

# Fisica Nucleare e Subnucleare II

**Prof. Marco Rescigno**

**(a.a. 2015/2016)**

## Testi di riferimento

- Burcham and Jobes, “**Nuclear and Particle Physics**”; Pearson Prentice Hall.
- Cahn-Goldhaber, “**Experimental foundations of particle physics**”; Cambridge University Press, 2<sup>nd</sup> edition (2009).

## Programma di Esame Preliminare

### **Interazioni particelle con la materia e metodi di misura (cenni)**

Perdite di energia per ionizzazione, Bethe-Bloch, fluttuazioni di Landau, percorso residuo, particelle al minimo di ionizzazione e multiplo scattering. Radiazione Cherenkov, identificazione di particelle. Perdita di energia per elettroni, energia critica, bremsstrahlung. Interazione dei fotoni, effetto fotoelettrico, Compton, creazione di coppie. Sciami elettromagnetici e adronici. Misura di particelle cariche in campo magnetico.

**(Burcham: cap. 2: par. 1-3)**

### **Simmetrie e leggi di conservazione**

Unitarietà dell'operatore di simmetria. Generatore della trasformazione. Simmetrie continue e discrete. Numeri quantici additivi e moltiplicativi. Operatore di parità. Parità intrinseca. Invarianza di gauge e conservazione della carica. Numero barionico e leptonico. Misura della parità del  $\pi^-$ . Simmetria per coniugazione di carica. Autovalori della coniugazione di

carica del  $\gamma$ , del  $\pi^0$ , di stati di coppie particella-antiparticella (bosoni e fermioni). Cenni alla time reversal. Teorema CPT. Isospin. SU(2). Matrici di Pauli. Generatori di SU(2). Invarianza delle interazioni forti per trasformazioni di isospin. Formula di Gell-Mann Nishijima. Conseguenze dinamiche dell'invarianza di isospin: scattering nucleone-nucleone, scattering pione-nucleone, risonanza Delta.

**(Burcham: cap. 8: par. 8.1-8.10, 8.12)**

### **Spettroscopia adronica e Modello a quark**

La scoperta delle particelle strane. Produzione associata. La stranezza. Interazioni dei mesoni K carichi. Iperoni strani metastabili. Cenni al gruppo SU(3). Matrici di Gell-Mann e generatori di SU(3). Classificazione delle particelle adroniche. Grafico isospin-iper carica. Introduzione dei quark. Numeri quantici dei quark. Costruzione dell'ottetto  $0^-$  dei mesoni.

**(Burcham: cap.9: par 9.1; cap.10: par.10.1 (cenni),10.2,10.3,10.4.**

### **Il colore e la QCD**

Problemi con la simmetria della funzione d'onda della  $\Delta^{++}$ . Introduzione del colore. Iper carica di colore e di isospin di colore. Ipotesi del confinamento del colore. Gli adroni sono "bianchi". Cenni ai collider e+e-. Evidenza sperimentale del colore: rapporto R e larghezza del  $\pi^0$ . Carica di colore. I gluoni a la QCD. Il colore dei gluoni. Costante di accoppiamento forte  $\alpha_s$ . Cenni al running delle costanti di accoppiamento. Libertà asintotica della QCD. Processo di adronizzazione. Spin dei quark e scoperta del gluone..

**(Cahn-Goldhaber: cap. 10)**

### **Struttura degli adroni e modello a partoni**

Introduzione allo scattering elettrone-protone. Variabili cinematiche e quadrimpulso trasferito. Esperimento di Hofstafer. Sezione d'urto di Rutherford, di Mott e di Rosenbluth. Fattori di forma elettrico e magnetico.

Legge di scala dei fattori di forma. Fattore di forma di dipolo. Dimensione del protone. Scattering elastico elettrone-muone. Cenni all'invarianza dalla scala. Scattering anelastico elettrone-protone. Relazione tra  $Q^2$ ,  $\nu$  e  $x$ . Apparato sperimentale di Slac. Esempi di misure di sezioni d'urto anelastiche. Sezione d'urto differenziale e funzioni di struttura. Scaling di Bjorken: variabile  $x$ . Evidenze sperimentali dello scaling. Interpretazione di Feynman dello scaling: ipotesi dei partoni. Scattering elastico elettrone-partone. Funzione di distribuzione della densità dei partoni. Relazione di Callan-Gross. Quark di valenza e quark del mare. Regole di somma. Impulso trasportato dai gluoni. Processi di Drell-Yan.

**(Burcham: cap.12, par.12.1-12.7. Cahn-Goldhaber: cap. 8)**

### **Interazioni deboli**

Introduzione al decadimento beta. Decadimenti di Fermi e di Gamow-Teller. Interazione puntiforme di Fermi. Interazione vettore-vettore. Costante di Fermi. Regola di Sargent. Generalizzazione della teoria di Fermi. Associazione tra tipi di corrente e covarianti bilineari. Spettro di energia dell'elettrone nel decadimento beta. Interazione V e A. Particelle strane:  $\tau$ - $\theta$  puzzle. Determinazione della parità dello stato a 2 pioni e a 3 pioni. Teoria a due componenti del neutrino. Proiettore di elicità. Misura dell'elicità del neutrino: esperimento di Goldhaber. Interazione V-A. Universalità delle interazioni deboli. Vita media del muone. Rapporti di decadimento (B.R.). Interazione corrente-corrente delle interazioni deboli. Violazione dell'unitarietà della teoria puntiforme di Fermi. Introduzione del bosone W. Propagatore del W. Relazione tra  $M_W$  e  $G_F$ . Relazione tra carica debole e carica elettrica. Angolo di Weinberg. Decadimento del pione carico (senza il calcolo della larghezza parziale). Vita media del pione. Confronto tra il BR in elettrone e quello in muone. Elicità del muone e dell'elettrone. Decadimento del K carico in muone. Rapporti tra i decadimenti del K e del pione. Angolo di Cabibbo. Organizzazione delle particelle in doppietti di isospin. Decadimento del K neutro in coppia di muoni. Corrente neutra con cambiamento di stranezza. Effetto GIM. Introduzione del quark charm. Modello spettatore. Matrice CKM e cenni alla misura del modulo dei suoi elementi.

**(Burcham: cap.5: par.5.2, cap. 11: par.11.1, 11.2,11.3.2,11.5,11.6,11.8-11.12 ; cap.10 :par.10.7.1,10.7.3. Cahn-Goldhaber: cap. 6)**

## **Scoperta del quarkonio e della terza famiglia di fermioni**

Scoperta della  $J/\Psi$ . Esperimenti a BNL e SLAC. Misura delle proprietà della  $J/\Psi$ . Regola di OZI e  $\alpha_s$  running. Open charm. Scoperta del leptone tau. Scoperta della Ypsilon. Quarkonium states.

**(Cahn-Goldhaber cap. 9)**

## **Il sistema dei mesoni K neutri e violazione di CP**

Il sistema dei K neutri. Produzione del  $K^0$  e anti- $K^0$ . Autostati di CP:  $K^0_1$  e  $K^0_2$ . Decadimenti del  $K^0_1$  in  $\pi\pi$  e del  $K^0_2$  in  $\pi\pi\pi$ . Vite medie. Oscillazioni di stranezza. Diagramma di Feynman per l'oscillazione. Interazioni dei  $K^0$  e degli anti- $K^0$  con la materia. Determinazione di  $\Delta m$ . Rigenerazione dei  $K^0_1$ . Esperimento di Cronin e Fitch sulla violazione di CP. Violazione di CP dei  $K^0_L$ . Violazione diretta e indiretta. Introduzione dei  $K^0_S$  e  $K^0_L$ . Introduzione dei parametri della violazione di CP  $\eta_{+-}$  e  $\eta_{00}$ . Decadimenti semileptonici del  $K^0_L$ . Introduzione del parametro  $\delta I$ . Definizione operativa del segno della carica elettrica. Violazione diretta di CP. Elementi di matrice per le transizioni  $\Delta I=1/2$  e  $\Delta I=3/2$ . Introduzione del parametro  $\epsilon'$ . Introduzione del doppio rapporto per la misura di  $\epsilon'$ . Condizioni per il mescolamento dei mesoni neutri.

**(Burcham: cap.11: par.11.13; consultare anche Cahn-Goldhaber cap. 7)**

## **Il mixing e la violazione di CP nei mesoni neutri**

Evoluzione temporale per i mesoni neutri con sapori pesanti. Effetti della differenza di massa e della differenza di vita media: fenomenologia delle oscillazioni nei  $D^0$ ,  $B^0$  e  $B_s$ . Il tagging del flavour iniziale dei mesoni. La violazione di CP nel mixing, nell'interferenza con il mixing e violazione di CP diretta. Misure sperimentali a LHC e alle B-factories e relazione con i parametri della matrice CKM. Rilevanza per la ricerca di nuova fisica.

**(Cahn-Goldhaber cap. 15; slide del seminario dott. Dorigo e referenze li' contenute)**

### **Teorie di Gauge e Modello Standard.**

Teorie di gauge. Invarianza di gauge locale: QED. Campi di Yang-Mills. Modello di Glashow- Weinberg-Salam. Rottura spontanea di una simmetria discreta. Potenziale  $\lambda\phi^4$ . Rottura spontanea di una simmetria continua: teorema di Goldstone. Meccanismo di Higgs. Meccanismo di Higgs applicato al modello GWS. Angolo di mixing debole  $\theta_w$ . Massa dei bosoni. Massa dei fermioni. Bosone di Higgs. Struttura a doppietti delle particelle nel Modello Standard. Corrente carica puramente levogira. Corrente e.m. Corrente neutra di SU(2). Corrente neutra di ipercarica debole. Relazione di Gell-Mann Nishijima per l'isospin debole e l'ipercarica debole. Numeri quantici per leptoni e quark. Interazioni nel modello SU(2) $\times$ U(1). Introduzione dei W carichi. Introduzione del fotone e dello Z. Accoppiamento del fotone. Struttura delle correnti deboli neutre. Accoppiamento vettoriale e assiale dello Z. Cenni alla rinormalizzazione ed al running delle costanti di accoppiamento.

**(Burcham: cap.13: par.13.1,13.5,13.6)**

### **Correnti neutre e prime misure di $\sin^2(\theta_w)$**

Scoperta delle correnti deboli neutre in camera a bolle. Scattering su nucleoni e su elettroni. Le correnti neutre e la misura di  $\sin^2(\theta_w)$ . Il rapporto neutral current su charged current (NC/CC). L'esperimento CHARM e la misura di  $\sin(\theta_w)$  dal rapporto di reazioni di corrente neutra su elettroni per neutrini e anti-neutrini. Asimmetrie avanti-indietro nel processo  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  a energie del centro di massa minori di  $M_Z$ .

**(Burcham: cap.14 : par.14.1,14.3.1,14.3.2,14.3.3, 14.3.6,14.3.4)**

### **Produzione di W e Z ai collider adronici e leptonic.**

Produzione dello Z e del W al collider SPPS. Collisioni protone-protone e protone-antiprotone, generalità: variabili cinematiche, underlying event e

minimum bias (cenni), espressione generale per le sezioni d'urto. Scoperta di W e Z a SppS, misura di elettroni, muoni e del momento trasverso mancante. Picco Jacobiano, massa trasversa. Misure di precisione della massa del bosone W: motivazioni; misura alla soglia di produzione nelle annichilazioni e+e-; misura tramite ricostruzione diretta a Lep2; misura ai collider adronici, CDF. Misura della larghezza di decadimento del bosone W. Polarizzazione dei bosoni W ai collider adronici, verifica dello spin del bosone W, impatto sulla determinazione delle pdf dei quark, asimmetrie leptoniche a Tevatron (protone-antiprotone) e a LHC (protone-protone). Determinazione del mare strano con W+charm (cenni).

**(Burcham: cap.14 : par. 14.3.8, 14.4.7, 14.4.8. Cahn-Goldhaber cap.12. Su MW: LEP EWK Working Group, "Electroweak Measurements in Electron-Positron Collisions at W-Boson-Pair Energies at LEP": <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/2/lep2rep.pdf> ; CDF collaboration, <http://www-cdf.fnal.gov/physics/ewk/2012/wmass/>)**

### **Misure di precisione elettro-deboli a LEP/SLD**

Il collider e+e- LEP. Misura della massa e delle larghezze parziali e totale dello Z. Misura dell'energia del fascio con la tecnica della depolarizzazione risonante. Misura della luminosità, scattering Bhabha a piccolo angolo. Correzioni radiative QED. Misura del numero di famiglie di neutrini leggeri: diretta, indiretta, dalla cosmologia. Sezioni d'urto differenziali, asimmetrie e la misura di  $\sin^2(\theta_W)$ . Decadimenti del leptone tau e polarizzazione. Cenni alle correzioni radiative elettro-debole e misura indiretta della massa del quark top e del bosone di Higgs.

**(Lep Final Results: Physics Reports: Volume 427 Nos. 5-6 (May 2006) 257-454 <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/1/>**

**Articolo di Review su EWK precision measurement a Lep: M. Grunewald, [Physics Reports, Volume 322, Issues 3-4 \(1999\), pp. 125-346](#)**

**Ricerca del bosone di Higgs, scoperta a LHC, misura delle proprieta' e prospettive.**

La ricerca a LEP. Sezioni d'urto di produzione ai collider adronici. Decadimenti del bosone di Higgs nel Modello Standard. La scoperta a LHC. Decadimenti in due bosoni. Misura di massa e larghezza. Determinazione di Spin Parità. Decadimenti in due fermioni. Determinazione degli accoppiamenti. Esempi di interpretazione dei risultati in modelli oltre il Modello Standard (BSM).

**“A Massive Particle Consistent with the Standard Model Higgs Boson observed with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider”:** Science 338 (2012) 1576-1582: <http://inspirehep.net/record/1223730>

**“Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”:** Phys.Lett. B 716 (2012) 1-29: <http://inspirehep.net/record/1124337>

**“Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”:** Phys.Lett. B716 (2012) 30-61: <http://inspirehep.net/record/1124338>

**The CMS Collaboration , “Evidence for the direct decay of the 125 GeV Higgs boson to fermions”** Nature Physics 10, 557–560 (2014) <http://www.nature.com/nphys/journal/v10/n8/full/nphys3005.html> )