

- **Introduzione**

1. Stima il valore delle energie dei fotoni necessarie per risolvere distanze atomiche, e poi nucleari.
2. Per quali ragioni fisiche le interazioni fondamentali sono state storicamente identificate secondo la sequenza: gravitazionale, elettromagnetica ed infine le interazioni nucleari forte e debole?

- **L'atomo nucleare**

1. Quali ipotesi riguardanti il proiettile e il bersaglio sono necessarie per ottenere la sezione d'urto di Rutherford ?
2. Nell'analisi semiclassica dell'esperimento di Rutherford il parametro d'impatto delle particelle α usate come proiettili è legato all'angolo di diffusione dalla relazione

$$b = K \frac{1}{2E} \frac{\cos \theta/2}{\sin \theta/2}$$

dove E rappresenta l'energia cinetica della particella α , e K è:

$$K = \frac{e^2 2Z}{4\pi\epsilon_0}$$

con Z il numero di protoni del bersaglio. Perché Rutherford si aspettava angoli di diffusione di pochi archi di grado, contrariamente a quanto osservato? Alcune particelle α venivano deflesse anche di 180° . Ricorda che $e^2/4\pi\epsilon_0 = 1.44 \text{ MeV fm}$, e considera $E = 1 \text{ MeV}$ e $Z = 50$.

3. Nella figura 1 è mostrata la sezione d'urto per la reazione $^{16}\text{O} + ^{58}\text{Ni}$. Fino a circa 50° la sezione d'urto segue un andamento proporzionale a $\sin^4 \theta/2$, come previsto dalla formula di Rutherford. Per valori più grandi di θ la sezione d'urto presenta delle oscillazioni. Spiega le ragioni di questo diverso comportamento. In altre parole, quale delle ipotesi necessarie per ottenere la sezione d'urto di Rutherford non è più soddisfatta per $\theta > 50^\circ$?

- **Processi di diffusione**

1. Qual'è la definizione operativa di sezione d'urto e come è legata all'ampiezza di transizione e alla densità degli stati finali?

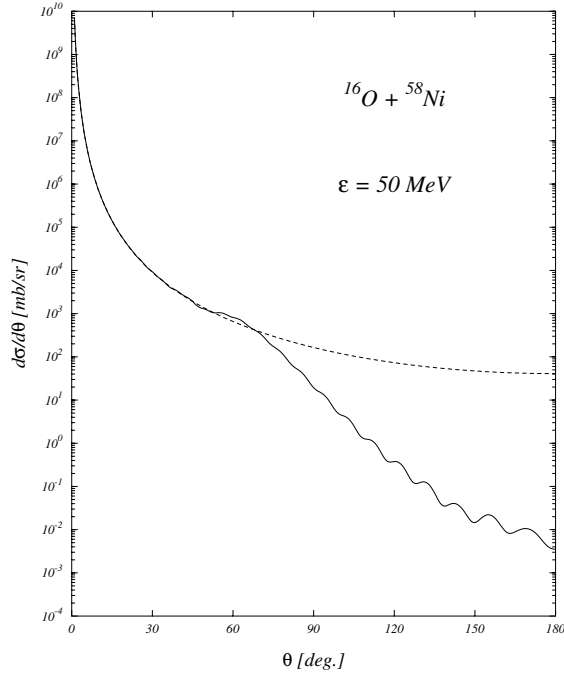


Figura 1:

2. Qual'è la differenza tra diffusione elastica ed anelastica.
3. Come si definisce il Q-valore di una reazione?
4. Qual'è l'andamento asintotico della funzione d'onda diffusa da un potenziale? Come è legata alla sezione d'urto?
5. Cos'è lo sfasamento della funzione d'onda diffusa da un potenziale centrale a corto raggio e come è legato alla sezione d'urto?
6. Nei processi d'urto il potenziale Coulombiano può essere considerato a corto raggio? Come si esprime l'ampiezza di transizione in presenza di potenziali Coulombiano e nucleare?
7. In un processo di diffusione è sempre presente una sezione d'urto elastica? E una sezione d'urto anelastica? È possibile la contemporanea presenza di processi elastici ed anelastici?
8. Per quali valori dello sfasamento asintotico si hanno condizioni di diffusione risonante?

9. Qual'è l'espressione di Breit-Wigner della sezione d'urto, e quando si osserva empiricamente?
10. Come si ottiene l'espressione della regola d'oro di Fermi utilizzando il primo ordine della teoria delle perturbazioni dipendenti dal tempo.
11. Come si può esprimere la densità degli stati di una particella libera confinata in una scatola quadrata di lato L con condizioni al contorno periodiche?

• **Dimensioni dei nuclei**

1. Che tipo di andamento hanno le densità di carica dei nuclei? Confronta in un disegno le densità di un nucleo leggero e uno più pesante (ad es. ^{12}C e ^{208}Pb).
2. Qual'è l'ordine di grandezza dell'energia degli elettroni usati in processi di diffusione per lo studio dei nuclei atomici? Perché?
3. Un fascio di elettroni di energia ϵ_i diffonde da un bersaglio nucleare di massa M . L'energia degli elettroni rivelati ad un angolo di diffusione θ è ϵ_f . Utilizzando unità naturali ($\hbar = c = 1$), e considerando l'approssimazione ultra-relativistica ($m_e \ll \epsilon$):
 - a) calcolare $|\mathbf{q}|$, il modulo del momento trasferito al nucleo,
 - b) identificare per quale valore di θ il valore di $|\mathbf{q}|$ è massimo,
 - c) nel caso b), e per un processo elastico, calcolare l'energia cinetica di rinculo del bersaglio.
4. Il fatto che il valore delle distribuzioni di carica al centro del nucleo non subisca grosse variazioni per tutti i nuclei con $A > 10$ è utilizzato per inferire una proprietà dell'interazione forte. Di quale proprietà si tratta? Qual'è la relazione tra questa proprietà e l'osservazione fatta sopra?
5. Nello studio della struttura nucleare che vantaggi presentano le sonde elettromagnetiche, soprattutto fotoni ed elettroni, rispetto a quelle adroniche?
6. Quali ipotesi riguardanti il proiettile e il bersaglio sono necessarie per ottenere la sezione d'urto di Mott? Quali sono le ipotesi che differiscono da quelle necessarie per ottenere la sezione d'urto di Rutherford?

7. Che procedimento si usa per estrarre le distribuzioni di carica dei nuclei dai dati di sezione d'urto elastica elettrone-nucleo?
8. La sezione d'urto di diffusione elastica di elettroni su muoni nel sistema del laboratorio è:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = f_{rec}\sigma_M \left[1 + 2\frac{\mathbf{q}^2 - \omega^2}{4M^2} \tan^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

dove f_{rec} è un fattore che considera il rinculo del bersaglio, σ_M la sezione d'urto di Mott, \mathbf{q} il trimomento trasferito, e ω l'energia persa dall'elettrone. Che tipo di processi descrive la sezione d'urto di Mott? Quali sono le ipotesi che portano alla sua espressione? Perché nel caso in questione la sezione d'urto di Mott è corretta dalla presenza del secondo termine tra parentesi quadre?

• Masse nucleari

1. Come viene definita l'unità di massa atomica?
2. Lo spettrometro di massa è utilizzabile solo per misure con nuclei stabili. Com'è possibile misurare le masse di nuclei instabili?
3. In una misura di massa nucleare con lo spettrometro di massa è noto R_1 , il raggio di curvatura dello ione di massa M_1 e carica Z_1 , usato per calibrare lo strumento. Mostrare come sia possibile ottenere il valore incognito M_2 della massa del nucleo con carica nota Z_2 , misurando il raggio di curvatura R_2 . Nota che l'energia cinetica dei nuclei, quando entrano nella zona dello spazio in cui è presente il campo magnetico è ZeV , dove V è il potenziale elettrostatico e Ze la carica del nucleo.

• Energia di legame

1. Definisci l'energia di legame di un sistema di molti corpi.
2. Disegna schematicamente e commenta l'andamento delle energie di legame per nucleone in funzione di A per nuclei con $A > 10$.
3. Discuti l'interpretazione fisica dei termini che compongono la formula-semiempirica della massa di Bethe-Weissecker.

• Isospin

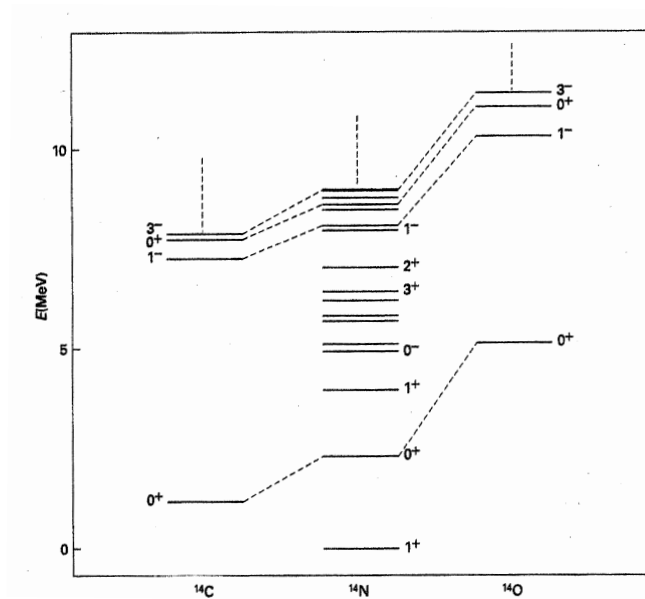
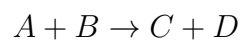


Figura 2:

1. La figura 2 è utilizzata per dedurre che l'isospin è un numero quantico che si comporta come un momento angolare. Spiega come si raggiunge questa conclusione.

- **Stabilità nucleare**

1. Definisci il Q-valore della reazione:



2. Qual'è la legge che descrive il decadimento di N nuclei in funzione del tempo?
3. Qual'è la condizione necessaria perchè un nucleo possa decadere?
4. Come sono legate vita media e costante di decadimento di un nucleo instabile? Dimostra la relazione tra le due quantità utilizzando le loro definizioni.

5. L'analisi di una roccia mostra che è composta da due isotopi dello stesso elemento. Un isotopo è stabile mentre l'altro decade con vita media τ . Nota la percentuale degli isotopi radioattivi rispetto a quelli stabili, determinare l'età della roccia ipotizzando che, nel momento della sua formazione il numero di nuclei radioattivi fosse uguale a quello dei nuclei stabili.
6. La tavola degli isotopi mostra che la valle di stabilità si trova attorno alla linea $Z=N$, per nuclei con $A \leq 40$. Per nuclei più pesanti la stabilità si ottiene solo quando si ha $N > Z$. Qual'è l'origine fisica di questo comportamento?

• **Decadimento α**

1. Descrivi lo spettro di emissione dei nuclei di ${}^4\text{He}$ provenienti da un decadimento α .
2. Un nucleo pari-pari, con spin J_i e parità P_i , decade α nello stato fondamentale del nucleo figlio, con spin J_f e parità P_f . Quali sono i valori di J_i , P_i , J_f , P_f e del momento angolare orbitale relativo L tra particella α e nucleo figlio. Perché?
3. Quali sono le considerazioni che indicano nell'effetto tunnel il meccanismo responsabile del decadimento α ?

• **Decadimento β**

1. Schematizza in un disegno e descrivi lo spettro di emissione di elettroni da un decadimento β in funzione della loro energia.
2. Il decadimento

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

è energeticamente proibito. Com'è possibile che molti nuclei decadano β^+ ?

3. La cattura elettronica è un processo in competizione con il decadimento β^+ del nucleo. Calcola il Q -valore per entrambi i processi e identifica quello energeticamente più favorevole.
4. Utilizzando la formula semi-empirica della massa identificare il valore di Z del nucleo stabile per un insieme di isobari pari-dispari.

• **Decadimento γ**

1. Quali sono i multipoli permessi per una transizione dallo stato iniziale con momento angolare e parità 3^- ad uno con 1^+ . Quali sono i più probabili?
2. Classifica le seguenti transizioni elettromagnetiche, caratterizzate dal loro momento angolare e dalla parità, secondo la tradizionale distinzione tra transizioni elettriche e magnetiche. Ordinale secondo probabilità decrescente.

$$4^- ; 10^+ ; 6^- ; 7^+ ; 2^- ; 2^+ ; 3^- ; 5^-$$