

## SYLLABUS DEL CORSO

### Teoria e Fenomenologia delle Interazioni Fondamentali

2425-1-F1701Q128

---

#### Obiettivi

Contenuto:

- Studio degli aspetti teorici alla base del Modello 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 avrà 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 conoscerà l'apparato teorico e le tecniche di calcolo della QCD perturbativa ai collisori leptonici e adronici.

In maggiore dettaglio:

1. conoscerà il termine di Yukawa della Lagrangiana elettrodebole e gli aspetti teorici e fenomenologici rispettivi (quark mixing, CP violation)
2. saprà discutere in modo semi-quantitativo aspetti della fenomenologia elettrodebole ai collisori  $e^+e^-$  e del bosone di Higgs ai collisori adronici
3. conoscerà 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, conoscerà i fondamenti del modello a partoni e i concetti fisici che emergono quando si calcolano correzioni radiative
5. sarà 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 ( $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ) 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 proprietà 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  $SU(2) \times U(1)$  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, propagatore di un bosone vettore massivo e Breit-Wigner distribution,...)
- Il settore forte (cromodinamica quantistica - QCD)
  - Evidenze sperimentali (modello a quark, naive parton model, necessità del colore: R-ratio,  $\Delta_{++}$ ,...)
  - Lagrangiana e vertici del settore forte
  - algebra di colore
  - somma sulle polarizzazioni ( $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$  vs  $q\bar{q} \rightarrow g g$ ), scelta del gauge
  - commenti vari

### Calcolo di sezioni d'urto e larghezze di decadimento:

- larghezza di decadimento dei bosoni  $Z$ ,  $W$ ,  $H$
- $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$ : forward-backward asymmetry
- vincoli di unitarietà: esempio di violazione dell'unitarietà 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  $\beta$ -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 Stermann-Weinberg come esempio di quantità infrared-safe
- Proprietà 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.

Familiarità 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,...).

(contenuto dei corsi di Fisica Teorica 1 e 2: sostanzialmente necessario, contenuto del corso di Metodi matematici per la Fisica: consigliato)

### **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 assegnerà una serie di esercizi a fine corso. Gli esercizi sonderanno principalmente le capacità 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, verrà discussa una parte (a scelta del docente) di tali problemi. La discussione avverrà esaminando le soluzioni scritte presentate e commentandone i punti cruciali. In questa fase si sondererà la effettiva conoscenza delle tecniche utilizzate per la risoluzione degli esercizi, e la capacità di commentare i risultati ottenuti.
- nella seconda parte, si procederà 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 si applichera' a partire da giugno 2025**

## **Orario di ricevimento**

Previo appuntamento via email col docente.

## **Sustainable Development Goals**

ISTRUZIONE DI QUALITÀ

---