge non abeliane
- cinematica e spazio delle fasi (in 4 e in d dimensioni)
- regole di calcolo per sezioni d'urto e larghezze di decadimento
- teorema ottico

Costruzione della Lagrangiana del Modello Standard:

- Algebra di SU(N). Considerazioni su SU(2) e SU(3).
- Il settore elettrodebole del Modello Standard
    - Review rapida delle evidenze sperimentali alla base del modello SU(2)xU(1) e dei concetti di rottura spontanea della simmetria, potenziale di Higgs e conseguenti termini di massa e accoppiamenti dei bosoni vettori W e Z
    - Potenziale di Yukawa e masse dei quark e dei leptoni carichi; matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM), violazione di CP, unitary triangle (+)
    - vertici del settore elettrodebole
    - commenti vari (Landau-Yang theorem, propagatorore di un bosone vettore massivo e Breit-Wigner distribution,...)
    - Massa del bosone di Higgs, hierarchy problem, naturaleness (criterio di 't Hooft)
- Il settore forte (cromodinamica quantistica - QCD)
    - Evidenze sperimentali (modello a quark, naive parton model, necessita' del colore: R-ratio, Delta++,..)
    - Lagrangiana e vertici del settore forte
    - algebra di colore
    - somma sulle polarizzazioni (qqbar->gamma gamma vs qqbar -> gluon gluon), scelta del gauge
    - commenti vari

Calcolo di sezioni d'urto e larghezze di decadimento:

- larghezza di decadimento dei bosoni Z, W, H
- vincoli di unitarieta': esempio di violazione dell'unitarieta' nello scattering di bosoni vettori longitudinali
- dal LEP alla fenomenologia del bosone di Higgs a LHC
- produzione del bosone di Higgs in gluon fusion (+)

Richiami di rinormalizzazione:

- La rinormalizzazione dell'accoppiamento elettromagnetico e forte
- La scala di rinormalizzazione e la ?-function in QED e QCD
- La libertà asintotica in QCD
- Le equazioni del gruppo di rinormalizzazione (+)

Annichilazione elettrone-positrone in adroni al Next-to-Leading Order (NLO):

- Analisi preliminare delle possibili divergenze
- Calcolo dei contributi Born, reali e virtuali in regolarizzazione dimensionale (+)
- Spazio delle fasi
- Sezione d'urto totale e cancellazione delle divergenze (teorema KLN)

Singolarità soffici e collineari di stato finale:

- Approssimazione iconale e fattorizzazione soffice
- Fattorizzazione collineare di stato finale (FSR)
- Jet di Sterman-Weinberg come esempio di quantita' infrared-safe
- Proprieta' delle quantità infrared-safe, cenni alle variabili di forma (shape variables)

Adroni in stato iniziale:

- Deep-Inelastic Scattering (DIS) e funzioni di struttura, Bjorken scaling e "naive" parton model
- Teorema di fattorizzazione e funzioni di distribuzione partoniche (PDF)
- Singolarità soffici e collineari di stato iniziale (ISR)
- Altarelli-Parisi splitting functions
- "Improved" parton model, scala di fattorizzazione
- Le equazioni di evoluzione di Dokshitzer-Gribov-Lipatov-Altarelli-Parisi (DGLAP): interpretazione e conseguenze fenomenologiche
- Cenni a metodi di risommazione a tutti gli ordini (+)

(+) = in funzione del tempo a disposizione e dell'interesse degli studenti, alcuni di questi argomenti potrebbero essere saltati o discussi solo parzialmente.

In funzione degli interessi degli studenti, alcuni argomenti supplementari possono essere discussi. Esempi tipici:

- Masse dei neutrini, matrice di Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS), fermioni di Dirac e di Majorana
- Cinematica e fenomenologia ai collisori adronici
- Aspetti di Fisica oltre il Modello Standard (BSM)

Prerequisiti

Conoscenze base della teoria quantistica dei campi.
Familiarita' con le manipolazioni necessarie per il calcolo di ampiezze e sezioni d'urto per semplici processi in QED

(matrici di Dirac, somma su polarizzazioni e tracce,...).
In breve:

- contenuto dei corsi di Fisica Teorica 1 e 2: sostanzialmente necessario.
- contenuto del corso di Metodi matematici per la Fisica: consigliatato.

Modalità didattica

Didattica erogativa in presenza (lezioni frontali alla lavagna/tablet)

Materiale didattico

Note e lezioni varie possono essere trovate a: https://virgilio.mib.infn.it/~re

EW part: main references:

- C. Becchi and G. Ridolfi: *An Introduction to Relativistic Processes and the Standard Model of Electroweak Interactions*
- lezioni e review varie (disponibili su elearning e/o sulla pagina del docente)

QCD part: main references:

- lezioni di P. Nason, M. Mangano e altri (disponibili su elearning e/o sulla pagina del docente)
- note di alcune parti del corso prese in anni passati (disponibili su elearning e/o sulla pagina del docente)

Very useful textbooks:

- Peskin, Schroeder: *An Introduction To Quantum Field Theory*
- Schwartz: *Quantum Field Theory and the Standard Model*
- Ellis, Stirling, Webber: *QCD and collider Physics*
- Cheng, Li: *Gauge theory of elementary particle physics*
- Dissertori, Knowles, Schmelling: *Quantum Chromodynamics. High Energy Experiments and Theory*

Other references:

- T. Muta: *Foundations of Quantum Chromodynamics*
- R. D. Field: *Applications of Perturbative QCD*

Temi d'esame degli anni passati sono disponibili alla pagina web: https://virgilio.mib.infn.it/~re

Periodo di erogazione dell'insegnamento

Secondo semestre.

Modalità di verifica del profitto e valutazione

L'esame consiste in una prova orale strutturata come segue:

- il docente assegnera' una serie di esercizi a fine corso. Gli esercizi sonderanno principalmente le capacita' di calcolo di sezioni d'urto (o larghezze) o parti delle stesse in tutti gli step (passare dalle regole di Feynman al calcolo dell'ampiezza quadra, calcolare lo spazio delle fasi, esprimere la cinematica usando invarianti relativistici, etc).

- gli studenti dovranno risolvere, autonomamente e per iscritto, prima di presentarsi all'esame, tutti gli esercizi (come compiti a casa/relazioni). Nella prima parte dell'esame orale, verra' discussa una parte (a scelta del docente) di tali problemi. La discussione avverra' esaminando le soluzioni scritte presentate e commentandone i punti cruciali. In questa fase si sondera' la effettiva conoscenza delle tecniche utilizzate per la risoluzione degli esercizi, e la capacita' di commentare i risultati ottenuti.

- nella seconda parte, si procedera' con un colloquio (domande aperte) sugli argomenti teorici svolti a lezione.

Nel corso dell'anno sono previsti almeno cinque appelli d'esame, tipicamente nei seguenti periodi: gennaio, febbraio, giugno, luglio, settembre.

NB: tale modalita' d'esame e' stata applicata da giugno 2025, e continuera' anche per l'anno accademico 2026-2027

Orario di ricevimento

Previo appuntamento via email col docente.

Sustainable Development Goals

ISTRUZIONE DI QUALITÁ