

**Programma del Corso di Fisica Nucleare**  
**Anno Accademico 2014 - 2015**  
**Prof. Annalisa D'Angelo**  
**Prof. E.Pace**

**Lunedì 6 Ottobre 2014**

1. Introduzione al corso e scambio di informazioni con gli studenti. Introduzione alla fisica adronica. Strumenti teorici: modelli. I costituenti fondamentali della materia ed i mediatori delle interazioni fondamentali. Proprietà delle Interazioni fondamentali.
2. Classificazione delle particelle in base alle loro interazioni. Leptoni. Quark. Particelle mediatrici. Potere risolutivo di una particella. Lunghezza d'onda di De Broglie. Unità di misura fondamentali nella fisica adronica. Impulso minimo di una particella necessario a sondare un nucleone.

**Martedì 7 Ottobre 2014**

3. Potere risolutivo di una particella. Diffusione di elettroni e confronto tra esperimenti di diffusione e osservazioni al microscopio. Diffusioni elastiche ed anelastiche di particelle su bersagli.
4. Relazioni cinematiche per diffusione elastica tra particelle relativistiche. Massa mancante e massa invariante nelle reazioni nucleari. Sezione d'urto geometrica su un centro diffusore e su più centri diffusori.

**Lunedì 13 Ottobre 2014**

5. Sezione d'urto di una reazione: definizione e misura. Luminosità nell'interazione di un fascio incidente su un bersaglio fisso. Esempi.
6. Luminosità nell'interazione tra due fasci collidenti. Luminosità integrata. Esempi numerici.

**Martedì 14 Ottobre 2014**

7. La spettroscopia adronica. Particelle stabili ed instabili per interazione forte e risonanze adroniche. Formazione di risonanze e processi di diffusione. Formalismo in onde parziali. Ampiezza di diffusione e sezione d'urto.
8. Variazione di ampiezza e fase dell'onda diffusa da un potenziale statico espanso in onde parziali. Sezione d'urto elastica differenziale e totale. Sezione d'urto parziale elastica e condizioni di risonanza. Diffusione da sfera rigida. Diffusione anelastica ed assorbimento.

### Lunedì 20 Ottobre 2014

9. Espansione delle onde parziali in prossimità della risonanza. Formula di Breit e Wigner. Decadimento e vita media di una particella con energia complessa. Significato della parte immaginaria dell'energia di una particella. Collegamento con il concetto di risonanza.
10. Generalizzazione al caso anelastico. Elasticità ed anelasticità della risonanza. Ampiezza di diffusione e sezione d'urto dei canali anelastici. Introduzione ai diagrammi di Argand.

### Martedì 21 Ottobre 2014

11. Correlazione tra parte reale ed immaginaria dell'ampiezza di diffusione e diagrammi di Argand. Reazioni elastiche e cerchio unitario. Condizioni di risonanza.
12. Inelasticità e condizioni di risonanza sui diagrammi di Argand. Esempi di risonanze barioniche. Diffusione pione-nucleone e risonanze barioniche. Ampiezza di spin-flip e di non-spin-flip.

### Lunedì 27 Ottobre 2014

13. Diffusione pione-nucleone e risonanza Delta. Risultati sperimentali della sezione d'urto differenziale della reazione di diffusione di un pione + su protone. Andamento dei coefficienti di sviluppo dell'ampiezza di diffusione e parametri della risonanza Delta: energia e larghezza.
14. Le risonanze della seconda e terza regione delle risonanze. Spettroscopia mesonica. Spazio delle fasi di  $n$  particelle. Densità degli stati dello spazio delle fasi relativistico. Caso di spazio delle fasi invariante per due e tre corpi. Dalitz plots e risonanze mesoniche.

### Martedì 28 Ottobre 2014

15. Dalitz plots e risonanze mesoniche. Esempi: il mesone  $\rho$ , i mesoni  $\eta$  ed  $\omega$  ed il mesone pesante  $\eta_c$ . Simmetrie unitarie e modello a quark: il gruppo  $SU(3)$ . I Generatori di  $SU(3)$  nella rappresentazione di Gell-Mann. Costanti di struttura.
16. Isospin, Ipercarica e Stranezza nello spettro dei barioni. Le matrici  $F$ . Operatori di innalzamento e abbassamento dell'Isospin, dell'U-Spin e del V-Spin. Le rappresentazioni di  $SU(3)$ . La rappresentazione fondamentale di  $SU(3)$ .

### Lunedì 3 Novembre 2014

17. Azione degli operatori d'innalzamento ed abbassamento sugli stati delle rappresentazioni irriducibili. Diagramma dei pesi. Dimensionalità delle rappresentazioni irriducibili. Il modello a quark ed interpretazione degli stati fondamentali come i quark leggeri.
18. Prodotto di rappresentazioni di SU(3):  $3 \otimes \bar{3}$ ,  $3 \otimes 3$ ,  $3 \otimes 6$ ,  $3 \otimes 3 \otimes 3$ . Ottetto nonetto e decupletto. Stati qq(bar) e mesoni nel modello a quark. Spin e parità dei mesoni. Mesoni pseudo-scalari, mesoni vettori e mesoni scalari.

### Martedì 4 Novembre 2014

19. C – parità e mesoni nel modello a quark. Barioni nel modello a quark. Considerazioni sulla simmetria della funzione d'onda e necessità di introdurre lo spazio di colore. L'ottetto ed il decupletto dei barioni. Il singoletto di colore.
20. Conseguenze dell'introduzione della simmetria SU(3) di colore. Confinamento e libertà asintotica. Masse nel modello a quark: rottura di simmetria di sapore e modello di Gell-Mann.

### Lunedì 10 Novembre 2014

21. Proprietà dell'U-Spin e multipletti a carica costante. Termine di rottura di simmetria di sapore ed ipercarica. Applicazione degli operatori d'innalzamento ed abbassamento dell'U-Spin e dell'isospin all'ottetto dei barioni. Formula della massa.
22. Formula della masse di Gell-Mann ed Okubo per i barioni e per i mesoni. Mixing tra gli stati di singoletto di isospin. Angolo di mixing nell'ottetto dei mesoni pseudoscalari e nell'ottetto dei mesoni vettori. Modello a quark costituenti: termine di confinamento, termine di scambio di gluoni e contributo spin-spin.

### Martedì 11 Novembre 2014

23. Interazione iperfine. Lo spettro barionico. La funzione d'onda di SU(3) dal protone e momento magnetico. Momenti magnetici dei barioni. I quark pesanti: la scoperta della particella  $J/\Psi$ . La regola OZI ed il decadimento della  $J/\Psi$ . Il charmonio ed il bottonio.
24. La struttura interna degli adroni. Diffusione elastica Coulombiana. Cinematica dell'urto elastico. Sezione d'urto di Rutherford in approssimazione non relativistica in funzione del tri-impulso trasferito e su carica estesa.

### Lunedì 24 Novembre 2014

25. Sezione d'urto di diffusione elastica coulombiana su carica estesa e sonda dotata di spin. Sezione d'urto di Mott senza rinculo del bersaglio. Fattori di forma. Fattori di forma: costante, dipolare, gaussiana ed oscillante e relative distribuzioni di carica. Diffusione da una sfera omogenea di raggio  $R$ . Dimensioni dei nuclei leggeri e medio-pesanti:  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{12}\text{C}$ . Raggio quadratico medio.
26. Parametrizzazione della distribuzione di carica dei nuclei non-leggeri. Sezione d'urto di Mott con rinculo del bersaglio. Sezione d'urto di Rutherford in forma non-relativistica ed in forma relativistica.

### Martedì 25 Novembre 2014

27. Diffusione di elettroni su muoni. Tensore di corrente di elettroni e muoni. Teoremi delle tracce. Elemento di matrice al quadrato, mediato sugli spin dello stato iniziale e sommato sugli spin dello stato finale.
28. Introduzione della densità degli stati finali e determinazione della sezione d'urto differenziale di diffusione elastica elettrone-muone. Integrazione rispetto all'energia dell'elettrone diffuso. Variabili cinematiche  $Q^2$  e  $\tau$ . Espressione finale della sezione d'urto differenziale.

### Lunedì 1 Dicembre 2014

29. Momento magnetico anomalo dei nucleoni. Diffusione elastica di elettroni su nucleoni. Quadrivettore di corrente del protone e fattori di forma elastici. Sezione d'urto differenziale. Fattori di forma di Sachs elettrico e magnetico. Sezione d'urto di Rosenbluth. Determinazione dei fattori di forma elastici elettrico e magnetico tramite separazione di Rosenbluth.
30. Fattori di forma dipolari del nucleone. Raggio quadratico medio del nucleone. Diffusione anelastica di elettrone su nucleone. Dipendenza dalle variabili  $Q^2$  e  $\nu$ . Diffusione elastica ed anelastica sui nuclei e nucleoni ed evoluzione della sezione d'urto differenziale all'aumentare di  $Q^2$ . Evidenza dell'esistenza di costituenti interni. Diffusione profondamente anelastica.

### Martedì 2 Dicembre 2014

31. Funzioni di struttura. Scaling delle funzioni di struttura. Modello a partoni di Bjorken. Relazione tra le funzioni di struttura e la frazione di impulso dei partoni nei nucleoni. Relazione di Callan-Gross. Verifica sperimentale della relazione di Callan-Gross. Interpretazione del modello di Bjorken: sistema di riferimento di Breit. Modello a partoni e modello a quark.
32. Funzioni di struttura. Scaling delle funzioni di struttura. Modello a partoni di Bjorken. Relazione tra le funzioni di struttura e la frazione di impulso dei partoni nei nucleoni. Relazione di Callan-Gross. Verifica sperimentale

della relazione di Callan-Gross. Interpretazione del modello di Bjorken: sistema di riferimento di Breit. Modello a partoni e modello a quark.

### **Martedì 9 Dicembre 2014**

- 33.** Sezione d'urto differenziale e totale della diffusione neutrino-elettrone. Rapporto tra le sezioni d'urto neutrino-elettrone e antineutrino-elettrone. Diffusione neutrino partone. Introduzione della variabile cinematica  $y$ . Correnti deboli nella diffusione neutrino-partone.
- 34.** Sezione d'urto della diffusione neutrino/antineutrino su quark/antiquark. Sezione d'urto neutrino-nucleone in funzione delle variabili  $Q^2$  e  $\nu$ . Trasformazione della sezione d'urto neutrino-nucleone in funzione di  $y$  ed  $x$ . Funzioni di struttura e carica frazionaria dei quark. Confronto con i risultati sperimentali.

### **Lunedì 22 Dicembre 2014**

- 35.** Funzioni di distribuzione dei quark. Numero dei quark di valenza e regole di somma. Regola di somma di Gross-Llewellyn-Smith. Distribuzioni di impulso dei singoli quark di valenza e del mare. Integrale del contributo di impulso portato dai quark e contributo residuo attribuito ai gluoni. Violazioni di scala. Contributi delle correzioni radiative. Fattori di forma del pione e del kaone. Dipendenza monopolare e raggio quadratico medio dei mesoni.
- 36.** Distribuzioni partoniche nella QCD: previsioni teoriche e dati sperimentali. Modello a partoni con spin. Sezione d'urto di diffusione profondamente anelastica di elettroni polarizzati su nucleoni polarizzati. Funzioni di struttura polarizzate  $g_1(x)$  e  $g_2(x)$  e distribuzione di spin dei quark. Regola di somma di Bjorken e confronto con i dati sperimentali. Regola di somma di Ellis e Jaffe.

### **Martedì 23 Dicembre 2014**

- 37.** Il contenuto di spin dei nucleoni. La funzione di struttura polarizzata  $g_2(x)$  e sua determinazione sperimentale. Regola di somma di Burkhart e Cottingham. Misura delle sezioni d'urto: conteggi Caso della diffusione anelastica esclusiva. Caso della diffusione anelastica inclusiva. Apparat sperimentali: SLAC. La sala A di SLAC.
- 38.** Lo spettrometro da 1,6 GeV : magneti e relativi rivelatori. Lo spettrometro da 8 GeV di SLAC: magneti e relativi rivelatori. Lo spettrometro da 20 GeV di SLAC: magneti e relativi rivelatori. Focalizzazione orizzontale parallelo-punto. Focalizzazione verticale punto-punto.

### Lunedì 12 Gennaio 2015

39. Gli apparati sperimentali per la misura delle sezioni d'urto polarizzate inclusive. La Spin Muon Collaboration al Cern. I bersagli polarizzati. Il fascio di muoni polarizzati. Lo spettrometro SMC. Il tracciamento dei muoni incidenti. Lo spettrometro in avanti. Il polarimetro. Misura della polarizzazione del fascio. Il bersaglio di butanolo polarizzato dinamicamente. Gli esperimenti E142, E143, E154, E155 a SLAC.
40. Teoria dei bersagli polarizzati. Nuclei in campo magnetico. Il magnetone nucleare ed il rapporto giromagnetico. Campo magnetico costante e frequenza di Larmor. Descrizione classica di un nucleo in campo magnetico. Dipolo magnetico rotante attorno ad un campo magnetico costante. Transizioni tra livelli dell'Hamiltoniana di un nucleo in campo magnetico costante generato da un campo magnetico oscillante

### Martedì 13 Gennaio 2015

41. Magnetizzazione di un campione macroscopico. Interazione spin-spin e interazione spin-reticolo. Magnetizzazione all'equilibrio termico. La legge di Curie. Equazioni fenomenologiche della magnetizzazione: equazioni di Bloch. Tempi di rilassamento longitudinale e trasversale. Risonanza Magnetica Nucleare e suscettività magnetica complessa.
42. Soluzione stazionaria: relazione tra suscettività magnetica complessa, legge di Curie e suscettività statica. Apparati sperimentali per la risonanza magnetica nucleare. Metodo a bobina singola e metodo a bobina doppia. Metodo ad onda continua e bobine incrociate per la misura della polarizzazione di un bersaglio. Apparati sperimentali per la misura della polarizzazione.

### Mercoledì 14 Gennaio 2015

43. Nuclei come insiemi di nucleoni interagenti con interazioni a due corpi. Variabili da cui può dipendere l'interazione. Spin isotopico; operatore di proiezione di isospin. Principio di Pauli generalizzato. Spin isotopico di un nucleo. Multipletti di spin isotopico. Invarianza dell'hamiltoniana per traslazioni, rotazioni spaziali, riflessioni nello spazio e nel tempo e per rotazioni nello spazio dell'isospin.
44. Operatori di scambio di Bartlett, di Heisenberg e di Majorana. Quantità conservate per il più generale potenziale centrale. Forze nucleari non centrali. Forma generale di un operatore tensoriale. Media dell'op. tensoriale sulle direzioni. Quantità conservate per un operatore tensoriale. Forma generale dell'inter. centrale, di scambio e tensoriale.

## xx Gennaio 2015

45. Potenziale spin-orbita e quantità conservate. Classificazione degli stati di due nucleoni, pari e dispari, di singoletto e di tripletto. Raggio di azione delle forze nucleari. Numeri quantici del deutone. Funzione d'onda del deutone per un potenziale a buca quadra; relazione tra raggio e profondità delle buca. Inesistenza di stati eccitati per il sistema n-p. Dipendenza del potenz. dallo spin. Conservazione dello spin negli urti.
46. Urti di particelle prive di spin a bassa energia. Forma asintotica della f. d'onda di diff. stazionaria. Ampiezza di diff.; decomp. in autostati di momento ang. orbitale. Flusso entrante e uscente. Sezione d'urto differ. e totale. Sfasamenti. Sfasamento in onda S. Sezione d'urto teorica e sperimentale ad energia zero. Livello virtuale del sistema n-p nello stato  $S=0$ . Sez. d'urto di singoletto e di tripletto. Media statistica.

## xx Gennaio 2015

47. Lunghezza di diffusione e sfasamento ad energia zero. Significato della lunghezza di diffusione. Teoria del raggio efficace. Indipendenza del raggio efficace dall'energia per energie piccole. Raggio efficace di singoletto e di tripletto. Determinazione dei parametri di bassa energia dalla diffusione contro protoni liberi e contro idrogeno molecolare.
48. Teoria dello pseudopotenziale di contatto per la diffusione di neutroni da idrogeno molecolare. Operatori di proiezione di singoletto e di tripletto. Diffusione da para- e da orto-idrogeno. Diffusione p-p; lunghezza di diffusione e raggio efficace. Ampiezza di diffusione in presenza di potenziale nucleare e pot. Coulombiano. Invarianza e simmetria del potenziale nucleare rispetto alla carica.

## xx Gennaio 2015

49. Sezioni d'urto differenz. in appross. di Born nel sistema del centro di massa. Forze di scambio di Majorana. Op. momento magnetico per un nucleone e per un nucleo. Nuclei speculari. Teorema di Sachs. Calcolo del momento magnetico del deutone: verifica dell'impossibilità di ottenere il valore sperim. con una combinazione di stati  $3P_1$  e  $1P_1$ . Probabilità di onda D per una combinazione di stati  $3S_1$  e  $3D_1$ .
50. Stato fondamentale del deutone con forze non centrali; espressione di Rarita-Schwinger. Equaz. differenziali accoppiate per le componenti radiali della funzione d'onda del deutone. Condizioni asintotiche all'infinito e nell'origine. Momento di quadrupolo elettrico del deutone: calcolo dei contributi di onda S e D e di interferenza. Stima del raggio di azione delle forze tensoriali.

**xx Gennaio 2015**

- 51.** Caratteristiche generali dell'andamento radiale del potenz. nucleare. Nociolo repulsivo. Modelli fenomenologici e semiteorici dell'interazione nucleare. Teoria non relativistica del nucleo. Interazione mediata da un campo bosonico. Potenziale di Yukawa. Potenziale di scambio di un pione.
  
- 52.** Interazione non locale ed interazione dipendente dall'impulso. Sezioni d'urto n-p e p-p in funzione dell'energia e dell'angolo di diffusione. Sezioni d'urto anelastiche. Invarianza isotopica. Sezioni d'urto per  $T=0$  e  $T=1$ .