

# Programma del corso di Particelle Elementari I

## 1. Le interazioni fondamentali

- 1.1 Costituenti elementari
- 1.2 Quark e colore
- 1.3 Il colore come carica dell'interazione nucleare
- 1.4 Unità naturali
- 1.5 Interazione elettromagnetica e carica  $\alpha$
- 1.6 Le interazioni deboli
- 1.7 Generazioni di quark e leptoni
- 1.8 La gravità
- 1.9 Il punto di vista sperimentale
- 1.10 Rivelatori di particelle

## 2. Quark e simmetrie

- 2.1 Esempi di simmetrie in Fisica
- 2.2 Breve introduzione ai gruppi ed alle simmetrie
- 2.3 Il gruppo  $SU(2)$
- 2.4 rappresentazioni e loro combinazione
- 2.5 Gruppi di simmetria finiti:  $P$  e  $C$
- 2.6  $SU(2)$  e lo spin isotopico
- 2.7 Lo spin isotopico delle antiparticelle
- 2.8 Il gruppo  $SU(3)$
- 2.9 Spin isotopico e stranezza
- 2.10 Stati quark-antiquark: i mesoni
- 2.11 Stati a tre quark: i barioni
- 2.12 Momenti magnetici
- 2.13 I quark pesanti: dal charm in poi
- 2.14 Le masse degli adroni
- 2.15 Fattori di colore

## 3. Le antiparticelle

- 3.1 Cenni di meccanica quantistica non-relativistica
- 3.2 Covarianza di Lorentz e relativa notazione
- 3.3 L'equazione di Klein-Gordon
- 3.4 Una nota storica sulle equazioni relativistiche
- 3.5 L'interpretazione di Stueckelberg-Feynman delle soluzioni ad energia nega-

tiva

3.6 Teoria perturbativa non-relativistica

3.7 Regole per l'ampiezza di scattering nell'approccio di Stuckelberg-Feynman

#### 4. Elettrodinamica delle particelle prive di spin

4.1 "Elettrone" in campo elettromagnetico

4.2 Scattering elettrone-muone "senza spin"

4.3 La sezione d'urto in termini dell'ampiezza invariante  $M$

4.4 Ampiezze di decadimento

4.5 Scattering elettrone-elettrone "senza spin"

4.6 Scattering elettrone-positrone come applicazione del "crossing"

4.7 Variabili invarianti

4.8 L'origine del propagatore

4.9 Sommario

#### 5. L'equazione di Dirac

5.1 Forma covariante dell'equazione di Dirac e matrici  $\gamma$

5.2 Corrente conservata ed equazione aggiunta

5.3 Soluzioni di particella libera

5.4 Antiparticelle

5.5 Normalizzazione e relazione di completezza

5.6 Covarianti bilineari

5.7 Fermioni a massa nulla: i neutrini

#### 6. Elettrodinamica delle particelle di spin $\frac{1}{2}$

6.1 Interazione di un elettrone con il campo elettromagnetico

6.2 Scattering di Møller  $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$

6.3 Il processo  $e^-\mu^- \rightarrow e^-\mu^-$

6.4 Tracce e proprietà delle matrici  $\gamma$

6.5 Scattering  $e^-\mu^-$  ed il processo  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

6.6 Conservazione dell'elicità ad alte energie

6.7 I processi  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$

6.8 Il processo  $e^-\mu^- \rightarrow e^-\mu^-$  nel sistema del laboratorio

6.9 Fotoni e vettori di polarizzazione

6.10 Il propagatore dell'elettrone

6.11 Il propagatore del fotone

6.12 Particelle vettoriali massive

- 6.13 Fotoni reali e fotoni virtuali
- 6.14 Scattering Compton  $e^- \gamma \rightarrow e^- \gamma$
- 6.15 Annichilazione di coppie:  $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$
- 6.16 La prescrizione  $+i\epsilon$  per i propagatori
- 6.17 Le regole di Feynman per QCD

## 7. “Loop”, rinormalizzazione e costanti d’accoppiamento “running”

- 7.1 Scattering di elettroni da una carica statica
- 7.2 Correzioni di ordine più elevato
- 7.3 Il “Lamb shift”
- 7.4 Il momento magnetico anomalo
- 7.5 Le identità di Ward
- 7.6 Effetto di schermo della carica e scattering  $e^- \mu^-$
- 7.7 La rinormalizzazione
- 7.8 Effetto di schermo della carica in QED: costante di accoppiamento “running”
- 7.9 Costante di accoppiamento “running” in QCD
- 7.10 Sommario e commenti

## 8. La struttura degli adroni

- 8.1 Distribuzioni di carica e fattori di forma
- 8.2 Scattering elettrone-protone: fattori di forma del protone
- 8.3 Scattering anelastico elettrone-protone  $ep \rightarrow eX$
- 8.4 Formalismo dello scattering  $ep$
- 8.5 Scattering anelastico da elettrone come sezione d’urto totale del processo (virtuale) fotone-protone

## 9. Il modello a partoni

- 9.1 Scaling di Bjorken
- 9.2 Scaling di Bjorken e partoni
- 9.3 I quark entro il protone
- 9.4 Dove sono i gluoni?

## 10. Cromodinamica quantistica

- 10.1 Il ruolo duale dei gluoni
- 10.2 Inclusione dei processi partonici nello scattering “deep anelastico”
- 10.3 Il modello a partoni rivisitato
- 10.4 La sezione d’urto di emissione di gluoni

- 10.5 Violazioni dello scaling. L'equazione di Altarelli-Parisi
- 10.6 Produzione di coppie gluoniche
- 10.7 Equazioni di evoluzione completa per le densità partoniche
- 10.8 Interpretazioni fisica delle funzioni  $P$
- 10.9 Le tecniche di Altarelli-Parisi applicate ad elettroni e fotoni: la formula di Weizsäcker-Williams

## 11. Annichilazione $e^+e^-$ e QCD

- 11.1 Annichilazione  $e^+e^-$  in adroni:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$
- 11.2 Funzioni di frammentazione e loro proprietà di scaling
- 11.3 Circa la produzione di quark pesanti
- 11.4 Eventi a tre "jet":  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$
- 11.5 Derivazione alternativa della sezione d'urto  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$
- 11.6 Discussione degli eventi a tre "jet"
- 11.7 Correzioni di QCD al processo  $e^+e^-$  in adroni
- 11.8 QCD perturbativa
- 11.9 Un ultimo esempio: il processo di Drell-Yan

## 12. Le interazioni deboli

- 12.1 Violazione della parità e forma  $V - A$  delle correnti deboli
- 12.2 Interpretazione della costante di Fermi  $G$
- 12.3 Decadimento beta
- 12.4 Ulteriori teoremi sulle tracce
- 12.5 Decadimento del mu
- 12.6 Decadimento del pione
- 12.7 Scattering di corrente carica neutrino-elettrone
- 12.8 Scattering di corrente carica neutrino-quark
- 12.9 Prima osservazione delle correnti deboli neutre
- 12.10 Scattering di corrente neutra neutrino-quark
- 12.11 L'angolo di Cabibbo
- 12.12 Matrice di mixing di Kobayashi-Maskawa
- 12.13 Invarianza sotto  $CP$
- 12.14 Violazione di  $CP$ : il sistema dei  $K$  neutri

## 13. Le interazioni elettrodeboli

- 13.1 Isospin debole ed ipercarica
- 13.2 Struttura dell'interazione elettrodebole
- 13.3 Interazione effettiva corrente-corrente

- 13.4 Regole di Feynman per l'interazione elettrodebole
- 13.5 Scattering neutrino-elettrone
- 13.6 Interferenza elettrodebole nell'annichilazione  $e^+e^-$
- 13.7 Altri effetti osservabili dell'interferenza elettrodebole

#### 14. Simmetrie di gauge

- 14.1 Il lagrangiano e le equazioni d'onda di singola particella
- 14.2 Teorema di Noether: simmetrie e leggi di conservazione
- 14.3 Invarianza di gauge locale U(1) e QED
- 14.4 Invarianza di gauge non-abeliana e QCD
- 14.5 Bosoni di gauge massivi?
- 14.6 Rottura spontanea della simmetria: simmetria "nascosta"
- 14.7 Rottura spontanea di una simmetria di gauge globale
- 14.8 Il meccanismo di Higgs
- 14.9 Rottura spontanea di una simmetria di gauge locale SU(2)

#### 15. Il modello di Weinberg-Salam ed oltre

- 15.1 L'interazione elettromagnetica rivisitata
- 15.2 Scelta del campo di Higgs
- 15.3 Masse dei bosoni di gauge
- 15.4 Masse dei fermioni
- 15.5 Il Modello Standard: il lagrangiano finale
- 15.6 La teoria elettrodebole è rinormalizzabile
- 15.7 Grande unificazione
- 15.8 Il decadimento del protone
- 15.9 L'universo primitivo come esperimento di alta energia
- 15.10 Una più grande unificazione?

Testo consigliato:

F. Halzen and A.D. Martin, "Quarks & Leptons: An Introductory Course to Modern Particle Physics"