

Esercizi consigliati

Versione del 30 agosto 2024.

Versione provvisoria. Si prega di inviare segnalazione di errori o richieste di chiarimenti ad uno dei docenti.

Gruppo 0: prerequisiti e co-requisiti

- 0.1 Calcolare (in eV) l'energia elettrostatica fra due elettroni posti a distanza di 1fm
- 0.2 Quanto valgono, in unità MKSA e negli altri sistemi di misura comunemente utilizzati, le costanti: c , ϵ_0 , μ_0 , e , \hbar ?
- 0.3 Quanto vale, entro il 5%, la costante $\hbar c$ in MeV-fm ?
- 0.4 Quanto vale, entro il 5%, la costante di struttura fine (α)?
- 0.5 Quanto valgono, entro il 10%, la massa dell'elettrone e del protone (in MKSA e in MeV/ c^2)?
- 0.6 Dire se la differenza fra la massa del neutrone e la somma della massa del protone e dell'elettrone sia: i) circa 1 MeV; ii) circa 100 MeV; iii) circa 1GeV; iv) negativa
- 0.7 Quanto è l'ordine di grandezza dell'energia media di legame di un elettrone all'interno di un atomo?
- 0.8 Calcolare il tempo impiegato dalla luce ad attraversare un atomo di idrogeno oppure un protone
- 0.9 Calcolare la forza gravitazionale fra due protoni a distanza di 1fm e confrontarla con la forza elettrostatica
- 0.10 Calcolare il numero di elettroni contenuti in 1g di Piombo, 1g di acqua, 1g di aria a temperatura e pressioni normali.
- 0.11 Definire il tensore metrico $g_{\mu\nu}$
- 0.12 Dare la definizione di 4-vettore covariante e controvariante
- 0.13 Definire il prodotto scalare di due 4-vettori
- 0.14 Definire il modulo di un 4-vettore
- 0.15 Definire il tempo proprio e dare la relazione differenziale fra tempo proprio e tempo nel sistema in cui si osserva il moto
- 0.16 Fornire un esempio del "paradosso dei gemelli"
- 0.17 Definire la 4-velocità e la 4-accelerazione di un punto materiale
- 0.18 Dimostrare che 4-accelerazione e 4-velocità sono perpendicolari
- 0.19 Scrivere le trasformazioni di Lorentz per il boost lungo un asse (asse x)
- 0.20 Scrivere la legge di trasformazione di Lorentz del campo elettrico e del campo magnetico (distinguendo fra componenti parallele e componenti perpendicolari al "boost")
- 0.21 Dare la definizione di invariante di Lorentz
- 0.22 Definire quando una certa legge fisica è scritta in forma "relativisticamente covariante".
- 0.23 Definire le derivate in 4-dimensioni, la quadridivergenza, il differenziale di uno scalare di Lorentz, l'operatore di D'Alembert
- 0.24 Definire un tensore covariante di rango 2 ed un tensore controvariante di rango 2
- 0.25 Definire la traccia di un tensore di rango 2
- 0.26 Dare la definizione di tensore antisimmetrico di rango 2 ed indicare quali dei suoi elementi siano le componenti di un vettore polare e quali quelle di un vettore assiale tridimensionale
- 0.27 Spiegare la differenza fra le seguenti categorie di fotoni: infrarossi – visibili –ultravioletti – raggi X – raggi γ .
- 0.28 Spiegare la differenza fra ottica fisica ed ottica geometrica
- 0.29 Esprimere tutte le relazioni fra campo elettrico, magnetico e direzione di propagazione di un'onda e.m. piana.
- 0.30 Dare la definizione di onda piana e.m. monocromatica e delle seguenti quantità: ampiezza, frequenza angolare, vettore d'onda, frequenza, periodo, lunghezza d'onda. Scrivere le relazioni esistenti fra le grandezze sopra definite.

- 0.31 Definire la polarizzazione di un'onda e.m.
- 0.32 Definire la relazione di dispersione, la velocità di fase e la velocità di gruppo per un'onda e.m. e spiegarne il loro significato fisico.
- 0.33 In un sistema Oxyz scrivere l'espressione del campo elettrico e del campo magnetico di un'onda e.m. piana monocromatica, polarizzata linearmente lungo y e che si propaga lungo x, sia utilizzando il formalismo reale, sia utilizzando il formalismo complesso.
- 0.34 Enunciare e spiegare il principio di Huygens.
- 0.35 Esprimere la densità di energia di un'onda e.m. piana in funzione dei campi elettrico e/o magnetico
- 0.36 Dare la definizione ed esprimere il vettore di Poynting di un'onda e.m. piana in funzione del campo elettrico e/o magnetico.
- 0.37 Esprimere la pressione (di radiazione) che un campo e.m. esercita su una superficie piana.
- 0.38 Dare la definizione di interferenza e diffrazione; di interferenza costruttiva e distruttiva.
- 0.39 Definire l'impedenza del vuoto, e chiarire il suo significato fisico.

$$\vec{E} = \left[\frac{q}{R^2} \frac{\hat{n} - \vec{\beta}}{\gamma^2 (1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta})^3} + \frac{q}{Rc} \frac{\hat{n} \wedge [(\hat{n} - \vec{\beta}) \wedge \dot{\vec{\beta}}]}{(1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta})^3} \right]_{r=t-R/c}$$

- 0.40 Spiegare il significato di tutti i termini dell'espressione generato da una carica puntiforme in moto arbitrario. Dire quanto vale il campo magnetico associato.
- 0.41 Siano date le definizioni 'standard' delle variabili \hat{n} , $\vec{\beta}$, \vec{R} , \vec{r} , \vec{r}' , t , e t' inerenti l'irraggiamento di una carica puntiforme. Spiegare con chiarezza il significato di tutti i termini delle seguenti relazioni: $\frac{dt}{dt'} = 1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta}$, $\frac{d\vec{R}}{dt'} = -\vec{\beta}c$, $\frac{d\vec{R}}{dt'} = -\hat{n} \cdot \vec{\beta}c$, $\frac{d(\vec{R} \cdot \vec{\beta})}{dt'} = -\beta^2 c + \vec{R} \cdot \dot{\vec{\beta}}$, $\vec{\nabla} R = \frac{\hat{n}}{1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta}}$, $\vec{\nabla} t' = \frac{-\hat{n}/c}{1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta}}$. Procedere infine alla dimostrazione delle precedenti relazioni.
- 0.42 Definire - in CGS e in MKSA - per un sistema di cariche e correnti elettriche: i) momento di dipolo elettrico; ii) momento di quadrupolo elettrico; iii) momento di dipolo magnetico

$$P = \frac{2}{3} \frac{q^2}{c^3} \gamma^6 \left(|\vec{a}|^2 - |\vec{a} \wedge \vec{\beta}|^2 \right)$$

- 0.43 Spiegare il significato di tutti i termini della formula di Larmor relativistica
- 0.44 Data l'espressione $P = \frac{2}{3c^3} \ddot{p}_a^2 + \frac{1}{180c^5} \ddot{Q}_{ij}^2 + \frac{2}{3c^3} \ddot{p}_m^2$ (espressa in CGS) che descrive la potenza irraggiata da un sistema di cariche e di correnti, definirne le condizioni di applicabilità e spiegare il significato e l'unità di misura di ogni grandezza fisica ivi indicata; trascrivere infine tale espressione in MKSA.
- 0.45 Definire la lunghezza d'onda di DeBroglie e calcolarne il valore numerico per un elettrone di energia 1keV.
- 0.46 Quale è l'ipotesi di Bohr su cui è basato il modello semiclassico dell'atomo di idrogeno?
- 0.47 Utilizzando il modello semiclassico di Bohr, calcolare i livelli energetici di un atomo idrogenoide; quindi calcolare (in eV) l'energia del livello n=3 di ${}^4\text{He}^+$.
- 0.48 Quanto vale il raggio classico dell'elettrone e quali sono invece le informazioni sulle sue dimensioni reali?

.....

Gruppo 1: Elettromagnetismo avanzato

- 1.1 Dare la definizione di quadri-corrente e di quadri-potenziale del campo elettromagnetico.
- 1.2 Dare la definizione del tensore del campo elettromagnetico e scriverne le componenti.
- 1.3 Scrivere le equazioni di Maxwell (sia quelle non omogenee che quelle omogenee) in forma covariante. Dimostrare che da esse si ricavano le equazioni di Maxwell nella forma standard tridimensionale.
- 1.4 Scrivere l'equazione di continuità per la quadri-corrente in forma covariante e verificarne la consistenza con le equazioni di Maxwell.
- 1.5 Dare la definizione di "gauge di Lorenz" e di "gauge di Coulomb".

- 1.6 Dato il campo elettrico di un'onda progressiva monocromatica nel vuoto $\vec{E} = (E_0 \cos(kz - \omega t), 0, 0)$ trovare una espressione possibile per il 4-potenziale A^μ e specificare il gauge utilizzato. Riformulare e risolvere il problema in un sistema di riferimento in moto relativo lungo l'asse z .
- 1.7 Sull'asse z di un sistema di coordinate dato, si trova una densità di carica lineare uniforme λ che si muove con velocità V lungo z . Trovare l'espressione della 4-corrente j^μ , ed una espressione possibile per il 4-potenziale A^μ , specificando il gauge utilizzato. Riformulare e risolvere il problema in un sistema di riferimento in moto relativo lungo l'asse z .
- 1.8 Trovare un possibile 4-potenziale vettore $A^\mu = (A^0, \vec{A})$ per un solenoide di altezza infinita, raggio a , n spire per unità di lunghezza, percorso da una corrente costante I . Calcolare $\partial_\mu A^\mu$ e $\vec{\nabla} \cdot \vec{A}$. Discutere la possibilità di annullare il potenziale vettore in ogni punto esterno al solenoide.
- 1.9 Ricavare esplicitamente le leggi di trasformazione di Lorentz del campo elettrico e del campo magnetico e dire quali sono gli "invarianti di Lorentz" che si possono costruire con il tensore del campo elettromagnetico. Discutere i casi in cui, in un certo sistema di riferimento inerziale, il campo magnetico o il campo elettrico è nullo.
- 1.10 Scrivere le equazioni di Maxwell per i quadri-potenziali nel "gauge di Lorentz" e nel "gauge di Coulomb", presentando alcune situazioni pratiche in cui sia conveniente utilizzare l'uno o l'altro gauge.
- 1.11 Una carica elettrica Q si muove con velocità costante su una retta con velocità costante: $x = Vt, y = b, z = 0$. Calcolare in funzione del tempo il campo elettrico ed il campo magnetico generato dalla carica nel punto O e produrre il grafico di ognuna delle 6 componenti trovate in funzione del tempo t .
- 1.12 dare la definizione di "densità di forza di Lorentz".
- 1.13 Scrivere il "tensore energia-impulso" del campo elettromagnetico (in funzione del tensore del campo elettromagnetico) e scrivere la sua relazione con la "densità di forza di Lorentz".
- 1.14 Calcolare la traccia del "tensore energia-impulso" del campo elettromagnetico.
- 1.15 Dire come dal "tensore energia-impulso" si possano individuare le seguenti grandezze fisiche: densità di energia elettromagnetica, densità di flusso di energia elettromagnetica, densità di volume di impulso elettromagnetico, densità di flusso di impulso elettromagnetico.
- 1.16 A partire dall'espressione del tensore energia impulso in funzione del tensore del campo elettromagnetico F_ν^μ ricavarne le componenti in funzione dei campi elettrico e magnetico \vec{E} e \vec{B} .
- 1.17 Enunciare la generalizzazione del teorema di Poynting
- 1.18 Calcolare tutte le componenti del tensore energia-impulso per un condensatore piano in condizioni statiche e utilizzarlo per calcolare la forza per unità di superficie sulle armature.
- 1.19 Calcolare tutte le componenti del tensore energia-impulso per un solenoide in condizioni stazionarie e utilizzarlo per calcolare la forza per unità di superficie sulla sua superficie.
- 1.20 Scrivere il tensore degli sforzi per un'onda e.m. piana che si propaga in una direzione \hat{n} con densità di energia u_{em} .
- 1.21 Scrivere esplicitamente il 4-tensore impulso-energia per un'onda e.m. piana monocromatica che si propaga lungo l'asse x con densità di energia u_{em} .

$$\vec{E} = \left[\frac{q}{R^2} \frac{\hat{n} - \vec{\beta}}{\gamma^2 (1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta})^3} + \frac{q}{Rc} \frac{\hat{n} \wedge [(\hat{n} - \vec{\beta}) \wedge \vec{\beta}]}{(1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta})^3} \right]_{r' = t - R/c}$$

- 1.22 Spiegare tutti i termini dell'espressione inerente il campo elettrico generato da una carica puntiforme in moto arbitrario. Dire quanto vale il campo magnetico associato.

$$\vec{E} = \left[\frac{q}{R^2} \frac{\hat{n} - \vec{\beta}}{\gamma^2 (1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta})^3} + \frac{q}{Rc} \frac{\hat{n} \wedge [(\hat{n} - \vec{\beta}) \wedge \vec{\beta}]}{(1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta})^3} \right]_{r' = t - R/c}$$

- 1.23 A partire dall'espressione per il campo elettrico generato da una carica puntiforme in moto arbitrario, dimostrare che $\frac{dP}{d\Omega} = \frac{q^2 |\vec{a}|^2}{16\pi^2 \epsilon_0 c^3} \frac{1}{(1 - \beta \cos \theta)^3} \left(1 - \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \phi}{\gamma^2 (1 - \beta \cos \theta)^2} \right)$ è la potenza (MKSA) irradiata da una carica in moto circolare in funzione dell'angolo di emissione.
- 1.24 Si consideri una carica accelerata in moto non relativistico. Si calcolino la distribuzione angolare e la potenza totale della radiazione emessa.
- 1.25 Dimostrare che $\vec{F}_{rad} = \frac{2q^2}{3c^3} \dot{\vec{a}} = z^2 m_e \tau_e \dot{\vec{a}}$, con $\tau_e = \frac{2q^2}{3c^3} \dot{\vec{a}} = 6.2 \cdot 10^{-24} s$ è la forza di reazione radiativa ed indicare il campo di applicazione di questa formula.

- 1.26 Dopo avere calcolato l'energia persa in una rivoluzione per una carica in moto uniforme su una circonferenza (acceleratore circolare), calcolare la frazione di energia persa in un giro rispetto alla sua energia cinetica. Effettuare una valutazione numerica, nel caso di elettroni a LEP (energia 50 GeV, raggio ~ 4 km) o protoni ad LHC (energia 7 TeV, raggio ~ 4 km).
- 1.27 Spiegare tutti i termini dell'espressione $\frac{dI_\omega}{d\Omega} = \frac{q^2}{4\pi^2 c} \left| \int \frac{\hat{n} \wedge [(\hat{n} - \vec{\beta}) \wedge \dot{\vec{\beta}}]}{(1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta})^2} e^{i\omega(t' - \hat{n} \cdot \vec{r}'/c)} dt' \right|^2$ per la funzione di distribuzione dell'energia irradiata da una carica puntiforme in moto arbitrario.
- 1.28 Dimostrare che $\frac{dI_\omega}{d\Omega} = \frac{q^2}{4\pi^2 c} \left| \int \frac{\hat{n} \wedge [(\hat{n} - \vec{\beta}) \wedge \dot{\vec{\beta}}]}{(1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta})^2} e^{i\omega(t' - \hat{n} \cdot \vec{r}'/c)} dt' \right|^2$ è l'energia per unità di angolo solido e di frequenza irradiata da una carica accelerata in funzione dell'angolo di emissione. Mostrare come da questa formula si ritrovi che per un moto oscillatorio armonico a basse velocità l'emissione di radiazione avviene alla sola frequenza di oscillazione.
- 1.29 Calcolare la distribuzione in frequenza della radiazione emessa da una carica puntiforme che da ferma passa ad una velocità $c/10$ in 10^{-20} sec. con una accelerazione costante. Si effettui una approssimazione non relativistica e si valuti, anche in modo molto approssimato, la bontà dell'approssimazione effettuata.

.....

Gruppo 2: Indagini della materia con onde elettromagnetiche

- 2.1 Dimostrare che un elettrone non relativistico soggetto a una forza elastica di richiamo, ad una forza di attrito viscoso ed alla forza di reazione radiativa, nel campo di un'onda e.m. armonica piana polarizzata linearmente oscilla con la

$$\text{legge } \vec{x} = \frac{e\vec{E}_0}{m_e} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma_{tot}} e^{-i\omega t} \quad \text{con } \Gamma_{tot} = \Gamma + \Gamma \frac{\omega^2}{\omega_0^2}.$$

- 2.2 Descrivere qualitativamente il fenomeno dell'assorbimento, il fenomeno della diffusione elastica ed il fenomeno della diffusione inelastica di un'onda e.m. su un sistema
- 2.3 Per un'onda e.m. monocromatica che incide su un bersaglio (per esempio un circuito o un atomo) definire le sezioni d'urto: i) di assorbimento, ii) elastica differenziale, iii) totale elastica; iv) inelastica differenziale; v) inelastica totale; vi) totale.
- 2.4 Definire la ampiezza di scattering per un'onda e.m. monocromatica che incide su un bersaglio fisso (per esempio un circuito o un atomo).
- 2.5 Definire la "resistenza di irraggiamento" di un circuito elettrico a una maglia e fornire un esempio.
- 2.6 Calcolare la "resistenza di irraggiamento" di un circuito elettrico quadrato di lato L , investito da una radiazione monocromatica di lunghezza d'onda λ molto grande rispetto ad L . Il circuito è puramente resistivo con resistenza R . Si calcoli poi l'ampiezza di scattering elastico, la sezione d'urto di assorbimento e la sezione d'urto elastica, nel caso in cui l'onda incidente abbia il campo magnetico perpendicolare al piano del circuito e di modulo massimo B_0 .
- 2.7 Spiegare il significato e indicare l'unità di misura di ogni grandezza fisica nelle seguenti formule:

$$\frac{d\sigma_{el}}{d\Omega} = r_e^2 \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_{tot}^2} \sin^2 \alpha, \quad \frac{d\sigma_{el}}{d\Omega} = r_e^2 \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_{tot}^2} \frac{1 + \cos^2 \theta}{2},$$

$$\sigma_{el} = \sigma_{Th} \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_{tot}^2}, \quad \sigma_{TOT} = 4\pi r_e^2 \frac{\omega^2 \Gamma_{tot}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_{tot}^2} \quad \text{con } \sigma_{Th} = \frac{8}{3} \pi r_e^2 = 0.66 \text{ barn}$$

inerenti l'interazione di un'onda e.m. piana e monocromatica su un elettrone legato elasticamente.

- 2.8 Dimostrare che la sezione d'urto differenziale elastica per un'onda e.m. piana, monocromatica e polarizzata linearmente su un elettrone legato elasticamente vale $\frac{d\sigma_{el}}{d\Omega} = r_e^2 \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_{tot}^2} \sin^2 \alpha$ con α angolo fra la direzione di osservazione e direzione di polarizzazione. Dimostrare che se l'onda è non polarizzata la sezione d'urto vale $\frac{d\sigma_{el}}{d\Omega} = r_e^2 \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_{tot}^2} \frac{1 + \cos^2 \theta}{2}$ con θ angolo (di scattering) fra la direzione di osservazione e direzione dell'onda incidente.
- 2.9 Dimostrare che la sezione d'urto elastica per un'onda e.m. piana e monocromatica su un elettrone legato elasticamente vale $\sigma_{el} = \sigma_{Th} \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_{tot}^2}$ con $\sigma_{Th} = \frac{8}{3} \pi r_e^2$. Dimostrare che, in prossimità di una risonanza stretta (specificare il criterio), si può approssimare con una curva lorentziana: $\sigma_{el} = \sigma_{Th} \frac{\omega_0^2/4}{(\omega_0 - \omega)^2 + (\Gamma + \Gamma')^2/4}$

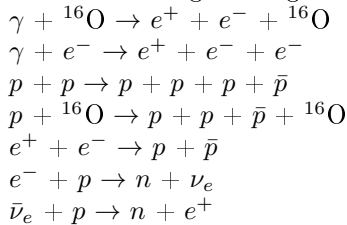
- 2.10 Dimostrare che la sezione d'urto totale per un'onda e.m. piana e monocromatica su un elettrone legato elasticamente vale $\sigma_{TOT} = 4\pi r_e c \frac{\omega^2 \Gamma_{tot}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_{tot}^2}$
- 2.11 Dimostrare che un elettrone (moto non relativistico) soggetto ad una forza elastica di richiamo, ad una forza di attrito viscoso ed alla forza di reazione radiativa, se viene lasciato libero di oscillare da una posizione iniziale perde energia con una legge esponenziale in cui la costante tempo vale $\frac{1}{\Gamma + \Gamma'}$. Come si chiama questa costante tempo? Quale sarebbe la costante tempo con cui, invece, si smorza l'ampiezza delle oscillazioni?
- 2.12 Definire il fattore di forma, giustificando le motivazioni di una tale definizione, per un'onda elettromagnetica che effettua uno scattering elastico su sistema.
- 2.13 Calcolare il fattore di forma elettromagnetico per una sfera uniformemente carica di raggio a .
- 2.14 Calcolare il fattore di forma per una superficie sferica uniformemente carica di raggio a . [nota: l'interno è vuoto]
- 2.15 Spiegare come dalla misura del fattore di forma si possano determinare le dimensioni del bersaglio, con particolare riferimento al raggio quadratico medio della distribuzione di carica.
- 2.16 Data un'onda elettromagnetica di frequenza nota che incide su un bersaglio esteso, determinare quali angoli nel sistema del laboratorio debbano essere coperti dalla strumentazione (che rivela l'onda scatterata) per ottenere una misura del raggio quadratico medio del sistema precisa entro il 10%.
- 2.17 Ricavare la sezione d'urto Rayleigh in funzione della sezione d'urto differenziale Thomson e del fattore di forma atomico $F(\theta)$
- 2.18 Con riferimento ai grafici delle sezioni d'urto $\gamma + C$ e $\gamma + Pb$ (reperibili negli appunti), si spieghi il rapporto a bassa energia fra le sezioni d'urto Rayleigh dei due processi.
- 2.19 Spiegare qualitativamente l'effetto fotoelettrico e lo scattering Compton, indicandone le differenti caratteristiche
- 2.20 Ricavare la relazione tra angolo di scattering e cambio di frequenza nell'effetto Compton
- 2.21 Dare l'espressione ed il valore numerico della lunghezza d'onda Compton.
- 2.22 Con riferimento ai grafici delle sezioni d'urto $\gamma + C$ e $\gamma + Pb$ (reperibili negli appunti), si spieghi il rapporto fra i massimi delle sezioni d'urto Compton dei due processi.
- 2.23 Cercando i dati nelle apposite figure o tabelle si calcolino il valore (o i limiti) dell'energia degli elettroni emessi nello stato finale della reazione $\gamma + C$ per energie del fotone incidente pari a: 1keV, 10keV, 100keV, 1MeV, 10MeV.
- 2.24 Spiegare qualitativamente il fenomeno della creazione di coppie e^+e^- da parte di un raggio γ che incide su un atomo. Dimostrare che l'energia di soglia del processo di produzione su nuclei o su elettroni atomici si può ottenere con un semplice calcolo di relatività speciale.
- 2.25 Con riferimento ai grafici delle sezioni d'urto $\gamma + C$ e $\gamma + Pb$ (reperibili negli appunti), si spieghino i rapporti ad alta energia fra le sezioni d'urto di produzione di coppie e^+e^- dei due processi su nuclei e su elettroni atomici.
- 2.26 Si calcoli l'ampiezza di scattering di un'onda elettromagnetica da una apertura in uno schermo opaco oppure da un ostacolo opaco complementare all'apertura. (vedi "principio di Babinet")
- 2.27 Applicare il teorema ottico nei casi particolari di: (i) diffrazione da una apertura; (ii) diffusione su elettrone legato elasticamente; (iii) diffusione su una piccola spira piana puramente resistiva.
-

Gruppo 3: Metodi di indagine tramite processi di urto o tramite decadimenti spontanei; introduzione alle strutture sub-atomiche e sub-nucleari

- 3.1 Definire le quantità che in un nucleo usualmente si indicano con A, Z, N (simbologia ${}_Z^AX_N$). Dare la definizione di nuclei isotopi, isobari, isotoni, stabili, instabili. Scrivere nella simbologia ${}_Z^AX_N$ le seguenti particelle: protone, deutone, particella alfa.
- 3.2 Dopo avere definito l'unità di massa atomica e avere dato il suo valore in MeV/ c^2 , definire l'energia di legame (B) di un atomo ed il "difetto" ["eccesso" in alcuni testi] di massa (Δ) di un atomo.
- 3.3 Enunciare la formula semiempirica $B = B(A, Z)$ ed indicare i suoi termini che sono spiegati dal modello a goccia. Spiegare le ipotesi su cui tale modello è basato e fornire l'ordine di grandezza dell'energia media di legame di un nucleone all'interno di un nucleo.

- 3.4 Calcolare l'energia di configurazione di una sfera uniformemente carica ed applicare il risultato per stimare il coefficiente a_C della formula semiempirica di massa.
- 3.5 Quali sono le informazioni che si possono dedurre sulle caratteristiche dell'interazione nucleare osservando l'andamento delle energie di legame dei nuclei in funzione di A ? Quali sono le differenze principali con il caso dell'interazione tra gli elettroni in un atomo?
- 3.6 Per gli urti fra due particelle definire le sezioni d'urto: elastica, inelastica, totale, e "di estinzione". Fornire alcuni esempi.
- 3.7 Per gli urti fra due particelle definire quando l'urto è osservato in maniera inclusiva o esclusiva, fornendo alcuni esempi.
- 3.8 Definire il Q -valore di un processo e i processi esotermici o endotermici.
- 3.9 Definire numero barionico (B) e numeri leptonici (L).
- 3.10 Dare la definizione operativa della grandezza fisica denominata "densità di corrente (di particelle)" oppure "rateo di fluenza" oppure "densità di flusso (di particelle)".
- 3.11 Definire la sezione d'urto nei seguenti casi:
- particella singola su bersaglio singolo;
 - particelle incidenti su un unico bersaglio [dati: densità di corrente di particelle incidenti; frequenza di eventi osservati]
 - sottile fascio di particelle incidenti su una lastra contenente i bersagli dati: flusso di particelle incidenti, densità superficiale dei bersagli, frequenza di eventi osservati]
 - urti nel volume fra particelle di due specie diverse e differenti concentrazioni [dati: numero di eventi osservati per unità di tempo e per unità di volume, concentrazione delle particelle interagenti, velocità relativa]
- e dimostrare l'equivalenza di tali definizioni.
- 3.12 Dimostrare la relazione fra la definizione della sezione d'urto elastica nel caso di fotoni incidenti su un unico bersaglio e la definizione di sezione d'urto elastica per un'onda e.m. monocromatica su un unico bersaglio.
- 3.13 Quale calcolo si deve effettuare per determinare il numero di eventi per unità di tempo e di volume che si producono negli urti fra particelle di due specie diverse e differenti concentrazioni le cui velocità relative sono distribuite con una funzione $f(V_{rel})$ normalizzata all'unità, e la cui sezione d'urto è $\sigma(V_{rel})$?
- 3.14 Calcolare la probabilità di interazione per una particella che incide su una lamina sottile [dati: sezione d'urto del processo, numero di bersagli per unità superficie] Che significato avrebbe una probabilità maggiore di uno? Quest'ultima risposta dipende dalle tipologie degli urti?
- 3.15 Dimostrare che un fascio di particelle incidenti su un materiale omogeneo e composto da atomi di una sola specie in funzione dello spessore attraversato si attenua con una legge esponenziale. [Dati: sezione d'urto di estinzione su ogni atomo del bersaglio, densità di massa del mezzo, numero atomico del mezzo]
- 3.16 Calcolare l'attenuazione di un fascio di particelle incidenti su un materiale omogeneo e composto da atomi di diverse specie in funzione dello spessore attraversato. [Dati: sezione d'urto di estinzione del processo su ogni atomo del bersaglio, densità di massa del mezzo, numeri atomici, composizione chimica del mezzo]
- 3.17 Quante sono le variabili indipendenti nello stato finale di una reazione in cui due particelle collidono ed N particelle sono prodotte?
- 3.18 Quante sono le variabili indipendenti nello stato finale di una reazione in cui una particella decade in due o tre particelle? Quali implicazioni avremmo se la particella che decade avesse un momento angolare nullo?
- 3.19 Spiegare il metodo della 'massa invariante' per identificare una particella instabile e misurarne la sua massa
- 3.20 Dire quali fra le seguenti particelle sono soggette ad interazioni forti: p , \bar{p} , π^+ , π^- , μ^+ , μ^- , e^+ , e^- , ν_e , $\bar{\nu}_e$, nucleo di Azoto.
- 3.21 Utilizzando le apposite tabelle che forniscono le masse dei nuclei, determinare il Q -valore dei seguenti processi:
- $$p + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow p + {}^{39}\text{Ar} + n$$
- $$n + {}^{14}\text{N} \rightarrow p + {}^{14}\text{C}$$
- $${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$$
- $${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$$
- $$p + {}^{198}\text{Hg} \rightarrow p + {}^{197}\text{Au} + p$$

3.22 Calcolare l'energia di soglia nel laboratorio per le seguenti reazioni, in cui la seconda particella è inizialmente ferma:

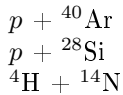


3.23 Calcolare l'energia minima che un neutrone deve avere per produrre una reazione nucleare inelastica incidendo sui seguenti materiali: diamante, ossigeno, idrogeno, acqua, ferro. Si determini anche quale è la reazione esclusiva inelastica avente la minore energia di soglia o, in alternativa, il massimo Q-valore. Nota: si valuti il ruolo dell'abbondanza isotopica fornita nel database "nuclear wallet cards".

3.24 Calcolare l'energia che dovrebbe avere un protone che incide su un protone fermo per ottenere una energia nel centro di massa pari a quella di LHC (14TeV)

3.25 Calcolare l'energia degli elettroni/positroni per innescare la reazione $e^+ + e^- \rightarrow p + \bar{p}$ in cui i due leptoni collidono con quantità di moto uguali e opposte.

3.26 Utilizzando il modello a goccia dei nuclei e ipotizzando che l'interazione "forte" avvenga per un contatto fra adroni, effettuare una stima numerica della sezione d'urto totale forte per i seguenti urti ad alte energie in modo da poter trascurare l'interazione coulombiana:



3.27 Calcolare la probabilità che un neutrino interagisca nell'attraversare la Terra lungo un diametro. Nota: sia assuma che l'energia del neutrino sia tale che la sezione d'urto totale su un singolo nucleone sia 1fb.

3.28 Definire l'impulso trasferito per un urto elastico su un centro di scattering fisso, e calcolare la sua espressione in funzione dell'angolo di scattering.

3.29 Definire le variabili s e t di Maldestam.

3.30 Calcolare la relazione tra parametro d'impatto (b) e angolo di scattering (θ) per lo scattering elastico di un punto materiale su una sfera rigida di massa infinita e ricavare la sezione d'urto differenziale in funzione di θ . Si ipotizzi che l'urto segua la legge della riflessione su un piano tangente alla sfera nel punto di contatto.

3.31 Descrivere qualitativamente le osservazioni sperimentali dello scattering di Rutherford. Dare la definizione operativa di raggio nucleare mediante lo scattering di Rutherford.

3.32 Calcolare la relazione tra parametro d'impatto (b) e angolo di scattering (θ) per lo scattering Rutherford e ricavare la sezione d'urto differenziale in funzione di θ .

3.33 Calcolare la minima distanza fra le due particelle in uno scattering Rutherford.

3.34 Discutere le differenze tra lo scattering di Rutherford (particelle a su nuclei) e lo scattering di elettroni su bersaglio puntiforme (scattering Mott).

3.35 Spiegare il significato di tutti i termini delle seguenti espressioni delle sezioni d'urto differenziali Rutherford e Mott:

$$\left| \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\text{Rutherford}} = \left(\frac{Zze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{1}{4T} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}, \quad \left| \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\text{Mott}} = \left| \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\text{Ruth}} \left(1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad \text{in cui } T \rightarrow \frac{pV}{2}$$

3.36 A partire dalla relazione fra parametro di impatto e angolo di scattering Mott $b \approx \frac{Z\alpha\hbar c}{pv} \cot \theta/2$, determinare i limiti (minimo e massimo) per l'angolo di scattering di una protone di energia 20GeV su un nucleo di Rame, considerato avere una massa praticamente infinita.

3.37 A partire dall'espressione della sezione d'urto Mott in funzione dell'angolo $\frac{d\sigma_{\text{Mott}}}{d\Omega} = \frac{(Z\alpha\hbar c)^2}{(2pv)^2} \frac{1 - \beta^2 \sin^2 \theta/2}{\sin^4 \theta/2}$, calcolare la sezione d'urto Mott in funzione della variabile di Mandelstam t .

3.38 Quali particelle incidenti e di quale energia si utilizzano per misurare i fattori di forma nucleari? Fornire un esempio specifico, corredato da una valutazione quantitativa.

3.39 Come si calcola, in generale, il valore medio di una grandezza fisica in un urto?

3.40 Utilizzare la sezione d'urto Rutherford per calcolare il valore medio dell'energia e dell'impulso trasferiti al nucleo nello scattering elastico di una particella α di energia 5MeV su Au. Nota: si limiti il parametro di impatto al valore del raggio atomico.

- 3.41 Definire i decadimenti α , β , γ e il decadimento tramite cattura elettronica (EC) in un nucleo. Calcolare il Q -valore per i decadimenti β^- , β^+ , EC a partire dal difetto di massa delle specie coinvolte.
- 3.42 Dimostrare che se la probabilità di decadimento di una particella per unità di tempo non dipende dal tempo, la probabilità di trovare la particella non decaduta al tempo t segue una legge esponenziale.
- 3.43 Come si è arrivati alla conclusione che nel decadimento β deve essere emessa una particella neutra non rivelata?
- 3.44 Spiegare perchè, sebbene il neutrone libero sia instabile, esso non possa decadere quando è all'interno di taluni nuclei.
- 3.45 Dare le definizioni di: larghezza, vita media, emivita (o tempo di dimezzamento), rapporto di decadimento ("Branching fraction" o "Branching ratio") per il decadimento di una particella
- 3.46 Determinare, in funzione del tempo t , la concentrazione di un isotopo radioattivo a vita media "breve" prodotto nel decadimento di un isotopo a vita "molto lunga" ed di cui sia nota la concentrazione a $t = 0$ (equilibrio secolare).
- 3.47 Dimostrare che in un decadimento β la somma delle energie dell'elettrone e dell'antineutrino emessi è praticamente uguale al Q -valore della reazione.
- 3.48 Scegliere, selezionandolo da un database, un decadimento α , calcolatene il Q -valore e la frazione di energia cinetica del nucleo prodotto nel decadimento.
- 3.49 Definire lo spazio delle fasi invariante relativistico per una reazione con n particelle nello stato finale.
- 3.50 Dimostrare che $\frac{d^3\vec{p}}{2E}$ è un invariante relativistico effettuando esplicitamente la trasformazione di Lorentz per un boost lungo l'asse x .
- 3.51 Dimostrare che $d^4p \cdot \delta(p^2 - m^2) = \frac{d^3\vec{p}}{2E}$ e sfruttare questo risultato per semplificare la scrittura dell'elemento infinitesimo dello spazio dei 4-impulsi di N particelle emergenti dopo la collisione di due particelle oppure dopo il decadimento di una particella.
- 3.52 Dimostrare che nel centro di massa l'elemento infinitesimo dello spazio dei 4-impulsi, nel caso di 2 sole particelle nello stato finale, si scrive come $\frac{|\vec{p}_{CM}|}{4\sqrt{s}} d\Omega_{CM}$
- 3.53 Si considerino i decadimenti $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$, $K^+ \rightarrow \pi^0\pi^+$. Dopo averne recuperato nel sito del PDG le informazioni necessarie, di ognuno si calcoli l'integrale dello spazio delle fasi ed il rapporto di quest'ultimo con la larghezza ricavabile dai dati del PDG. Nota: si può dare per acquisito il risultato $dL_{2-body} = \frac{|\vec{p}_{CM}|}{4\sqrt{s}} d\Omega_{CM}$.
- 3.54 Nel caso di 3 particelle nello stato finale di una reazione, dimostrare che fra il quadrato della massa invariante di due di esse e l'energia della terza (nel centro di massa) sussiste una relazione lineare.
- 3.55 Pioni neutri, di energia E nel sistema del laboratorio, decadono in due fotoni. La distribuzione è isotropa nel centro di massa. Si calcoli la distribuzione dell'energia di uno dei due fotoni nel laboratorio.
- 3.56 Calcolare la funzione di distribuzione in energia nel sistema del laboratorio di un fascio di neutrini prodotto nel decadimento di pioni carichi di energia 14 GeV in un neutrino ed un muone.
- 3.57 Spiegare qualitativamente l'effetto Mossbauer.
- 3.58 Studiando l'effetto Mossbauer si incontra uno stato risonante del ^{57}Fe che ha una emi-vita di 97.7ns e che decade in un fotone di energia 14.4keV . Dimostrare che questo stato risonante non può essere descrivibile dal modello dell'elettrone legato elasticamente. Calcolare anche il rapporto fra l'energia cinetica di recoil del nucleo e la larghezza dello stato risonante.
-

Gruppo 4: Interazione fra particelle cariche e la materia stabile

- 4.1 Quale è la relazione fra lo spessore di un materiale, espresso in cm, e lo spessore espresso in g/cm^2 ?
- 4.2 Definire la "dose" di energia rilasciata in un materiale e dire il nome della sua unità di misura.
- 4.3 Descrivere qualitativamente l'effetto Cherenkov.
- 4.4 Descrivere la situazione in cui la legge, inerente la radiazione Cherenkov, $\frac{d^2N_\gamma}{dE_\gamma dx} = z^2 \frac{\alpha}{\hbar c} \sin^2 \theta_c$ è applicabile e spiegare il significato e l'unità di misura di ogni grandezza fisica ivi indicata.

- 4.5 A partire dalla espressione $\frac{d^2 N_\gamma}{dE_\gamma dx} = z^2 \frac{\alpha}{\hbar c} \sin^2 \theta_c$ valida per la radiazione Cherenkov, mostrare che $N_\gamma = z^2 \frac{\alpha}{\hbar c} L \int_{E_1}^{E_2} (1 - \frac{1}{\beta^2 \epsilon_r(E)})$
- 4.6 Descrivere qualitativamente le cause e gli effetti del fenomeno della radiazione di frenamento da parte di una particella carica nella materia.
- 4.7 Spiegare perchè la perdita di energia per irraggiamento è significativa per elettroni e non per le altre particelle cariche.
- 4.8 Descrivere la situazione in cui la legge $I_\omega(b) = \begin{cases} \frac{8z^4 Z^2 \alpha \hbar c^2}{3\pi} \left(\frac{m_e}{M}\right)^2 \frac{r_e^2}{V^2 b^2} & \text{per } \omega < V/b \\ 0 & \text{per } \omega > V/b \end{cases}$ è applicabile e spiegare il significato e l'unità di misura di ogni grandezza fisica ivi indicata.
- 4.9 Definire la sezione d'urto di irraggiamento e descrivere situazione in cui la legge $\chi_\omega = \frac{16}{3} z^4 Z^2 \alpha \hbar c^2 \frac{m_e^2}{M^2} \frac{r_e^2}{V^2} \ln\left(\frac{MV^2}{\hbar \omega}\right)$ è applicabile, spiegando il significato e l'unità di misura di ogni grandezza fisica ivi indicata.
- 4.10 Descrivere situazione in cui la legge $\frac{dE_{irr}}{dx} = n_{nuclei} \frac{16}{3} z^4 Z^2 \alpha \frac{m_e^2}{M^2} r_e^2 \ln\left(\frac{192M}{Z^{1/3} m_e}\right) E$ è applicabile, spiegando il significato e l'unità di misura di ogni grandezza fisica ivi indicata.
- 4.11 Descrivere situazione in cui la legge $\chi_\omega = \hbar \omega \frac{d\sigma_\gamma}{d\omega}$ è applicabile, spiegando il significato e l'unità di misura di ogni grandezza fisica ivi indicata.
- 4.12 Dare la definizione di lunghezza di radiazione.
- 4.13 Descrivere la situazione in cui la legge $E = E_0 e^{-x/X_0}$ è applicabile e spiegare il significato e l'unità di misura di ogni grandezza ivi indicata.
- 4.14 Descrivere qualitativamente il meccanismo della perdita di energia per collisioni da parte di una particella carica nella materia.
- 4.15 Spiegare il significato di ogni termine dell'espressione per la perdita di energia per collisioni (formula di Bethe-Bloch) $\frac{1}{\rho} \frac{dE_{coll}}{dx} = \frac{4\pi z^2 Z N_A}{\beta^2} \frac{m_e c^2 r_e^2}{M_A} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{MAX}}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right)$ e disegnarla qualitativamente indicando i valori dei punti significativi.
- 4.16 Definire il "percorso residuo" ("range") per una particella carica in un materiale.
- 4.17 Definire gli "stopping power" totale, collisionale, radiativo e nucleare; indicare per quali particelle ognuno di essi sia o meno rilevante.
- 4.18 Come si calcola il "percorso residuo" ("range"), nota la curva dE/dx , in funzione dell'energia E della particella?
- 4.19 Spiegare qualitativamente il cosiddetto "picco di Bragg".
- 4.20 Descrivere qualitativamente il fenomeno dello scattering multiplo da parte di una particella carica in moto veloce nella materia.
- 4.21 Definire l'angolo di multiplo scattering (rispetto alla direzione iniziale della particella) e definire la sua proiezione su un piano (che contiene la direzione iniziale della particella). Indicare i limiti delle due variabili così definite.
- 4.22 Spiegare il significato di ogni termine dell'espressione per l'angolo quadratico medio di multiplo scattering (rispetto alla direzione iniziale della particella) $\sqrt{\langle \theta_{ms}^2 \rangle} = \theta_0 \sqrt{2} = z \frac{13.6 MeV}{P \beta c} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \sqrt{2}$
- 4.23 Calcolare il numero di fotoni Cherenkov osservati da un fotorivelatore con efficienza del 30% per luce fra 300nm e 600nm, al passaggio di un elettrone nei due casi seguenti: i) $n=1.005$ (gas), $\beta = 0.999$, spessore attraversato = 1m; ii) $n=1.5$ (solido trasparente), $\beta = 0.99$, spessore attraversato = 1cm.
- 4.24 Calcolare l'angolo di emissione della radiazione Cherenkov in funzione dell'impulso (e della massa) della particella e dell'indice di rifrazione.
- 4.25 Valutare la lunghezza di radiazione del Piombo e del Silicio con il modello spiegato a lezione, che fornisce $X_0 = \frac{1}{\frac{16}{3} \rho Z^2 \frac{N_A}{A} \alpha r_e^2 \ln\left(\frac{192}{Z^{1/3}}\right)}$ ed effettuare un confronto con i valori sperimentali reperibili su internet.
- 4.26 Cercando i dati delle sezioni d'urto totali nelle apposite figure o tabelle (reperibili anche nella compilazione Particle Data Group <https://pdg.lbl.gov>) si calcoli la probabilità di interazione di:
 un fotone da 100 eV che incida su $1\mu m$ di grafite
 un fotone da 1 MeV che incida su $1mm$ di grafite
 un fotone da 10 MeV che incida su $1mm$ di Piombo
 un fotone da 50 KeV che incida su $1\mu m$ di Piombo
 un neutrino da 100 GeV che incida su $1km$ di grafite

un protone da 100 GeV che incida su 1cm di grafite

- 4.27 Dimostrare che all'interno del cono della radiazione Cherenkov vi sono due soluzioni per $t' = t - nR/c$, nessuna soluzione all'esterno, ed una sola sul fronte d'onda.
- 4.28 Partendo dalla espressione $\frac{dI_\omega}{d\Omega} = \frac{q^2}{4\pi^2 c} \left| \int \frac{\hat{n} \wedge [(\hat{n} - \vec{\beta}) \wedge \dot{\vec{\beta}}]}{(1 - \hat{n} \cdot \vec{\beta})^2} e^{i\omega(t' - \hat{n} \cdot \vec{r}'/c)} dt' \right|^2$ dimostrare che l'energia persa per unità di frequenza nel caso non relativistico è approssimabile con $I_\omega = \begin{cases} \frac{2q^2}{3\pi c} |\Delta\vec{\beta}|^2 & \text{per } \omega < 1/\tau \\ 0 & \text{per } \omega > 1/\tau \end{cases}$
- 4.29 Calcolare l'energia irradiata da un elettrone di 60MeV che attraversi 5.6mm di Pb e calcolare il numero medio di fotoni emessi con energia fra 1eV e 1MeV.
- 4.30 Calcolare il numero medio di fotoni emessi con energia fra 10 e 100 MeV per un elettrone di 1 GeV che attraversi 2mm di Silicio. Calcolare poi la probabilità che uno di questi fotoni effettui una interazione prima di uscire dal materiale.
- 4.31 Utilizzando le tabelle che forniscono le sezioni d'urto di fotoni su atomi, calcolare la probabilità che un fotone da 10 MeV produca una coppia e^+e^- in uno spessore di Piombo pari ad una lunghezza di radiazione.
- 4.32 Calcolare l'energia minima e l'energia massima trasferibile in una singola collisione da una particella carica, di massa molto maggiore di quella dell'elettrone, in moto veloce attraverso la materia ad un singolo elettrone atomico.
- 4.33 Mostrare che la perdita di energia per collisioni può essere, sotto determinate ipotesi, rappresentabile tramite la formula di Bohr: $\frac{1}{\rho} \frac{dE_{coll}}{dx} = \frac{4\pi z^2 Z N_A}{\beta^2} \frac{m_e c^2 r_e^2}{M_A} \ln \frac{\beta^3 \gamma^2 c}{z \omega_e r_e}$ oppure tramite la formula approssimata di Bethe-Bloch: $\frac{1}{\rho} \frac{dE_{coll}}{dx} = \frac{4\pi z^2 Z N_A}{\beta^2} \frac{m_e c^2 r_e^2}{M_A} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{MAX}}{I} - \beta^2 \right)$
- 4.34 Utilizzando la modellizzazione $I = (16eV)Z$ e la formula di Bethe-Bloch, calcolare il valore minimo dell'energia persa per collisioni, in MeV/g/cm², per protoni che attraversano del Piombo.
- 4.35 Nell'approssimazione di piccoli angoli e distribuzione gaussiana di varianza nota, calcolare il valor medio, il valore quadratico medio e la sigma per: i) l'angolo di multiplo scattering rispetto alla direzione iniziale della particella, e ii) la sua proiezione su un piano che contenga la direzione iniziale della particella.
- 4.36 Si considerino le seguenti particelle: i) elettrone di energia 100MeV, ii) pione di di energia 1GeV, iii) muone di energia 45 GeV, iv) protone di energia 7 TeV, che attraversano 1m di Aria. Trovando sul sito del PDG le informazioni necessarie indicare se siano rilevanti e in caso affermativo calcolare le seguenti quantità: a) energia persa per irraggiamento, b) l'energia persa per collisioni, c) probabilità di interazione forte con i nuclei, d) angolo quadratico medio di multiplo scattering.
- 4.37 Calcolare, tramite il principio di Huygens e per un dato indice di rifrazione, l'angolo di emissione della radiazione Cherenkov.

.....

Gruppo 5: Alcune applicazioni

- 5.1 Descrivere qualitativamente l'esperimento di Anderson sulla scoperta del positrone.
- 5.2 Dimostrare, utilizzando il materiale distribuito, perchè nell'esperimento di Anderson sulla scoperta del positrone alcune tracce positive osservate non possono essere nessuna delle particelle positive conosciute nel 1932.
- 5.3 Illustrare in modo qualitativo l'esperimento di Segré et al. , con particolare riguardo al metodo di produzione degli antiprotoni ed alla metodologia per distinguere gli antiprotoni dai pioni negativi.
- 5.4 Calcolare l'energia di soglia di produzione degli antiprotoni nell'esperimento di Segré et al. in un modello in cui il nucleo di Rame resti invariato. Sempre in questa ipotesi, calcolare q_{thr} , definito come il modulo della quantità di moto trasferita al nucleo di Rame alla soglia di produzione. Calcolare infine il prodotto di q_{thr} con il raggio del nucleo di Rame e trarre le dovute conclusioni.

- 5.5 Calcolare l'energia di soglia di produzione degli antiprotoni nell'esperimento di Segré et al. in un modello in cui l'interazione avvenga su un singolo nucleone considerato libero all'interno del nucleo. Sempre in questa ipotesi, calcolare q_{thr} , definito come il modulo della quantità di moto trasferita al nucleone alla soglia di produzione e trarre le dovute conclusioni.
- 5.6 Calcolare la perdita di energia degli antiprotoni e dei pioni negativi che nell'esperimento di Segré et al. attraversano i vari rivelatori.
- 5.7 Calcolare il numero di fotoni prodotti dagli antiprotoni e dai pioni negativi che nell'esperimento di Segré et al. attraversano i vari rivelatori Cherenkov.
- 5.8 Effettuando una apposita ricerca in database pubblici, trovare le sezioni d'urto di produzioni di neutroni da parte di particelle α di energia cinetica inferiore a $10MeV$ in Ferro. Trovare la probabilità di produzione di un neutrone da parte di una particelle α di energia cinetica iniziale pari a $10MeV$ che incida su una lastra di Ferro.