

Lezione 2: Passaggio delle radiazioni nella

(1)

Materia

- Effetti del passaggio delle radiazioni nella materia (interazione e perdita di materia) → Componente indispensabile per un fisico sperimentale
→ Base dei principi di rivelazione
- Processi elementari (applicazioni dell'elettromagnetismo)

Particelle cariche → interat. e.m. con le cariche della materia

[Per adroni carichi (es. protoni, alfa, ...) interat. e.m. dominante fino a energie di $O(100 \text{ MeV})$ (più anche processi nucleari)]

Particelle neutre → conversione dell'energia

in energia cinetica di particelle cariche

diversa per diverse particelle:

neutroni (adroni neutri), neutrini, fotoni (ceppi in breve) alle modalità)

Interazione e.m. di particelle cariche con la materia

Due casi : i) $M_0 \gg m_e$
ii) $M_0 = m_e$ (elettroni)

i) $M_0 \gg m_e$ ("particelle cariche pesanti")

x interazioni su nuclei (diffusione Rutherford)

- o Scarso trasferimento di energia
 $M_0 \ll M_{Nucleo}$ (nucleo rimane fermo)
- o sensibile cambiamento di direzione

x interazioni su elettroni atomici

- o parte predominante della perdita di energia
- o nessun significativo cambio di direzione

Processo di perdita di energia in molti atti con (relativamente) piccolo trasferimento di energia

• la particella (di massa $M_0 \gg m_e$)
zattera fino ad arrestarsi (arrestamento)

→ Range è minima dell'energia
(non così per elettroni)

• Excitazioni e Ionizzazioni
(otili per i metodi di rivelazione)

N di eccitazioni / ionizzazioni \div Energia
rilasciata nella materia

(non c'è una semplice spiegazione di ciò)

Valo la relazione empirica (Lorenz più
avanti)

$$Q = e \frac{E}{W}$$

W = energia media per produrre una
coppia di cariche (ione-e, e-h, ...)

Definizione

Potere frenante ("specific energy loss")

$$S = - \frac{dE}{dx}$$

(perdita di energia per unita' di percorso)

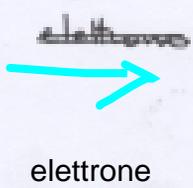
Formula di Bethe (semiclassica)

$$- \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{m_e v_0^2} N_e \ln \frac{2m v_0^2}{I}$$

dip. da $1/v_0^2$

perdita di energia per "ionizzazione" (interazioni con elettroni atomici) subita da una particella di carica ze in un mezzo con N e/cm³

H.p.



traiettoria rettilinea (elettrone leggero) vito di durata breve (el. fanno e. proiettile leggero)



b (perduta di impulso)

Facciamo assumere che sia rilevante solo l'impulso trasferito perpendicolarmente alla traiettoria Δp_{\perp}

6
 Energia per unità (trasferita) per unità
 su singolo elettrone

$$E = \frac{(\Delta p)^2}{2m_e} = \frac{2}{m_e} \frac{z^2 e^4}{(b v)^2}$$

Va integrato su tutti gli elettroni del metallo

$$dN_e = N_e \int_{b_{min}}^{b_{max}} 2\pi b db dv \Rightarrow \frac{dN_e}{dx} = N_e \int_{b_{min}}^{b_{max}} 2\pi b db$$

Sostituendo:

$$\boxed{-\frac{dE}{dx}} = N_e \int_{b_{min}}^{b_{max}} 2\pi \int \frac{2}{m_e} \frac{z^2 e^4}{(b v)^2} b db$$

$$= 4\pi \frac{z^2 e^4}{m_e v^2} N_e \ln \frac{b_{max}}{b_{min}}$$

Possiamo sostituire

$$b_{max} \rightarrow 1/E_{min}$$

$$b_{min} \rightarrow 1/E_{max}$$

$$\boxed{E_{min} = I}$$

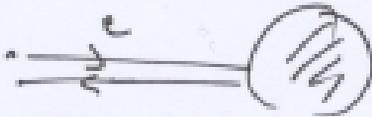
(energia "morta" di ionizzazione):
 tipicamente $\sim 10 \cdot Z$ eV

è necessaria un'energia minima affinché si
 realizzi un salto pratico di un elettrone nella
 materia, altrimenti, al di sotto di quella soglia
 non può esserci trasferimento di energia

- Energia massima trasferita (E_{max}) (7)

componibile all'energia trasferita in un'unico "fronte"

- Cambio di sistema di riferimento: proiettile a riposo e elettrone in moto con velocità $-v$
 $M_0 \gg m_e$



$$\Delta p_{max} = 2 m_e v$$

$$\Delta E_{max} = \frac{(\Delta p_{max})^2}{2 m_e} = 2 m_e v^2$$

- Contatto $\Delta E_{max} / T$

$$T = \frac{1}{2} M v^2 =$$

~ 1/2000

$$\frac{\Delta E_{max}}{T} = 4 \frac{m_e}{M} \sim \frac{m_e}{m_p} \text{ per particelle } \alpha$$

Per alfa di 5 MeV la perdita di energia in una collisione $\Delta E = 2.6 \text{ keV}$
 \Rightarrow servono molte migliaia di collisioni per fermarla!!

- Formula finale (di Bethe) (non relativistica, ok per particelle pesanti)

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \frac{z^2 e^4}{m v^2} N_e \ln \frac{2 m_e v^2}{I}$$

Dipende in pratica da carica z e velocità v della particella ($1/v^2$) e da densità el. del mezzo (mezzi con Z e densità $>$ fermano di più).

NB: la formula ci dà l'energia media persa. In realtà per piccole distanze l'energia persa è una variabile stocastica con distribuzione di Landau, ovvero con coda verso alte energie.

Limiti di validità

$v \rightarrow 0$ diverge (schermatura e neutralizzazione delle cariche)

$v \rightarrow c$ effetti ultra relativistici

+ altri processi (bremsstrahlung)

Alcune leggi di scala

1) $N_e = Z \frac{\rho}{A} N_A$

$\frac{Z}{A} \approx \frac{1}{2}$ (tranne per H)

Specific energy loss

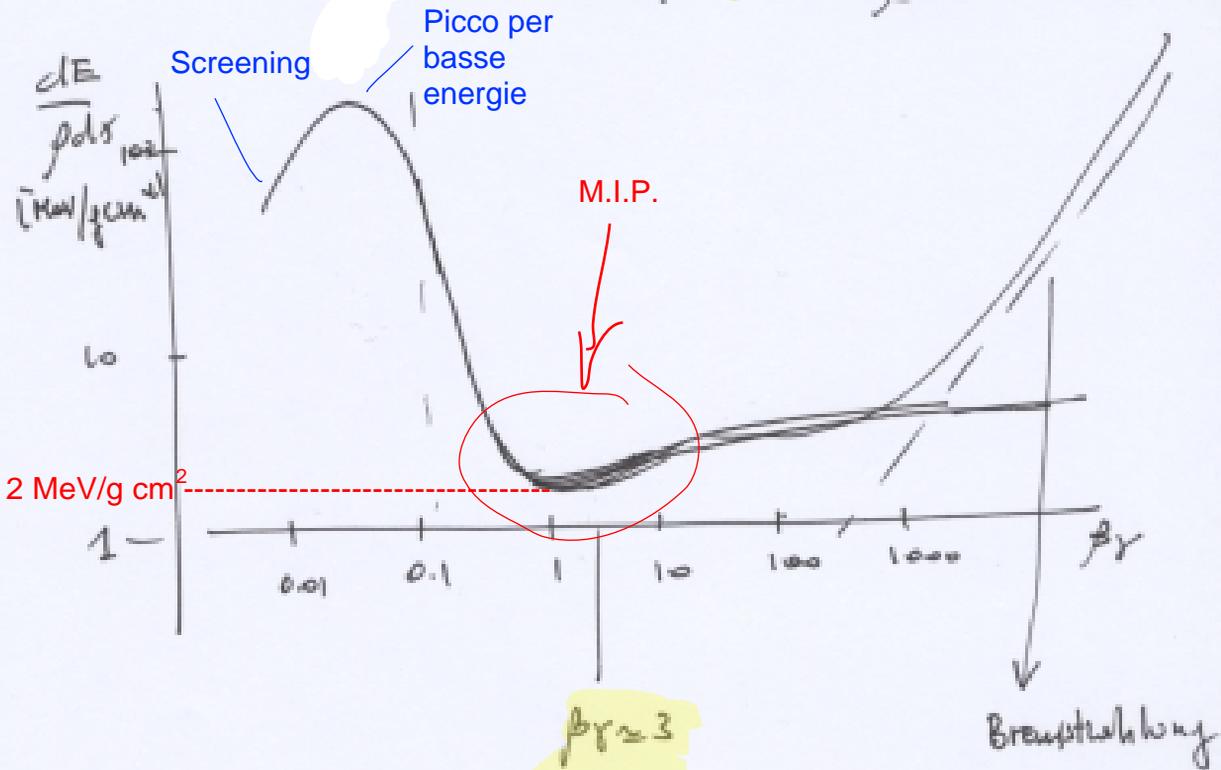
$-\frac{dE}{\rho dx} = 4\pi te^2 \frac{4}{mv^2} \frac{Z}{A} N_A \ln\left(\frac{2mv^2}{I}\right)$

↳ percorso in g/cm² « stesso valore di perdita di energia in tutti i materiali

2) Invariante in funzione di $\beta\gamma$ della funzione generale (di β in q. e quindi di $\beta\gamma$ per un γ minimo per $\beta\gamma \approx 3$ (1.5 ÷ 2 MeV/gcm) = $pc/(mc^2)$

Formula completa

Aplicación



interessante per α in Lab

$T_\alpha = 5 \text{ MeV}$
 $M_\alpha \approx 4 \times 10^3 \text{ MeV}$

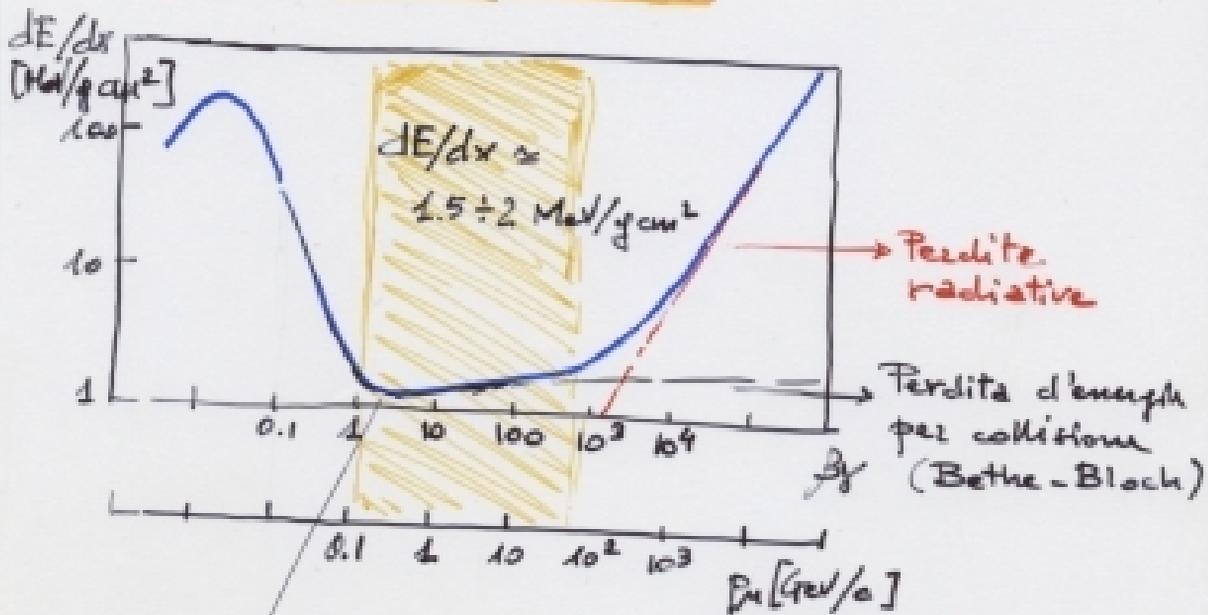
$$\beta\gamma = \frac{pc}{Mc^2} = \frac{\sqrt{2MT_\alpha} c}{Mc^2} \approx \boxed{0.05}$$

Muoni ($\langle E_M \rangle \approx 1 \text{ GeV} \Rightarrow \gamma \approx 10$)

Sono "m.i.p." $\approx \boxed{2 \text{ MeV/g cm}^2}$

massa = $105 \text{ MeV}/c^2$

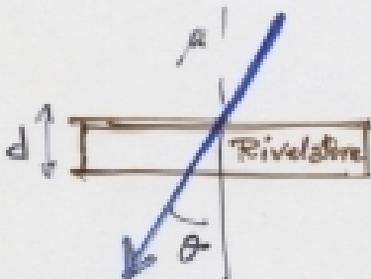
Perdita di energia



particelle al minimo di ionizzazione (m.i.p.)

muoni cosmici al suolo:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{max}} &= 1 \text{ GeV} \\
 \langle p \rangle &= 4 \text{ GeV} \approx \text{m.i.p.} \Rightarrow \text{Penetranti}
 \end{aligned}$$



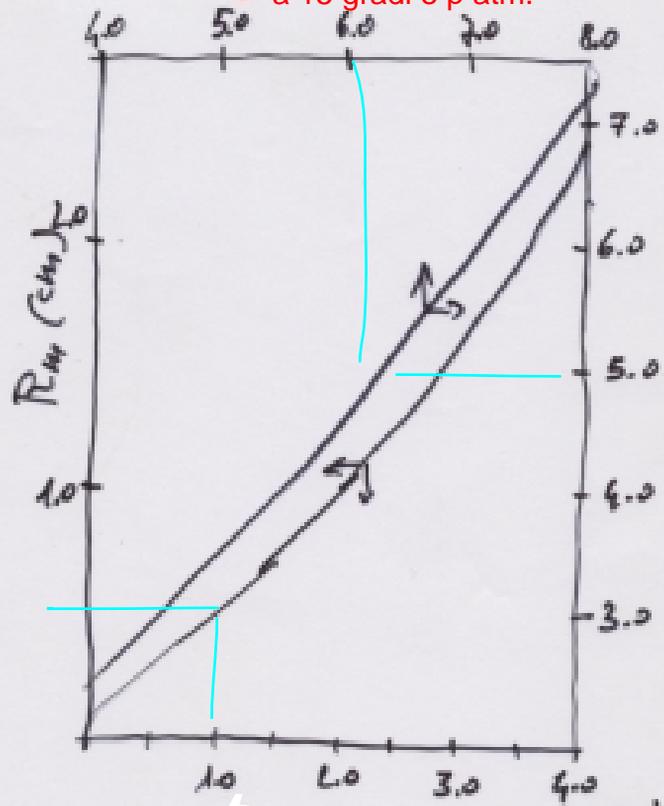
$$E_{\text{depositata}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{m.i.p.}} \rho d / \cos \theta$$

MeV/g cm² g/cm³ cm

Range in Air

a 15 gradi e p atm.

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{dE/dx}$$



$N \sim 5 \text{ cm}$ $E \sim 6 \text{ MeV}$
 $N \sim 0.5 \text{ cm}$ $E \sim 1 \text{ MeV}$

$$\rho_{\text{solidi}} \approx 10^3 \rho_{\text{gas}}$$

$$R \div 1/\rho$$

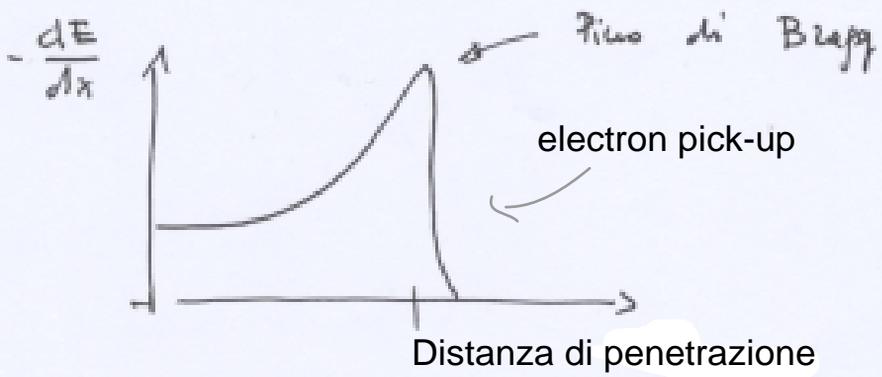


$$R_{\text{u}}(\text{Solidi}) \approx 10 \mu\text{m}/\text{MeV}$$

!!!
...

Curva di Bragg: potere frenante in

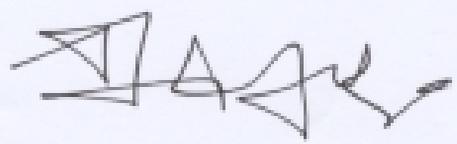
funzione della distanza di penetrazione.



(aumento della ionizzazione specifica a fine percorso $-dE/dx \sim 1/v^2$)

Gia in piccoli spessori gli elettroni deviati non vengono più rivelati, quindi si ha subito una diminuzione di I

Nota sugli elettroni



"Range" è mal definito (all'energia)

(non dà informazioni) $\sim 1/m^2, E, Z^2$

$dE/dx = dE/dx (coll) + dE/dx (rad)$

- bene invece la ionizzazione specifica.

La massa del proiettile el. è uguale a quella degli el. orbitali con cui interagisce, può quindi perdere in un solo urto una frazione alta di energia. Inoltre possono capitare interazioni con i nuclei che cambiano fortemente la direzione dell'elettrone.

Ionizzazione specifica :

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{e dE}{W dx}$$

Quantità di carica generata per ionizzazione in dx

→ carica totale generata →

$$Q = \int_R^0 \frac{e}{W} \frac{dE}{dx} = \left[\frac{e E}{W} \right]$$

↳ minimo dell'energia
trasmissione la carica
liberata

Spettroscopia di Calorimetri :

→ minimo della distribuzione di
energia della radiazione incidente

in HEP

- x calorimetria (arricchimento completo)
- x ionizzazione (specificità) $\frac{dQ}{dx}$ avviene alla
 minima di $\phi \Rightarrow \left[\frac{\text{massa della particella}}{\text{identificazione}} \right]$

la ottima analisi : minimo della carica
depositata

Vale la relazione empirica:

$$Q = -e \frac{E}{w}$$

energia media per creare portatori di carica

- Il numero di portatori prodotti da un evento ionizzante di energia E fluttua, poiché w non è fino in ogni processo di ionizzazione ma ha una distribuzione
- Il processo non è poissoniano tuttavia la fluttuazione $\sigma \div N = E/w$

$$V(N) = F \cdot N$$

Varianza

↳ fattore di Fano

$$E = Nw$$

$$F = 0.1 \div 1$$

$$R_{FWHM} = 2.35 \frac{\sigma_E}{E} = 2.35 \sqrt{\frac{F}{N}} \div \frac{1}{\sqrt{E}}$$

Altri contributi alla risoluzione:

- Rumore elettronico
- Effetti specifici del rivelatore

Interazione di fotoni

* cambiamento in energia cinetica di particelle cariche

- processi
 - Assorbimento fotoelettrico
 - Scattering Compton
 - Produzione di coppie

Sono i principali nelle misure di radiazione

Portano ad un parziale o totale trasferimento dell'energia del fotone ad un elettrone. Il fotone subisce un cambiamento drastico: o sparisce o perde parte dell'energia e viene scatterato con un grande angolo.

Def. Sezione d'urto: probabilità che un fotone interagisca. Ha le dimensioni di un'area (~area attorno alla particella bersaglio tc. la particella proiettile possa interagire con essa)

$$I(x) = I(0) e^{-\mu x}$$

Coefficiente di attenuazione lineare (prob. inter. per unità di cammino)

Hp. elementari alla Poisson

Sezione d'urto totale

$$\sigma_T = \sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_{pp}$$

Facendo il solito esperimento con sorgente di gamma monocromatici collimati in un fascio stretto che viene rivelato dopo esser passato attraverso un bersaglio di spessori diversi t:



Ogni interazione rimuove il fotone dal fascio con una probabilità di interazione per unità di cammino nell'assorbitore costante data da μ

Coefficiente di attenuazione lineare μ

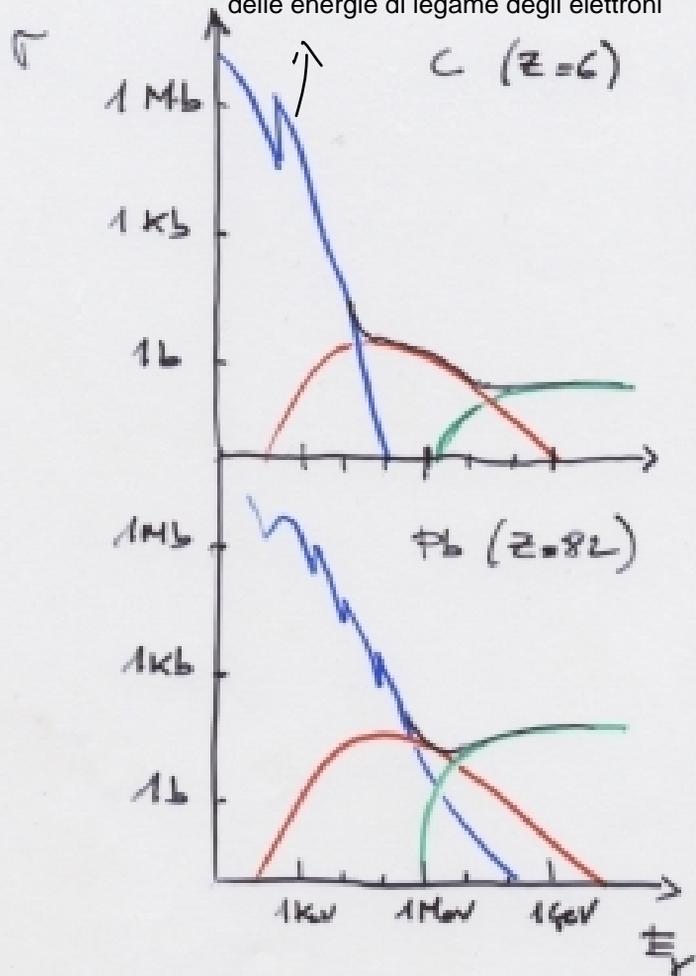
$\mu = \sigma \cdot n_e \Rightarrow$ Probabilità di interazione per unità di cammino

$1/\mu =$ libero cammino medio

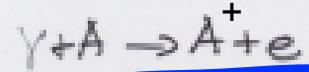
Interazione dei fotoni con la materia

Absorption edges in corrispondenza delle energie di legame degli elettroni

1 barn = 10^{-24} cm²



— Effetto fotoelettrico



$$E_e = E_\gamma - E_{legame}$$

$$\sigma \propto Z^5 E^{-3.5}$$

— Effetto Compton



$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

$$E_e = E_\gamma - E_{\gamma'}$$

dist. continua!

sigma prop. Z

— Transizione di coppia



$$E_{soglia} \approx 2 m_e c^2$$

sigma prop. Z²

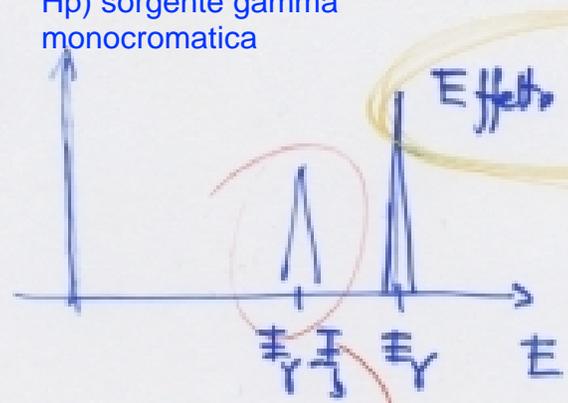
⇒ Z elevato

Per spettroscopia occorre alta efficienza fotoelettrica

→ $E_{soglia} \approx 2 m_e c^2$

RISPOSTA AI FOTONI DI UN RIVELATORE PER SPETTROSCOPIA

$\frac{dN}{dE}$
 Hp) sorgente gamma monocromatica

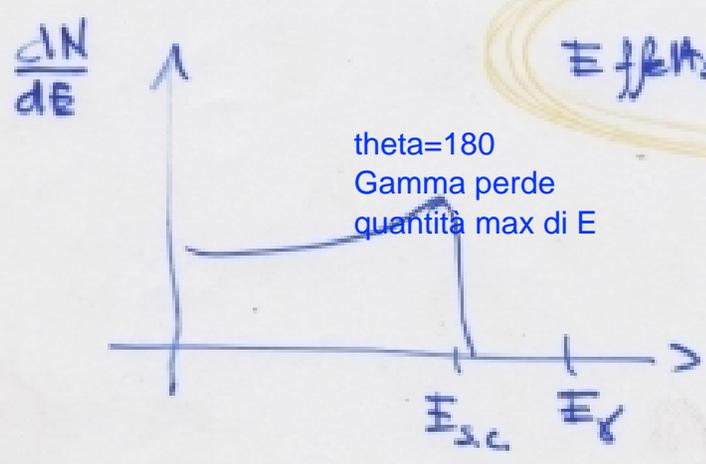


$$E_e = E_\gamma - E_B$$

E_B , rimane in alto forma di X di deiecitazione atomica, che possono non interagire nel rivelatore

Pico di fuga

"Dipende dalle dimensioni del cristallo"



Effetto Compton (puro)

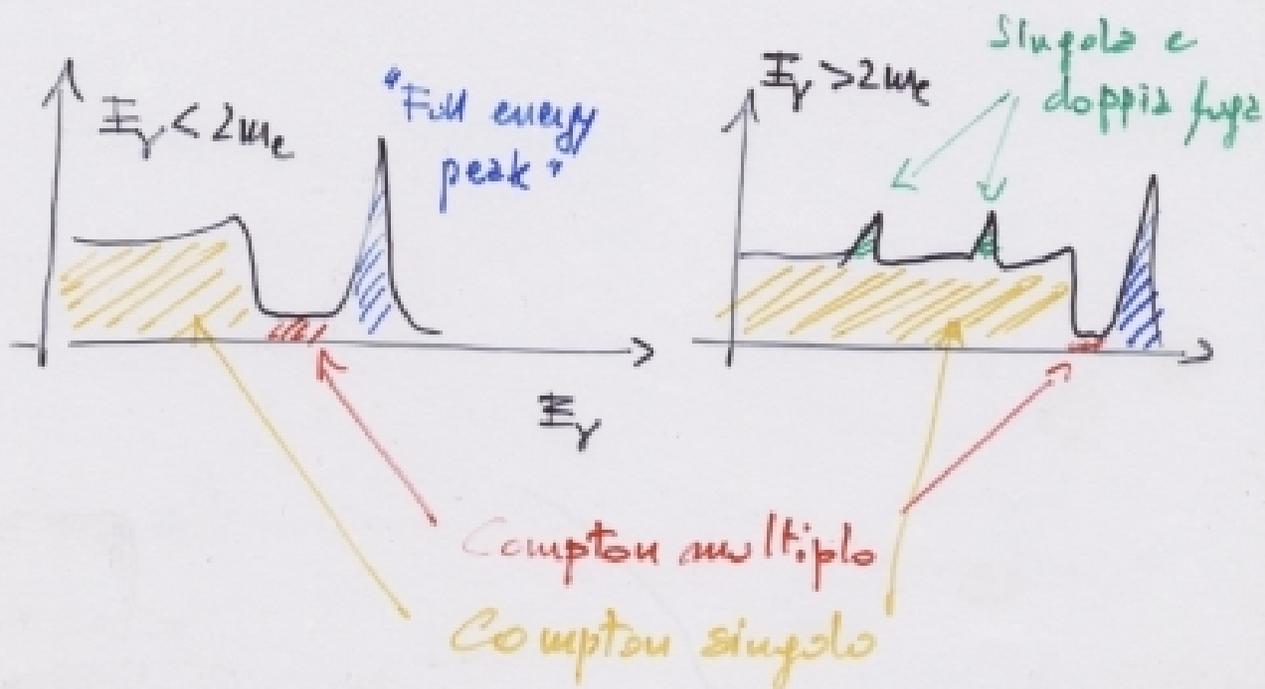
theta=180
 Gamma perde quantità max di E



$$E_{\text{spina Compton}} = E_\gamma - \frac{E_\gamma}{1 + \frac{2E_\gamma}{mc^2}} \approx E_\gamma - 250 \text{ keV}$$

x E ~ 2500 keV

Spettroscopia gamma



Parametri qualificanti :

- Alta efficienza ~~per~~ "full energy"
 - Z elevato
 - grandi dimensioni
- Buona risoluzione

$$R = \frac{FWHM}{E} \approx \frac{2.35 \sigma}{E}$$

Produzione di coppie

Annichilazione
del positrone

$$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$$

$$E_\gamma = m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$



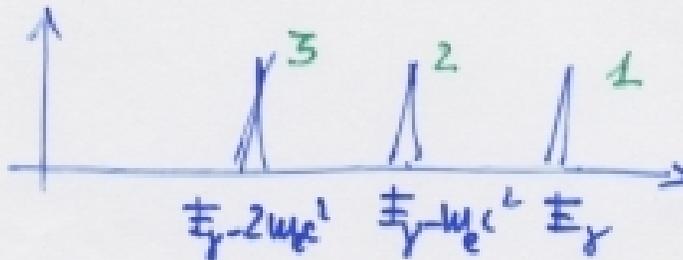
1. Full energy peak



2. Singola fuga



3. Doppia fuga



Effetti indotti dalle interazioni sui materiali esterni

(Eff. PE) 1. γ caratteristici

(Compton) 2. Continuo di fotoni degradati in energia da diffusioni Compton su materiali esterni

⇒ Pico di back scattering
~ 250 keV

(PP) 3. Fotoni di annichilazione avvenute all'esterno del rivelatore ($E_\gamma = 511 \text{ keV}$)

