

Radiazioni Ionizzanti

Strumentazione biomedica e bioimmagini

***Laurea in
Ingegneria Informatica, Biomedica e delle Telecomunicazioni***

Fabio Baselice



Sommario

- Fisica delle radiazioni
- Interazioni con la materia



Interazioni con la materia

In generale, particelle cariche che attraversano un mezzo cedono la loro energia gradualmente. Tale energia produce la ionizzazione e l'eccitazione degli atomi del mezzo stesso.



Interazioni con la materia

In generale, particelle cariche che attraversano un mezzo cedono la loro energia gradualmente. Tale energia produce la ionizzazione e l'eccitazione degli atomi del mezzo stesso.



Radiazioni che non hanno carica, come i raggi γ , perdono energia non gradualmente ma in eventi discreti, in cui una considerevole parte della loro energia viene trasferita ad una particella secondaria.



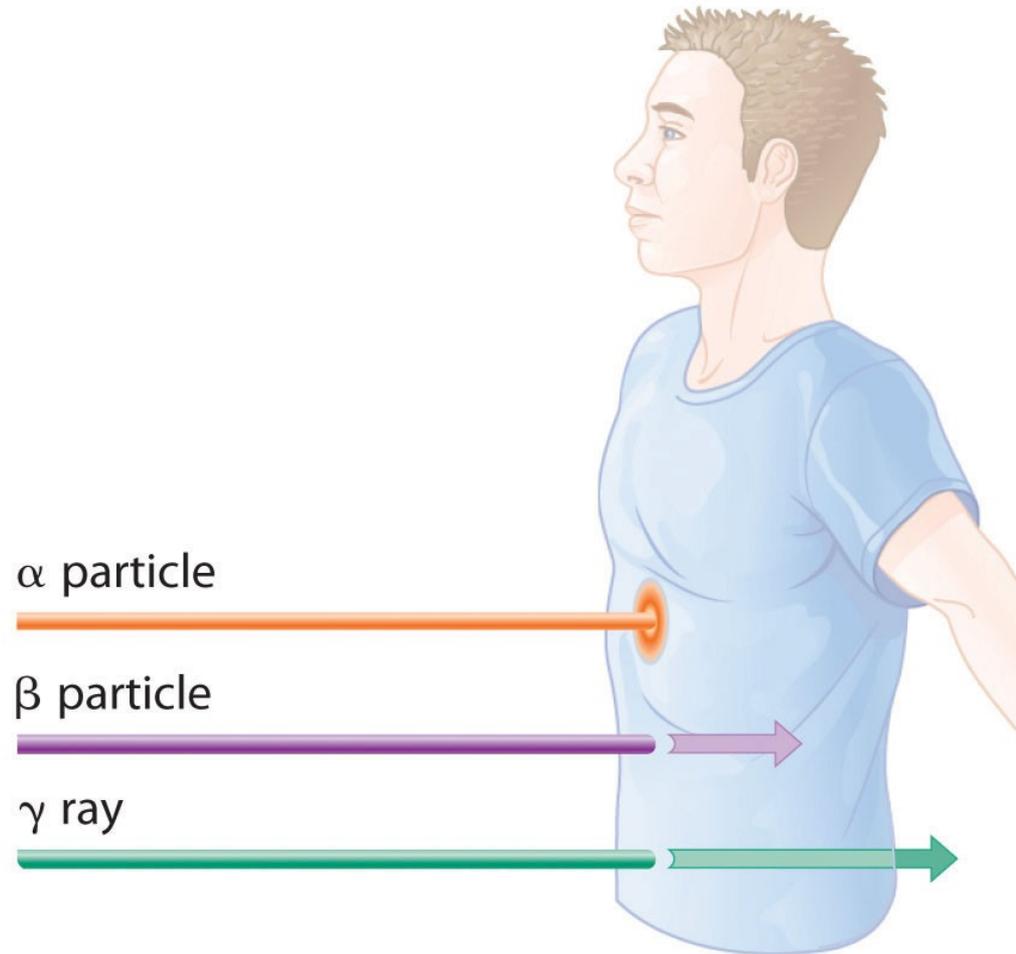
Interazioni con la materia

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti dipendono da quattro fattori:

1. Il tipo di radiazione, da cui dipende la profondità di penetrazione nella materia.
2. L'energia delle singole particelle o fotoni.
3. Il numero di particelle o fotoni che colpisce una data area nell'unità di tempo.
4. La natura chimica della sostanza esposta alla radiazione.



Interazioni con la materia



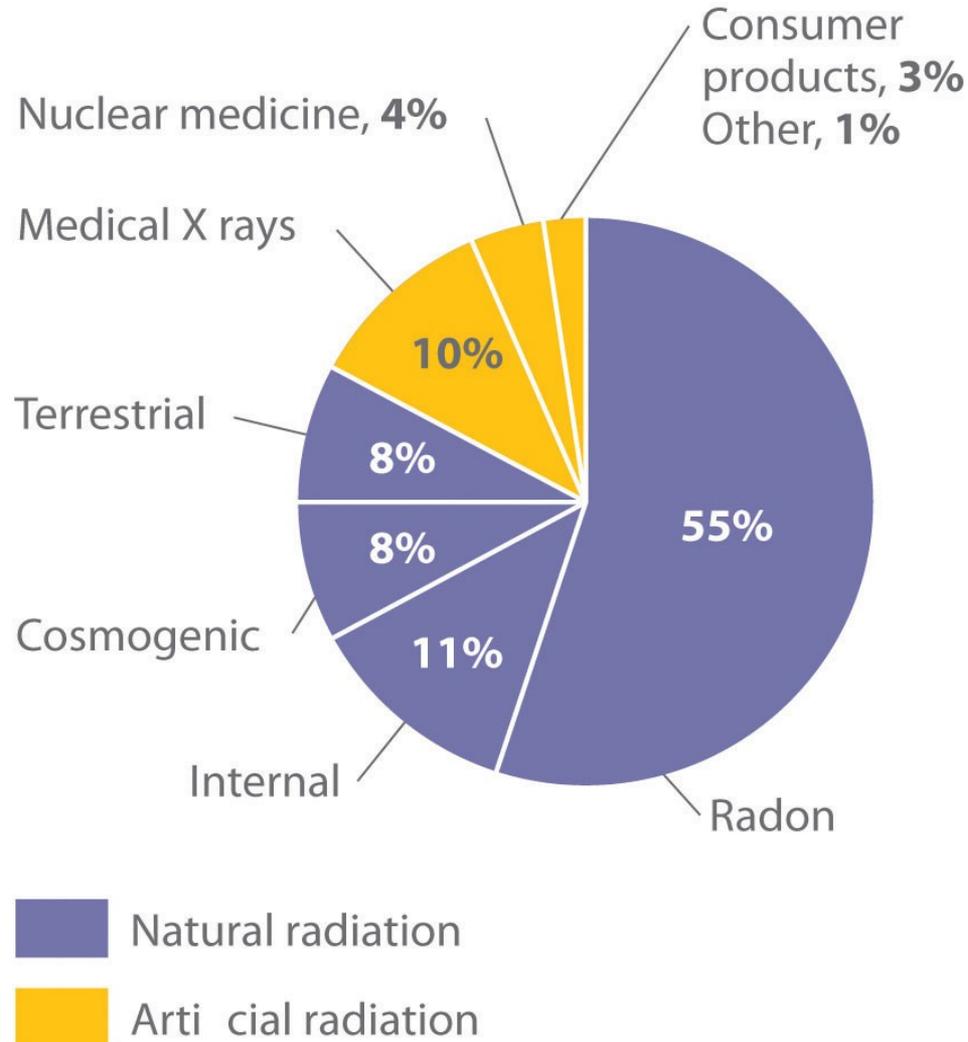
Interazioni con la materia

Tipo	Energia (MeV)	Distanza di Penetrazione in acqua*	Distanza di Penetrazione in aria*
Particelle α	3-9	<0,05 mm	<10 cm
Particelle β	<3	<4 mm	1m
Raggi x	<10 ⁻²	<1 cm	<3 m
Raggi γ	10 ⁻² -10 ¹	<20 cm	>3 m

*Distanza alla quale il 50% della radiazione è assorbita.



Sorgenti di radiazione



Effetti delle radiazioni

Dose (rem)	Symptoms/Effects
< 5	no observable effect
5–20	possible chromosomal damage
20–100	temporary reduction in white blood cell count
50–100	temporary sterility in men (up to a year)
100–200	mild radiation sickness, vomiting, diarrhea, fatigue; immune system suppressed; bone growth in children retarded
> 300	permanent sterility in women
> 500	fatal to 50% within 30 days; destruction of bone marrow and intestine
> 3000	fatal within hours

rem=roentgen equivalent in man.



Interazioni con la materia

Vi sono tre tipi di interazioni con la materia in base al tipo di radiazione:

1. Particelle pesanti cariche.
2. Elettroni veloci.
3. Radiazioni elettromagnetiche.



Interazioni con la materia

Vi sono tre tipi di interazioni con la materia in base al tipo di radiazione:

- 1. Particelle pesanti cariche.**
2. Elettroni veloci.
3. Radiazioni elettromagnetiche.



Interazioni – Particelle pesanti cariche

Le particelle dette pesanti sono quelle la cui massa M è molto superiore a quella dell'elettrone m , per esempio il protone, il deutone (nucleo del deuterio: protone + neutrone) e la particella alfa (due protoni e due neutroni legati insieme dalla forza forte).

Le caratteristiche delle interazioni di questo tipo di particella sono:

- Perdita graduale di energia
- Ionizzazione del mezzo
- Eccitazione di particelle ed elettroni degli atomi del mezzo.



Interazioni – Particelle pesanti cariche

Le particelle dette pesanti sono quelle la cui massa M è molto superiore a quella dell'elettrone m , per esempio il protone, il deutone (nucleo del deuterio: protone + neutrone) e la particella alfa (due protoni e due neutroni legati insieme dalla forza forte).

Le caratteristiche delle interazioni di questo tipo di particella sono:

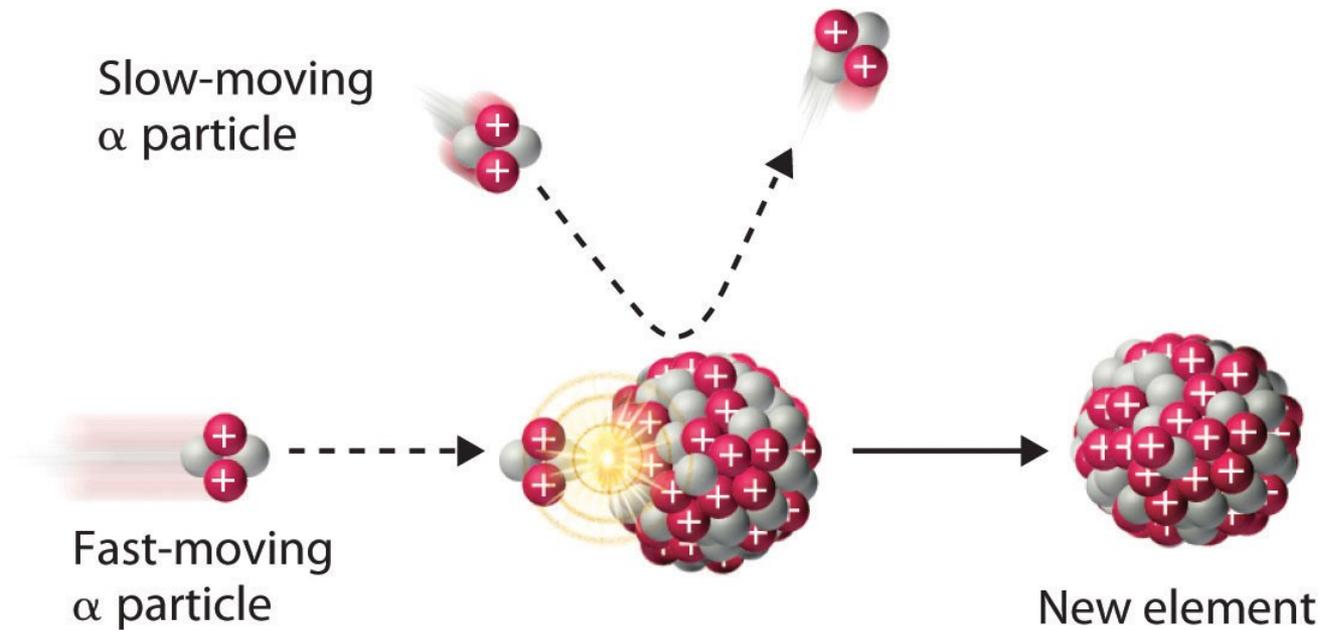
- Perdita graduale di energia
- Ionizzazione del mezzo
- Eccitazione di particelle ed elettroni degli atomi del mezzo.

Gli elettroni secondari a loro volta ionizzano ed eccitano gli atomi del mezzo.

Vi è un notevole numero di ioni e di atomi eccitati lungo il percorso della particella pesante.



Interazioni – Particelle pesanti cariche



Interazioni – Particelle pesanti cariche

Una caratteristica importante è la profondità di penetrazione (range) R , ovvero la distanza trasversale compiuta all'interno del mezzo dalla particella prima di fermarsi.

Per misurare l'energia della particella, la dimensione trasversa del detector deve essere maggiore di R .

In caso di particelle α , vi è una formula empirica per determinare il range R nell'aria a pressione atmosferica:

$$R = 0,32 E^{3/2} \quad [cm]$$

In caso di energia pari a 5 MeV, il range è pari a circa 3.6 cm.



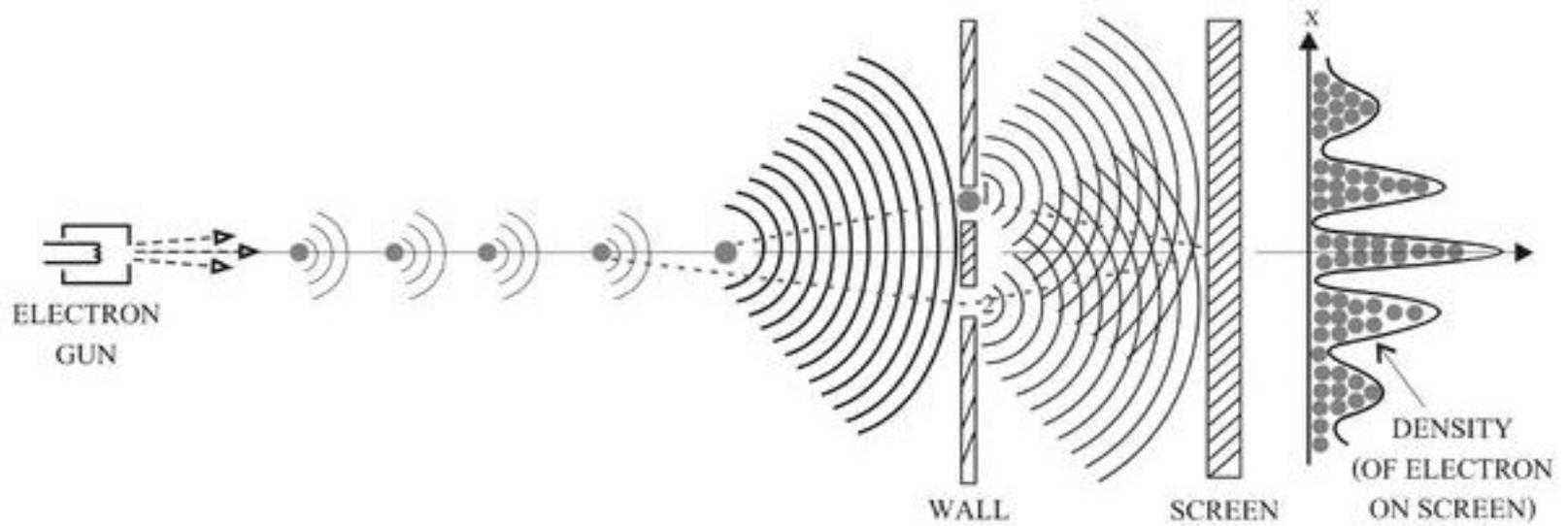
Interazioni con la materia

Vi sono tre tipi di interazioni con la materia in base al tipo di radiazione:

1. Particelle pesanti cariche.
- 2. Elettroni veloci.**
3. Radiazioni elettromagnetiche.



Dualità



Interazioni – Elettroni veloci

Nel caso di elettroni veloci (particelle β), per energie al di sotto dei 3 MeV le perdite sono dovute essenzialmente alle collisioni anelastiche con gli elettroni degli atomi del mezzo.



Interazioni – Elettroni veloci

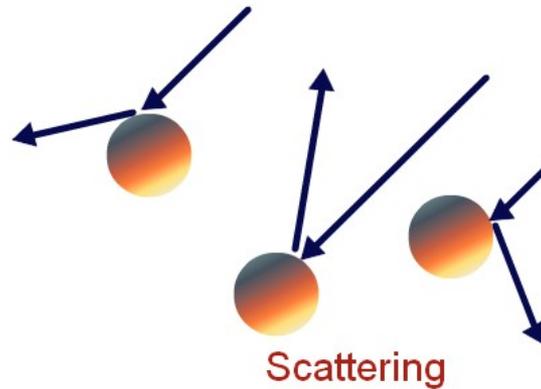
Nel caso di elettroni veloci (particelle β), per energie al di sotto dei 3 MeV le perdite sono dovute essenzialmente alle collisioni anelastiche con gli elettroni degli atomi del mezzo.

Come nel caso delle particelle pesanti, anche queste collisioni producono ionizzazione ed eccitazione degli atomi, tuttavia la probabilità di collisione è estremamente più bassa. Per questo, le perdite di energia di ionizzazione sono più contenute (circa 500 volte meno delle particelle α).



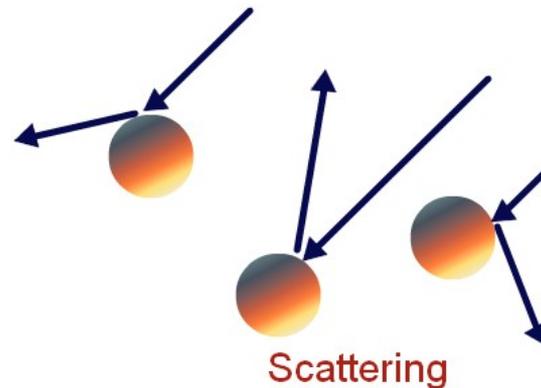
Interazioni – Elettroni veloci

La decelerazione degli elettroni avviene assieme ad un forte scattering (riflessioni multiple). Il percorso di ciascuna particella all'interno del mezzo è particolarmente tortuoso.



Interazioni – Elettroni veloci

La decelerazione degli elettroni avviene assieme ad un forte scattering (riflessioni multiple). Il percorso di ciascuna particella all'interno del mezzo è particolarmente tortuoso.

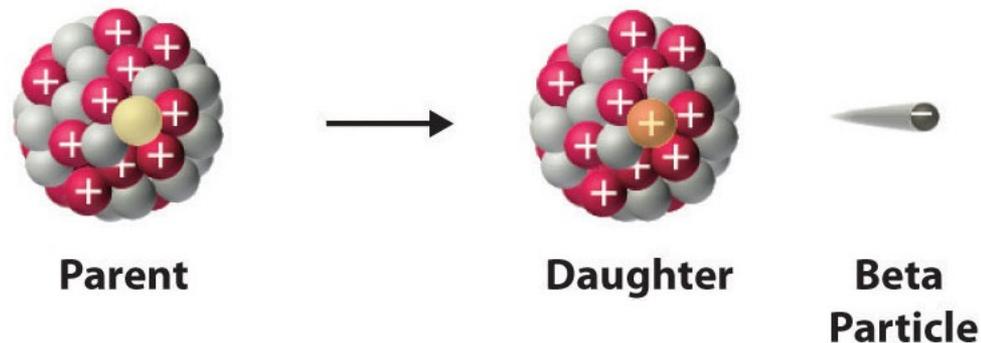


Dato che le masse che entrano in contatto sono uguali, vi è un intenso scambio di energia fra loro. La particella veloce trasmette tutta o parte della sua energia in una singola collisione.

Interazioni – Elettroni veloci

Dato che il percorso è molto tortuoso, è difficile definire un range di penetrazione.

Si utilizza spesso un range equivalente, definito come lo spessore del mezzo che contiene il 97% di tutte le particelle incidenti.



Interazioni con la materia

Vi sono tre tipi di interazioni con la materia:

1. Particelle pesanti cariche.
2. Elettroni veloci.
- 3. Radiazioni elettromagnetiche.**



Interazioni – Radiazioni EM (raggi x e γ)

Le radiazioni interagiscono con la materia attraverso tre processi indipendenti:

1. assorbimento fotoelettrico
2. scattering di Compton
3. produzione di coppie

Il risultato è l'apparizione di particelle ionizzanti secondarie (elettroni e positroni) che sono individuate dal detector.



Interazioni – Radiazioni EM (raggi x e γ)

L'energia di un quanto gamma non è ceduta progressivamente, ma in una singola interazione che avviene in base a leggi probabilistiche. Pertanto, l'attenuazione dell'intensità segue una legge esponenziale:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

x spessore del mezzo

μ coefficiente di attenuazione lineare

I_0 intensità del raggio prima del passaggio nel mezzo.



Interazioni – Radiazioni EM (raggi x e γ)

Ricordando che vi sono tre tipi di interazione, possiamo scrivere il coefficiente di attenuazione atomico come:

$$\mu_a = \tau_a + \sigma_a + \kappa_a$$

τ_a sezione trasversale (cross section) dell'effetto fotoelettrico per atomo

σ_a sezione trasversale dello scattering di Compton per atomo

κ_a sezione trasversale della produzione di coppie per atomo



Interazioni – Radiazioni EM (raggi x e γ)

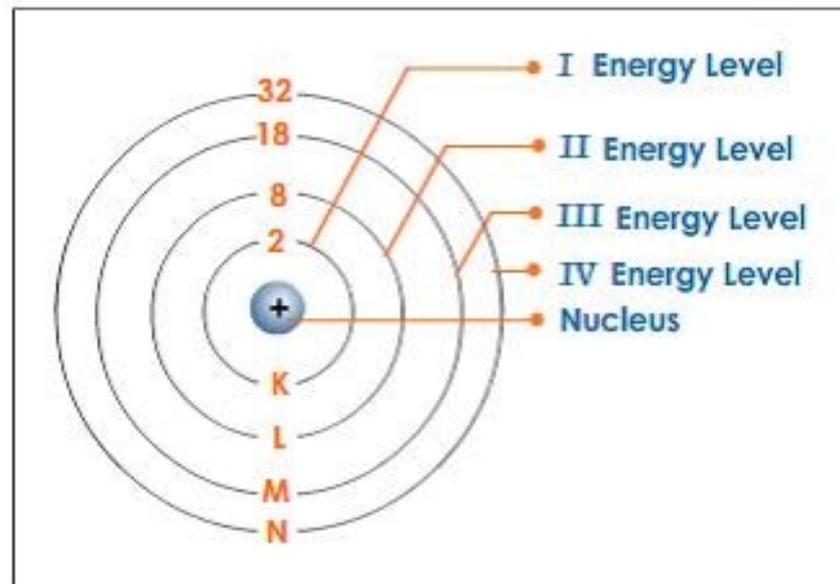
Le radiazioni interagiscono con la materia attraverso tre processi indipendenti:

- 1. assorbimento fotoelettrico**
2. scattering di Compton
3. produzione di coppie



Assorbimento fotoelettrico

La radiazione elettromagnetica libera un elettrone orbitale (come l'effetto fotoelettrico ordinario). La differenza risiede nel fatto che ora l'elettrone viene strappato da uno degli orbitali interni dell'atomo.



Assorbimento fotoelettrico

Equazione del bilanciamento d'energia:

$$E = E_e^K + I_K$$

E energia del gamma-fotone.

E_e^K energia cinetica del foto-elettrone strappato.

I_K energia di estrazione dell'elettrone nel K -esimo orbitale.

La probabilità di avere l'effetto fotoelettrico aumenta quando l'energia del gamma-fotone è vicina all'energia di estrazione.

In questo caso c'è un fenomeno di risonanza e la sezione trasversale dell'effetto fotoelettrico è particolarmente larga.



Interazioni – Radiazioni EM (raggi x e γ)

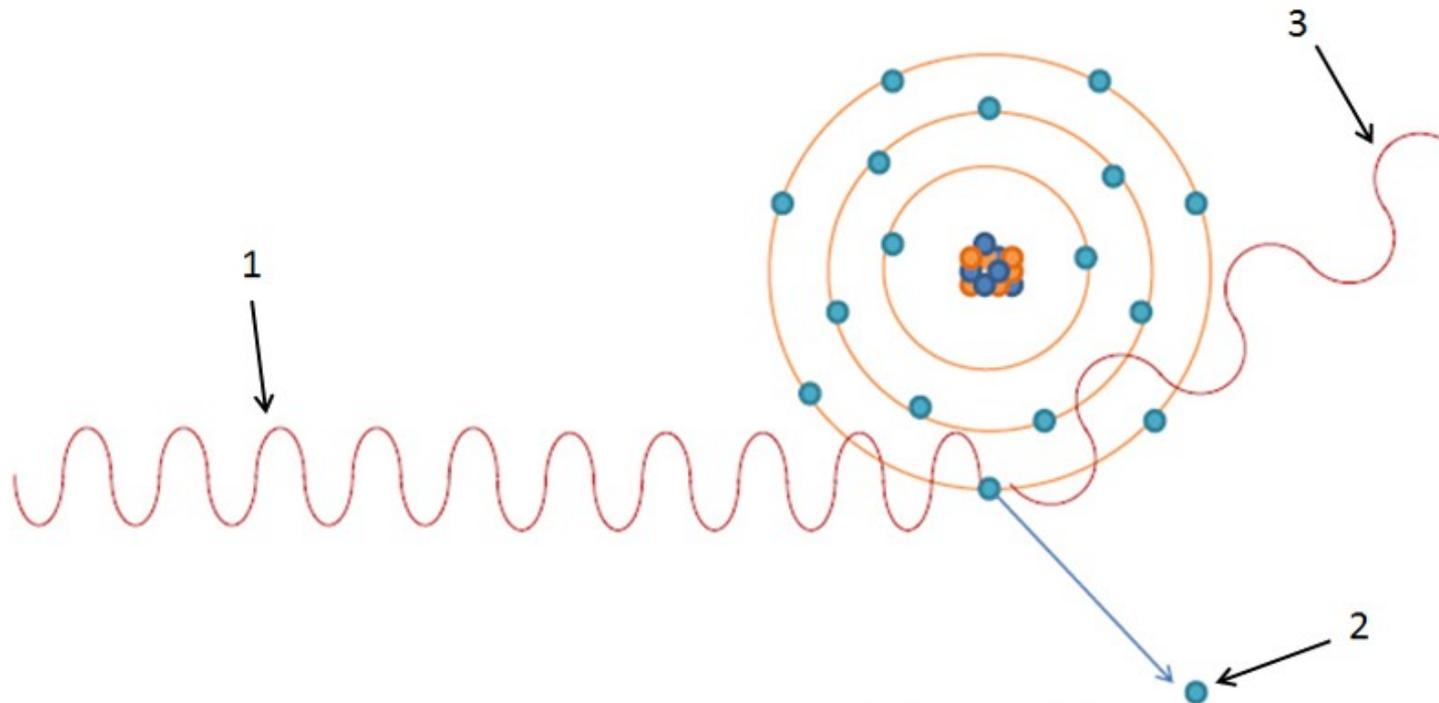
Le radiazioni interagiscono con la materia attraverso tre processi indipendenti:

1. assorbimento fotoelettrico
- 2. scattering di Compton**
3. produzione di coppie



Scattering di Compton

I quanti gamma (1), interagendo con gli elettroni dei livelli esterni, perdono parte della propria energia (3) trasferendone agli elettroni (2) nella forma di energia cinetica e momento angolare a seguito di urto anelastico.



Scattering di Compton

Energie coinvolte:

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$$

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

$$\cot \varphi = (1 + \alpha) \tan \frac{\theta}{2}$$

$E_{\gamma'}$ energia del quanto gamma riflesso.

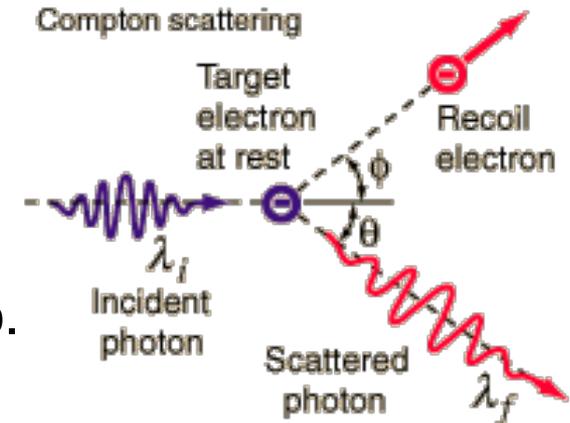
E_{γ} energia quanto gamma incidente.

θ angolo di riflessione del quanto riflesso.

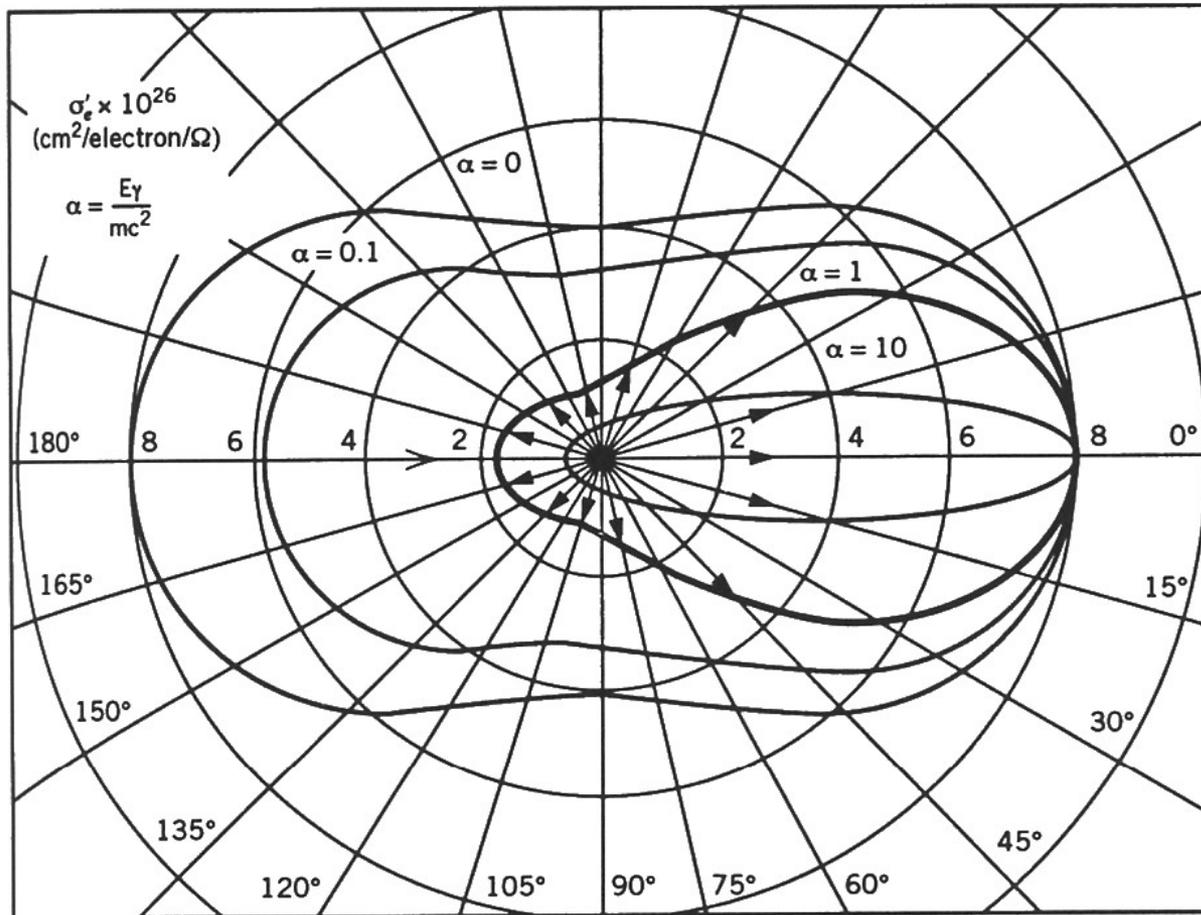
$\alpha = E_{\gamma}/mc^2$ con $mc^2 = 0.511 \text{ MeV}$

E_e energia dell'elettrone

φ angolo di riflessione dell'elettrone



Scattering di Compton



Distribuzione nello spazio dei fotoni riflessi per diversi livelli di energia.

Interazioni – Radiazioni EM (raggi x e γ)

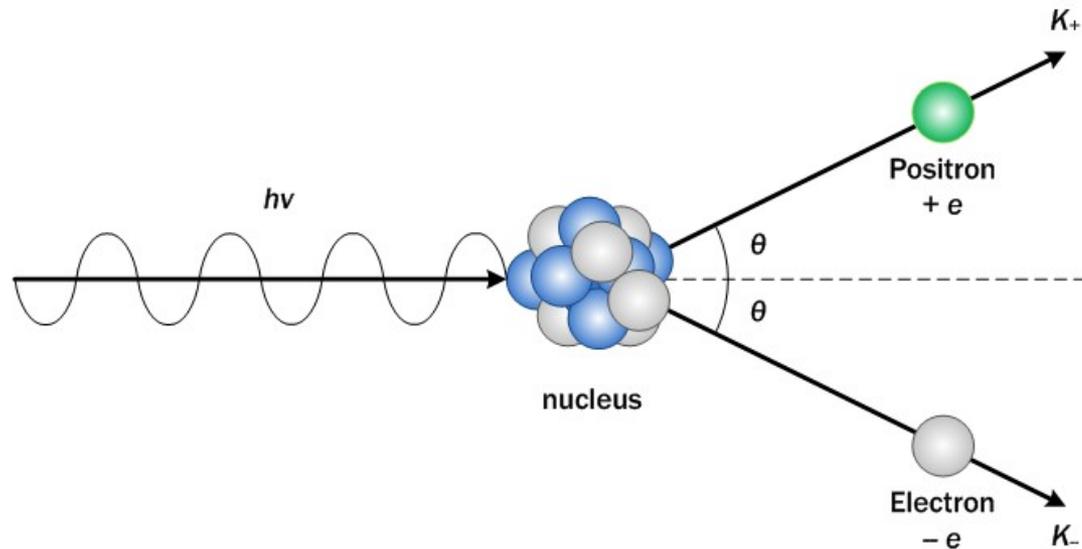
Le radiazioni interagiscono con la materia attraverso tre processi indipendenti:

1. assorbimento fotoelettrico
2. scattering di Compton
- 3. produzione di coppie**



Produzione di coppie

Quando l'energia del gamma-fotone supera $2mc^2=1.02$ MeV, a seguito dell'interazione con il nucleo dell'atomo è possibile che si produca una coppia elettrone-positrone.



L'energia cinetica delle particelle cariche prodotte è:

$$E = E_\gamma - 2mc^2$$

Coefficienti di assorbimento

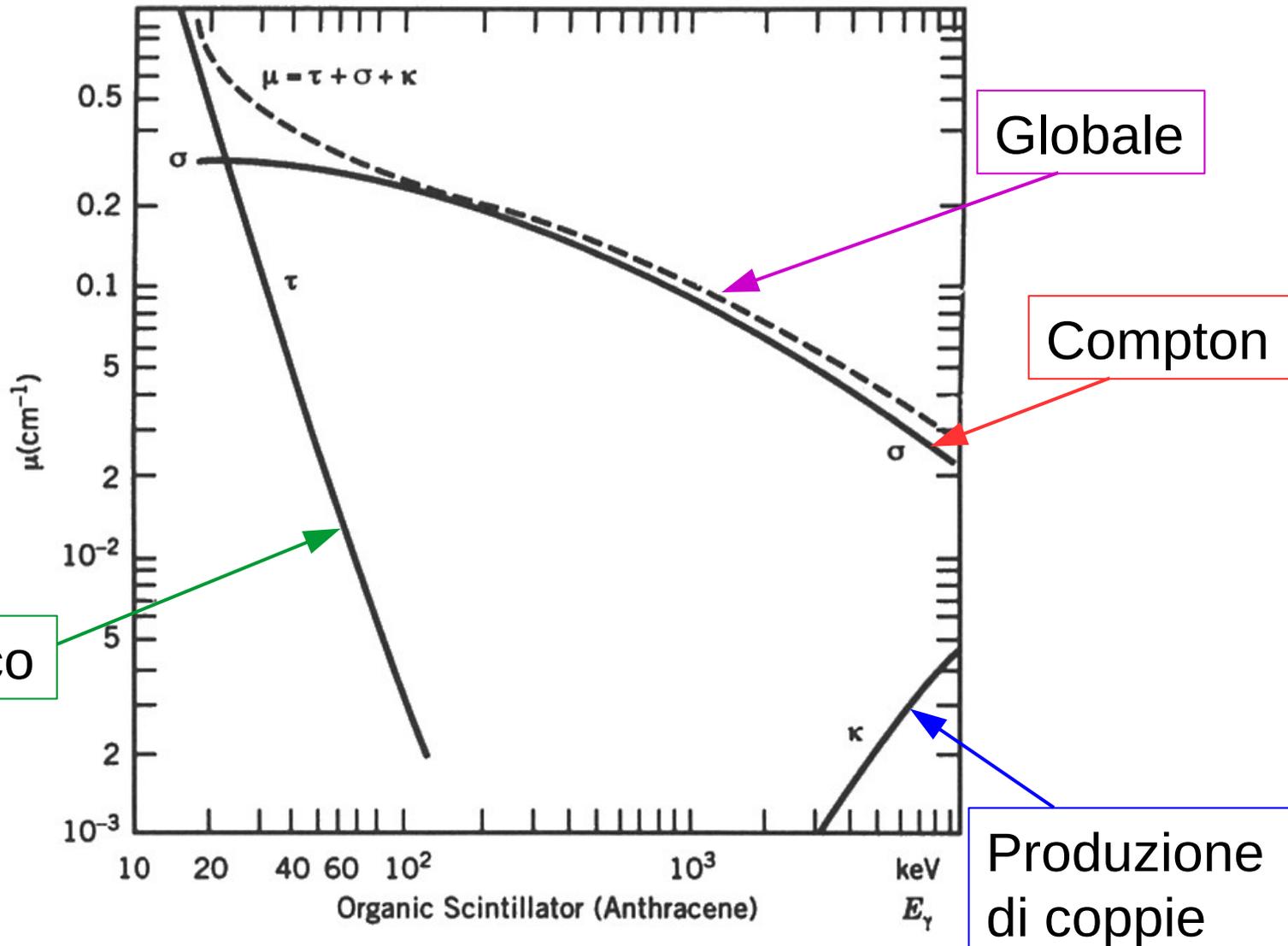
Conoscendo le sezioni trasversali parziali di ciascun effetto possiamo calcolare la sezione trasversale globale del detector.

In generale, possiamo dire che l'effetto fotoelettrico è il predominante per mezzi con numero atomico elevato, ma decresce rapidamente all'aumentare dell'energia della radiazione.

Inoltre, la sezione trasversale dello scattering di Compton è significativa per tutti i mezzi per energie comprese fra 1 keV ed 1 MeV, ma è più intensa nel caso di mezzi con numero atomico piccolo (es. materiali organici).



Coefficienti di assorbimento



Fotoleetrico

Globale

Compton

Produzione di coppie



Coefficienti di assorbimento

