

Grandezze dosimetriche e radioattività'

Adolfo Esposito
Radiation Protection Expert
adolfo.esposito@Inf.infn.it

Gli effetti delle radiazioni sulla materia dipendono dal campo di radiazione e dai coefficienti di interazione

Le grandezze dosimetriche che sono destinate a provvedere a una misura fisica adatta da correlarsi con gli effetti reali e/o potenziali delle radiazioni ionizzanti, non sono altro che il prodotto delle grandezze di campo (fluenza di particelle o di energia) per i coefficienti di interazione.

Le radiazioni interagiscono con la materia in una serie di processi fisici in cui l'energia delle particelle è convertita e alla fine depositata nella materia.

Il termine convertire viene usato in genere per indicare il trasferimento dell'energia dei primari alla radiazione secondaria

Le grandezze usate sono

kerma

È l'energia cinetica ceduta da particelle non cariche ai secondari carichi.

cema

È l'energia perduta dalle particelle cariche nell'interazione con gli elettroni atomici

Il cema differisce dal kerma perché il primo tiene conto dell'energia persa nelle interazioni elettroniche iniziate da particelle cariche mentre il secondo tiene conto dell'energia persa nel fornire energia ai secondari carichi nelle interazioni iniziate da particelle non cariche

Prima di entrare nel dettaglio delle grandezze dosimetriche vale la pena soffermarsi sul concetto di equilibrio di radiazione e delle varie condizioni di equilibrio che si trovano nella pratica.

Alle condizioni di equilibrio si semplificano tutte le relazioni intercorrenti fra le varie grandezze dosimetriche.

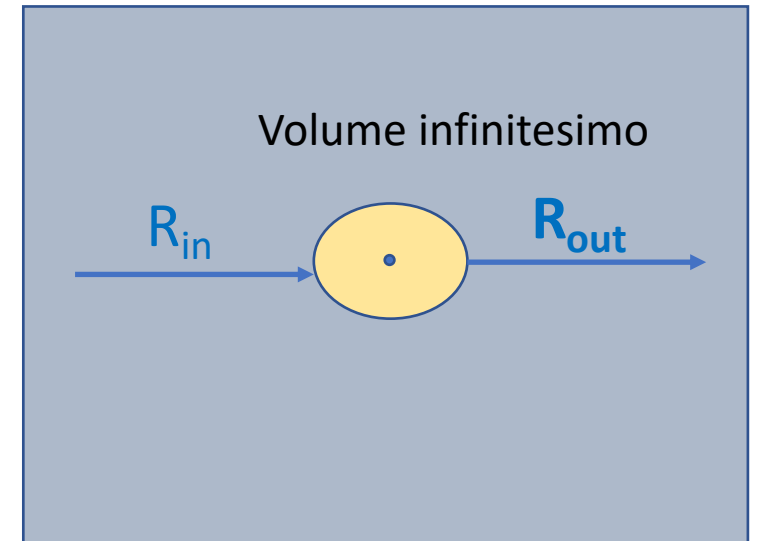
Si definisce equilibrio di radiazione in un certo punto del mezzo irradiato quando il valore dell'energia radiante entrante in un volume infinitesimo intorno al punto e' uguale all'energia radiante uscente

Per alcuni tipi di particelle le condizioni di equilibrio di radiazione non sono raggiungibili. In particolare nel caso della radiazione non ionizzante queste condizioni non sono in genere verificate nella pratica a causa del loro considerevole libero cammino medio.

I secondari carichi messi in moto hanno un libero cammino medio della radiazione primaria. In questo caso si potrebbe parlare di equilibrio delle particelle cariche.

In dosimetria l'equilibrio delle particelle cariche come vedremo sara' molto sfruttato ed utile.

Si ha equilibrio delle particelle cariche quando le energie il numero e la direzione delle particelle cariche sono costanti nel volume di interesse. L'equilibrio delle particelle cariche sussiste quando il range dei secondari carichi e' inferiore alla dimensioni del volume di interesse



Kerma

The kerma, K , for ionizing uncharged particles, is the quotient of dE_{tr} by dm , where dE_{tr} is the mean sum of the initial kinetic energies of all the charged particles liberated in a mass dm of a material by the uncharged particles incident on dm , thus

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

Unit: $J \text{ kg}^{-1}$

The special name for the unit of kerma is gray (Gy)

La grandezza dE_{tr} include l'energia cinetica delle particelle cariche emesse in un decadimento di uno stato eccitato o di una disintegrazione

Concetto di kerma (kinetic energy released per unit mass)

Trattasi dell'energia cinetica iniziale liberata dalla radiazione non ionizzante nell'elemento di volume senza tenere conto di cosa avviene dopo il trasferimento

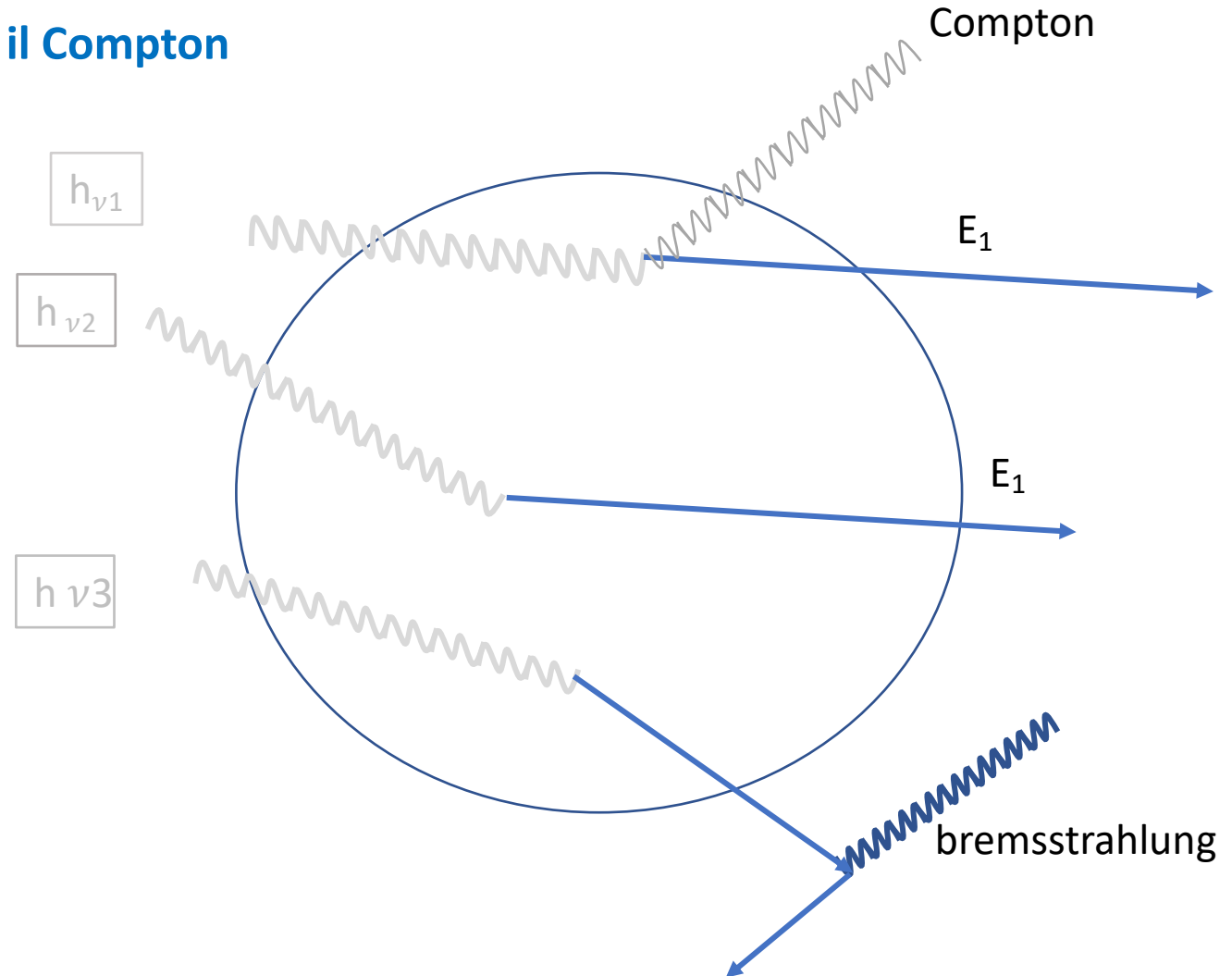
Non contano le energie dei fotoni incidenti incluso il Compton

Il processo di trasferimento di energia avviene in due fasi successive.

Nella prima parte la radiazione primaria mette in moto i secondari carichi.

Nella seconda parte i secondari carichi depositano la loro energia nel mezzo.

Il kerma e' riferibile alla sola prima parte



Nota la fluena delle particelle indirettamente ionizzanti (fotoni e neutroni) in un punto di un mezzo e noto il coefficiente di trasferimento massico del mezzo per quel tipo di particelle allora

$$K = \Phi E \frac{\mu_{tr}}{\rho} = \Psi \frac{\mu_{tr}}{\rho}$$

La quantita'

$$\frac{K}{\Phi} = E \frac{\mu_{tr}}{\rho}$$

viene chiamata coefficiente di kerma

Nel passato veniva chiamato kerma factor ora non piu' .

L'ICRU ritiene che il nome fattore non implica dimensioni fisiche che quel rapporto ha.

Nei calcoli dosimetrici si ha a che fare con le distribuzioni di fluena di particelle non cariche Φ_E

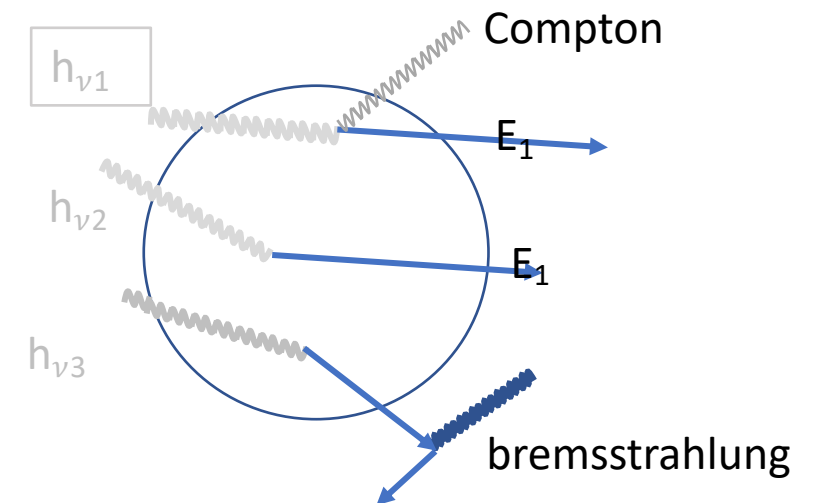
$$K = \int \Phi_E E \frac{\mu_{tr}}{\rho} dE = \int \Psi_E \frac{\mu_{tr}}{\rho} dE$$

L'espressione del kerma in funzione della fluena rende chiaro che ci si riferisce a un valore per un dato materiale in un punto dello spazio libero o all'interno di un dato materiale

Sebbene il kerma si riferisca solo all'energia cinetica ceduta alla materia puo' essere talvolta usata come un'approssimazione della dose assorbita come avremo modo di vedere successivamente

E questo e' tanto piu' vero quanto ci si avvicini all'equilibrio delle particelle cariche, le perdite di energia per irraggiamento sono trascurabili e l'energia cinetica delle particelle e' grande paragonato alle energie di legame.

Il range dei secondari carichi e' inferiore alla dimensioni del volume di interesse



Si e' talvolta approssimata la dose utilizzando il kerma di collisione

$$K_{col} = \Phi E \frac{\mu_{en}}{\rho} = \Phi E \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1-g) = K (1-g)$$

E nel caso di distribuzione di fluenza Φ_E di particelle non cariche allora

$$K_{col} = \int \Phi_E E \frac{\mu_{en}}{\rho} dE = \int \Phi_E E \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1-g) dE = K (1-\bar{g})$$

Dove il valore \bar{g} e' il valore medio di g mediato sulla distribuzione di kerma rispetto all'energia dell'elettrone

Kerma Rate

The kerma rate, \dot{K} , is the quotient of dK by dt , where dK is the increment of kerma in the time interval dt , thus

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt}$$

Unit: $\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$

If the special name gray is used, the unit of kerma rate is gray per second (Gy s^{-1})

Exposure

The exposure, X , is the quotient of dq by dm , where dq is the absolute value of the mean total charge of the ions of one sign produced when all the electrons and positrons liberated or created by photons incident on a mass dm of dry air are completely stopped in dry air, thus

$$X = \frac{dq}{dm}$$

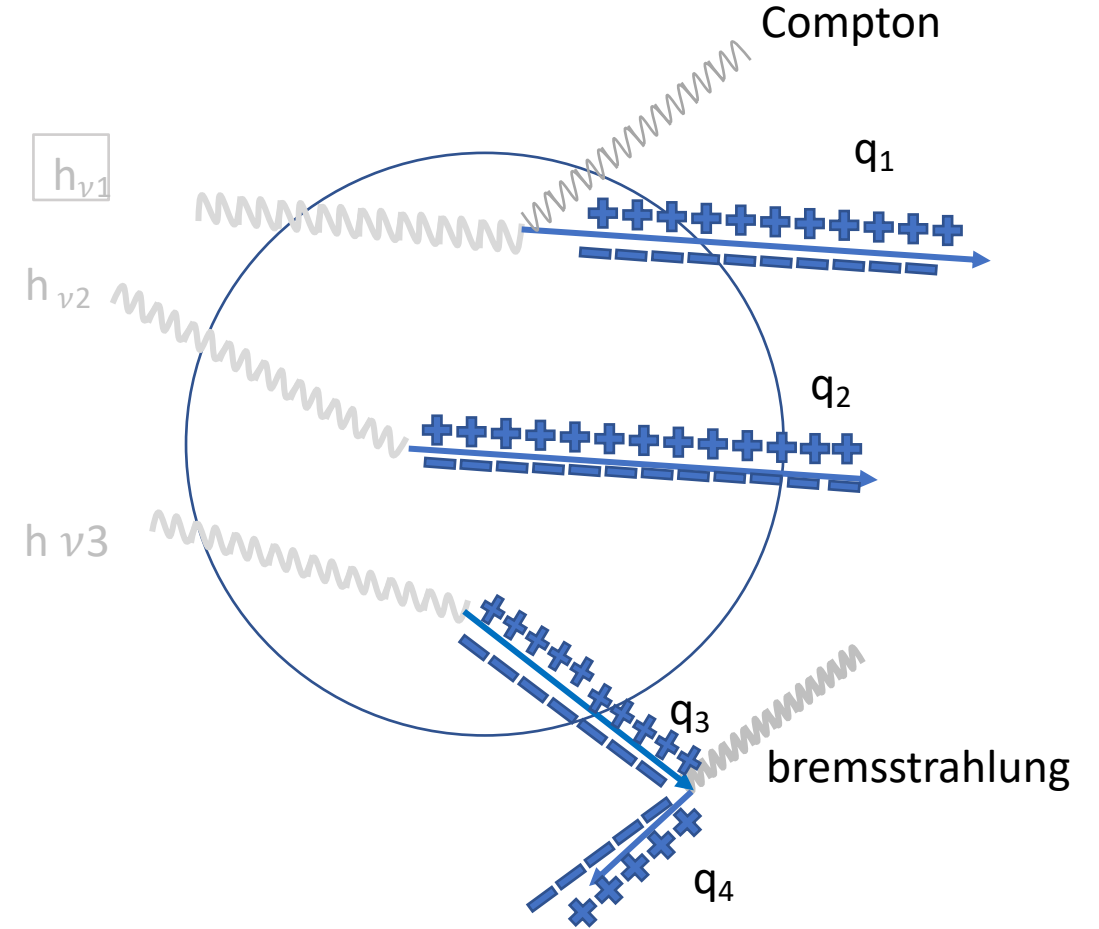
Unit: C kg^{-1}

Concetto di Esposizione

Quindi si considera un elemento di volume di aria di massa dm e si vanno a sommare tutte cariche elettriche di uno stesso segno prodotte in aria quando tutti gli elettroni e positroni liberati dai fotoni nell'elemento di volume sono completamente fermata in aria

Quando si effettuano misure di esposizione e' necessario che le condizioni di equilibrio delle particelle cariche siano sempre verificate e questo perche' la ionizzazione prodotta dagli elettroni secondari che lo attraversano deve essere uguale a quella prodotta ovunque dagli elettroni in esso originate, se si vuole che la carica raccolta sia proprio quella degli ioni generati nell'elemento

La condizione di equilibrio delle particelle cariche non e' possibile gia' a partire da fotoni di energia >3 MeV L'uso dell' Esposizione e' pertanto limitata



E' evidente che in condizioni di equilibrio delle particelle cariche la grandezza esposizione e' legata da semplici relazioni alle grandezze radiometriche.

Prendiamo ad esempi un fascio di fotoni monocromatici per evitarci il problema di conoscerne la distribuzione

L'energia ceduta per unita' di massa e' data dalla fluenza di energia Ψ moltiplicato il coefficiente di attenuazione massico $(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{aria}$, il numero di ioni prodotti nell'unita' di massa aria sara' $\Psi (\frac{\mu_{en}}{\rho})_{aria} / \bar{W}_{aria}$

\bar{W}_{aria} e' l'energia media per produrre una coppia di ioni in aria quindi

$$X = \frac{e}{\bar{W}_{aria}} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{aria} \Psi$$

Exposure Rate

The exposure rate, \dot{X} , is the quotient of dX by dt , where dX is the increment of exposure in the time interval dt , thus

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

Unit: $C\ kg^{-1}\ s^{-1}$

Introducendo il rateo di
fluenza di energia

$$\dot{X} = \frac{e}{\bar{W}_{aria}} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{aria} \dot{\Psi}$$

$$\dot{K}_{aria} = \dot{\Psi} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{aria}$$

Cema

The cema, C , for ionizing charged particles, is the quotient of dE_{el} by dm , where dE_{el} is the mean energy lost in electronic interactions in a mass dm of a material by the charged particles, except secondary electrons, incident on dm , thus

$$C = \frac{dE_{el}}{dm}$$

Unit: J kg^{-1}

The special name for the unit of cema is gray (Gy)

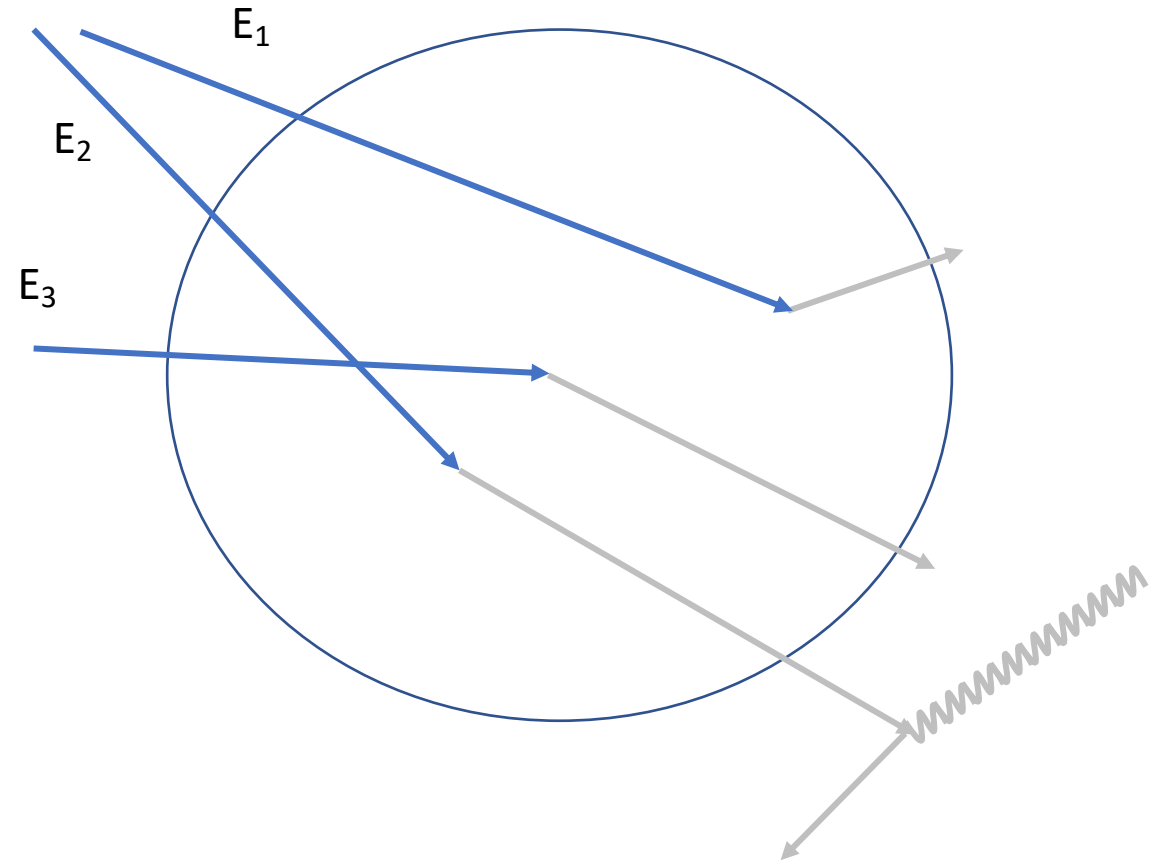
Concetto di CEMA (Converted Energy for Unit Mass)

Trattasi dell'energia cinetica iniziale liberata dalla particelle cariche nell'elemento di volume senza tenere conto di cosa avviene dopo il trasferimento

Nel computo sono incluse le energie spese per superare le energie di legame degli elettroni atomici e l'energia cinetica iniziale degli elettroni secondari

Anche per il Cema si possono scrivere espressioni in funzione della fluena delle particelle cariche

$$C = \int \Phi_E \frac{S_{el}}{\rho} dE = \int \Phi_E \frac{L_{\infty}}{\rho} dE$$



Cema Rate

The cema rate, \dot{C} , is the quotient of dC by dt , where dC is the increment of cema in the time interval dt , thus

$$\dot{C} = \frac{dC}{dt}$$

Unit: $\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$

If the special name gray is used, the unit of cema rate is gray per second (Gy s^{-1})

Energy Deposit

The energy deposit ϵ_i , is the energy deposited in a single interaction, i , thus

$$\epsilon_i = \epsilon_{in} - \epsilon_{out} + Q$$

where ϵ_{in} is the energy of the incident ionizing particle (excluding rest energy), ϵ_{out} is the sum of the energies of all charged and uncharged ionizing particles leaving the interaction (excluding rest energy), and Q is the change in the rest energies of the nucleus and of all elementary particles involved in the interaction ($Q > 0$) decrease of rest energy ($Q < 0$) increase of rest energy).

Unit: J

ϵ_i può essere espresso in eV

ϵ_i è una grandezza stocastica

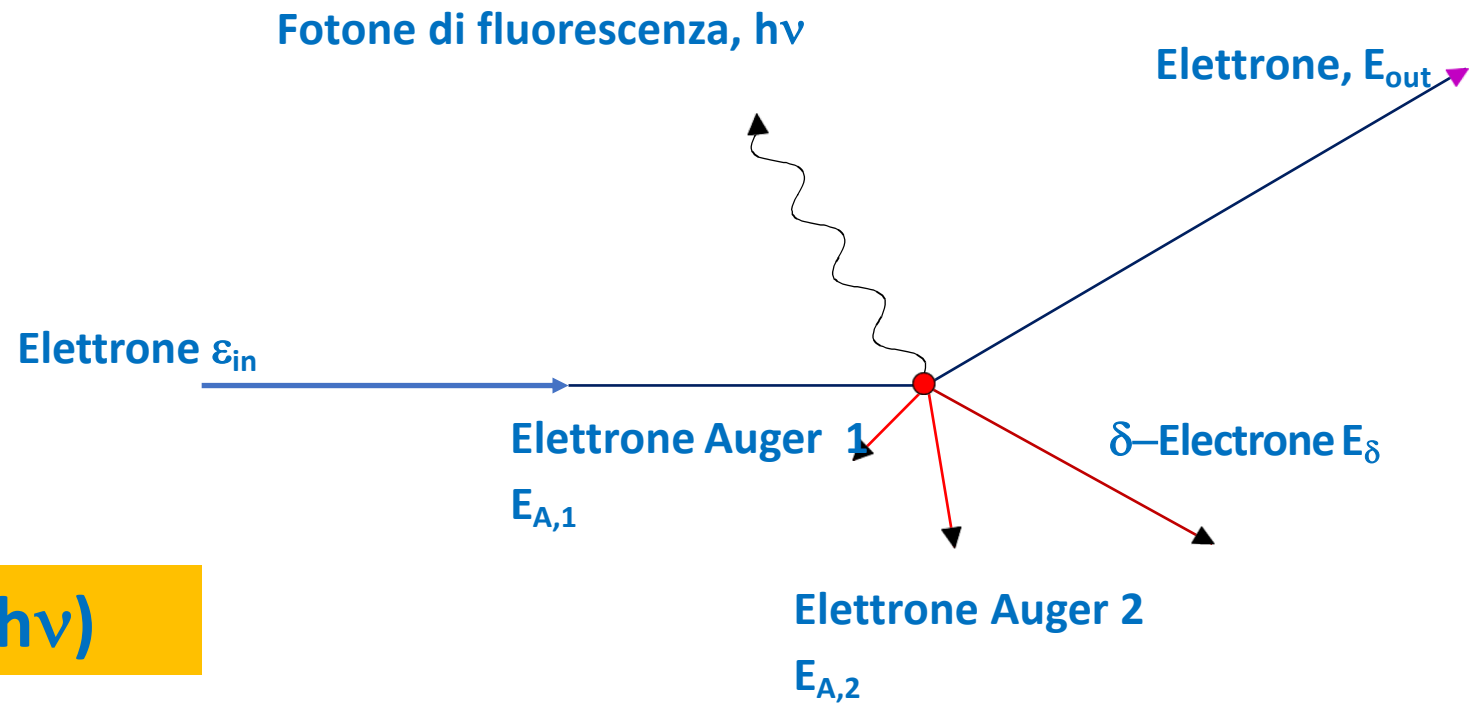
Concetto di deposito di energia (singola interazione)

Il deposito di energia puo' essere considerato come l'energia depositata nel punto di interazione, detto anche punto di trasferimento, cioe' il sito dove una particella ionizzante perde la sua energia cinetica

I depositi di energia e i punti di trasferimento senza ulteriori dettagli dell'interazione che li causa sono sufficienti per una descrizione della distribuzione spaziale della deposizione di energia da parte delle particelle ionizzanti

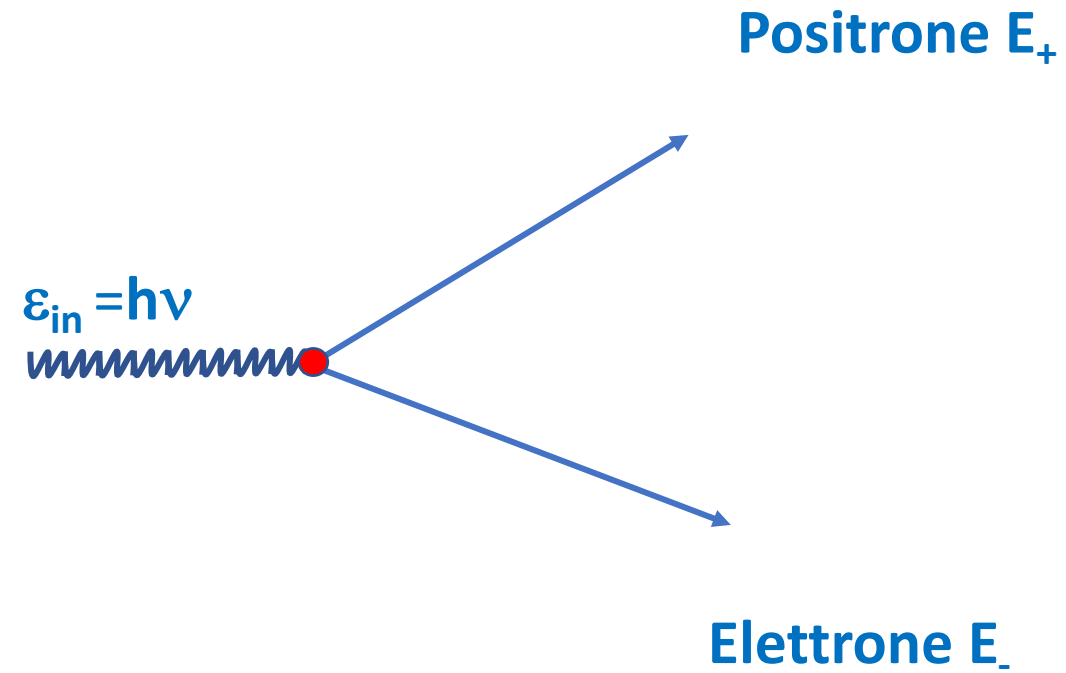
Esempio di deposito di energia con $Q=0$

Una particella carica collide con un elettrone atomico. Di conseguenza l'elettrone e' estratto e successivamente alla diseccitazione della struttura elettronica un fotone di fluorescenza e due elettroni Auger sono emessi



$$\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - (E_{A,1} + E_{A,2} + E_{out} + E_{\delta} + h\nu)$$

Esempio di deposito di energia con $Q < 0$

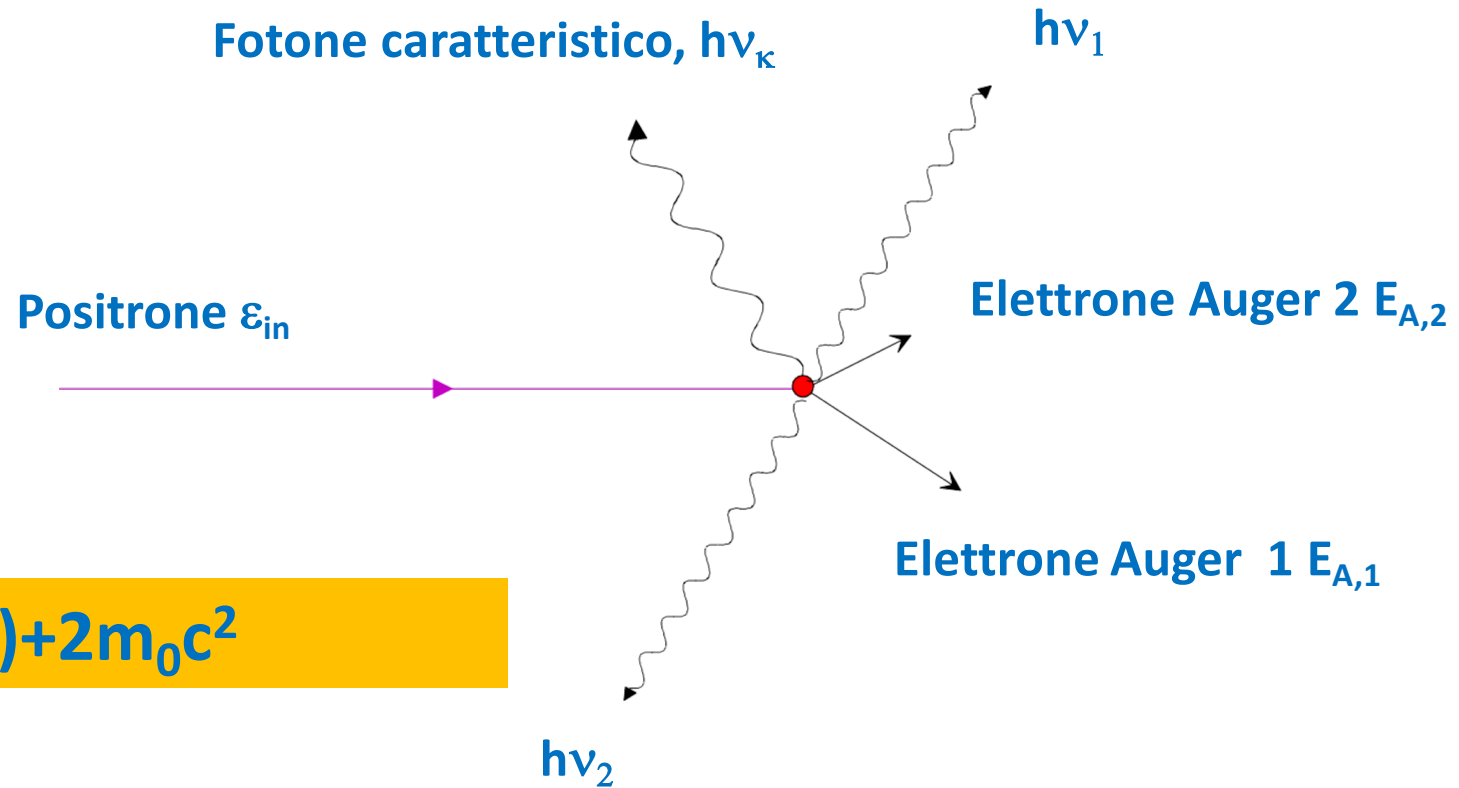


$$e_i = h\nu - (E_+ + E_- + E_{out}) - 2m_0c^2$$

Esempio di deposito di energia con $Q>0$

Il deposito di energia di un positrone nell'ambito di un processo di annichilazione e' un processo con $Q>0$

Successivamente alla diseccitazione della struttura elettronica sono emessi un fotone caratteristico due elettroni Auger



$$\epsilon_i = \epsilon_{in} - (E_{A1} + E_{A2} + h\nu_K + h\nu_1 + h\nu_2) + 2m_0c^2$$

Energy Imparted

The energy imparted ε , to the matter in a given volume is the sum of all energy deposits in the volume, thus

$$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i$$

where the summation is performed over all energy deposits, ε_i , in that volume.

Unit: J

ε può essere espresso in eV
 ε è una grandezza stocastica

La dipendenza di ε dal volume e dal tempo di osservazione deriva dalla distribuzione nello spazio e nel tempo dei singoli processi di base

Concetto di energia impartita

I depositi di energia su cui la somma e' effettuata possono appartenere a uno o piu'eventi
Dove per evento si intende l'impartire alla materia energia da particelle statisticamente correlate (protoni e i suoi elettroni secondari, una coppia e^+ e e^- , particelle secondarie in una reazione nucleare).

Se l'energia impartita in un dato volume e' dovuta a un singolo evento essa e' uguale alla somma dei depositi di energia nel volume associato dell'evento.

Se l'energia impartita in un dato volume e' dovuta a diversi eventi essa e' uguale alla somma delle singole energie impartite alla materia nel volume dovuto a ciascun evento

L'energia impartita si riferisce a volume piccoli

Un rivelatore di radiazioni risponde all'irraggiamento con un segnale M che e' praticamente riferibile all'energia impartita al volume del rivelatore

Definizione di evento di deposizione d'energia

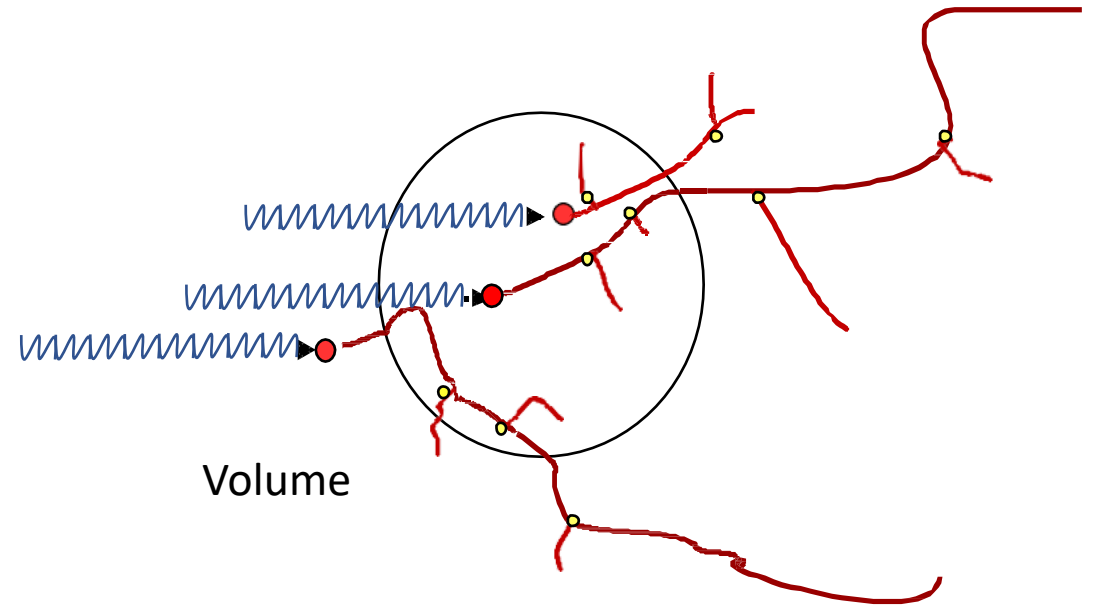
Si considera l'energia impartita nel piccolo volume V dai secondari carichi messi in moto da un fascio di fotoni

I fotoni primari sono statisticamente indipendenti

Gli elettroni generati dai diversi fotoni sono non correlati

Tuttavia esiste una correlazione quando un elettrone secondario rallenta generando altri elettroni secondari

Il fotone incidente primario, l'elettrone secondario e tutti gli altri elettroni prodotti sono correlati e appartengono allo stesso evento



I singoli eventi poi sono correlati in tempo

Energia media impartita alla materia $\bar{\epsilon}$

L'energia impartita, $\bar{\epsilon}$, in un elemento di volume determinato è definita dalla seguente relazione

$$\bar{\epsilon} = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

dove

- R_{in} è la somma delle energie (escluse quelle di quiete) di tutte le particelle direttamente e indirettamente ionizzanti che entrano nell'elemento di volume considerato (Energia Radiante incidente).
- R_{out} è la somma delle energie (escluse quelle di quiete) di tutte le particelle direttamente e indirettamente ionizzanti che escono dall'elemento di volume considerato (Energia Radiante uscente).
- $\sum Q$ è la somma delle energie liberate meno la somma delle energie spese per aumentare la massa del sistema (energie spese per ogni trasformazione di nuclei e particelle nel volume di interesse).

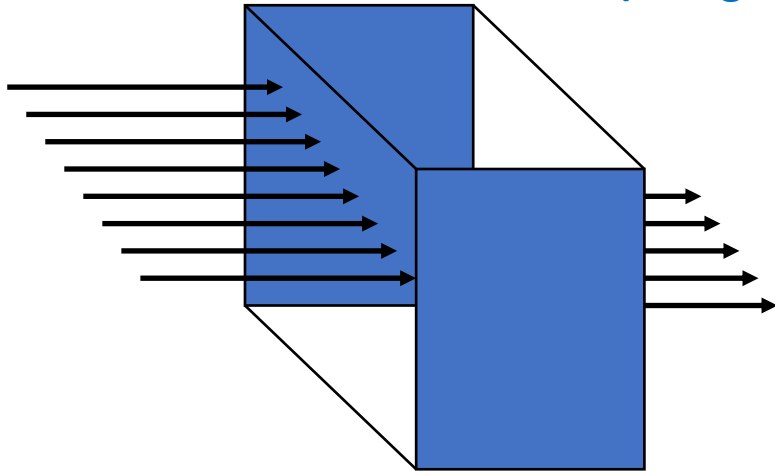
$\bar{\epsilon}$ e' una grandezza non stocastica

Le particelle devono intendersi sia cariche neutre

Volume di riferimento

Particelle entranti
(Energia radiante entrante)

Particelle uscenti
(Energia radiante uscente)



Al termine ΣQ contribuiscono le diseccitazioni, le interazioni e i decadimenti che avvengono nel volume purché nell'intervallo di osservazione considerato.

$\bar{\epsilon}$ dipende dal tempo di osservazione e dal volume di interesse.

Nell'ipotesi di decadimenti di radionuclidi formati nell'elemento di volume sia l'energia radiante uscente che il termine ΣQ aumentano con l'aumentare del tempo di osservazione, considerato ovviamente a partire dal passaggio della radiazione primaria.

Da ciò consegue che una volta stabilito un tempo di osservazione i processi che avvengono al di fuori di tale tempo non vengono presi in considerazione.

Inoltre i decadimenti spontanei e le diseccitazioni di radionuclidi formati prima dell'intervallo di osservazione sono eventi che possono contribuire all'energia impartita.

Lineal Energy

The lineal energy, y , is the quotient of ε_s by \bar{l} , where ε_s is the energy imparted to the matter in a given volume by a single energy-deposition event, and \bar{l} is the mean chord length of that volume, thus

$$y = \frac{\varepsilon_s}{\bar{l}}$$

Unit: J m^{-1}

Poiché ε_s è la somma dei depositi di energia in un volume dovuto a un singolo evento può essere espresso in eV e di conseguenza y in $\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$

Poiché \bar{l} è la lunghezza della corda media dell'elemento di volume considerato talvolta l'energia lineale y è detta anche grandezza dell'evento

L'energia lineale è una grandezza stocastica

E' utile introdurre funzioni di distribuzione dell'energia lineale

Il valore dalla funzione di distribuzione $F(y)$ è la probabilità che l'energia lineale dovuta a un singolo evento di deposizione di energia sia minore o uguale a y .

Allora la densità di probabilità $f(y)$ è la derivata di $F(y)$

$$f(y) = \frac{dF(y)}{dy}$$

Sia $f(y)$ che $F(y)$ sono dipendenti dalla grandezza e dalla forma del volume

Ma non dipendono dalla dose assorbita o dal rateo di dose assorbita.

Specific Energy

The specific energy (imparted), z , is the quotient of e by m , where e is the energy imparted by ionizing radiation to matter in a volume of mass m , thus

$$z = \frac{\varepsilon}{m}$$

Unit: J kg⁻¹

The special name for the unit of specific energy is gray (Gy)

L'energia specifica impartita è una grandezza stocastica

L'energia specifica può essere dovuta a uno o più eventi di deposizione di energia.

La funzione di distribuzione $F(z)$ è la probabilità che l'energia specifica sia uguale o minore di z .

La densità di probabilità $f(z)$ sarà la derivata di $F(z)$ pertanto

$$f(z) = \frac{dF(z)}{dz}$$

$f(z)$ e $F(z)$ dipendono dalla dose assorbita nella massa m

Per definizione $\int_0^{\infty} f(z) dz = 1$

Absorbed Dose

The absorbed dose, D , is the quotient of $d\bar{\varepsilon}$ by dm , where $d\bar{\varepsilon}$ is the mean energy imparted by ionizing radiation to matter of mass dm , thus

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

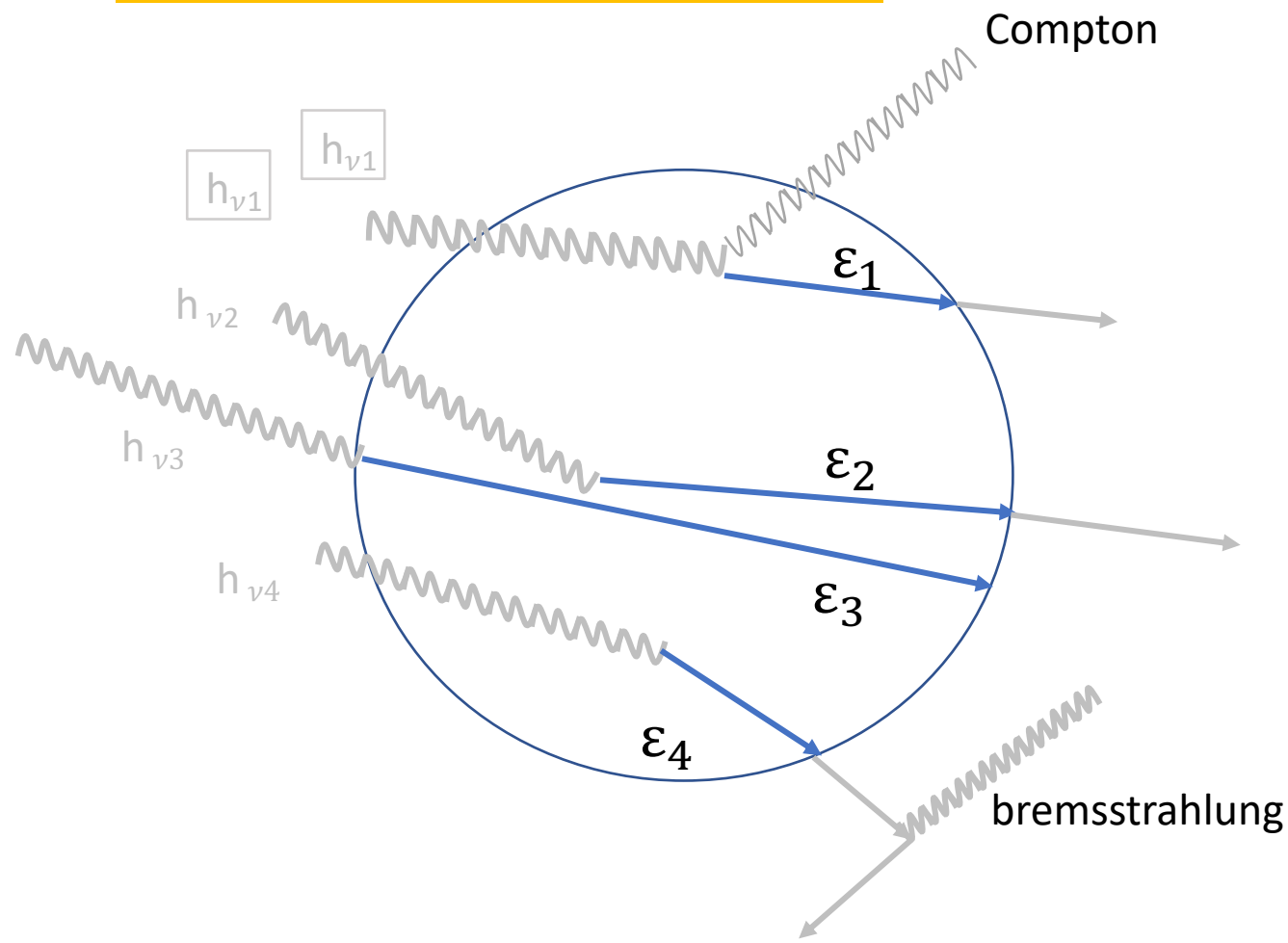
Unit: J kg⁻¹

The special name for the unit of absorbed dose is gray (Gy)

Concetto di dose assorbita

La quantità $\bar{\epsilon}$ rappresenta il valor medio dell'energia impartita alla materia in un volume infinitesimo di massa m .

$$\bar{\epsilon} = R_{in} - R_{out} + \sum q$$



Per determinare la dose in un certo punto e' necessario valutare $\bar{\epsilon}$ che richiede ripetute esposizioni di elementi finite di massa nel campo di radiazione di interesse e successive operazione di media sugli ϵ misurati.

Questa media e' proporzionale alla dose assorbita media e da questa di puo' passare alla dose assorbita nel punto di interesse facendo tendere a zero la massa.

La quantita' $d\bar{\epsilon}$ rappresenta il valore medio dell'energia impartita in un volume infinitesimo la cui massa è m.

Ma attenzione la dose assorbita non è la derivata rispetto ad m.

La quantità $\bar{\epsilon}$ non è funzione di m

Per D e' possibile scrivere

$$D = \lim_{m \rightarrow 0} \frac{\bar{\epsilon}}{m} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{\rho} \frac{\bar{\epsilon}}{V}$$

Absorbed Dose Rate

The absorbed-dose rate, \dot{D} , is the quotient of dD by dt , where dD is the increment of absorbed dose in the time interval dt , thus

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Unit: $\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$

If the special name gray is used, the unit of absorbed dose rate is gray per second (Gy s^{-1})

Radioattività

Con il termine radioattività si intendono tutti quei fenomeni associate alle trasformazioni spontanee che genera cambiamenti nei nuclei degli atomi o dei loro stati energetici.

L'energia rilasciata in queste trasformazioni è emessa come particelle nucleari (particelle alfa, elettroni e positroni) e/o fotoni

Si definisce nuclide una specie atomica con il suo numero di protoni e neutroni nel suo nucleo.

Si definisce radionuclide qualsiasi nuclide instabile che si trasforma in uno stabile o in una famiglia instabile

Decay constant

The decay constant, λ , of a radionuclide in a particular energy state is the quotient of $-dN/N$ by dt , where dN/N is the mean fractional change in the number of nuclei in that energy state due to spontaneous nuclear transformations in the time interval dt , thus

$$\lambda = -\frac{dN/N}{dt}$$

Unit: s^{-1}

The quantity $(\ln 2)/\lambda$, commonly called the half life, $T_{1/2}$, of a radionuclide, is the mean time taken for the radionuclides in the particular energy state to decrease to one half of their initial number.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Rappresenta la variazione dei radionuclidi presenti e detto N_0 il numero di radionuclidi iniziali

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

E' il numero di atomi radiattivi al tempo t

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} tN(t)dt}{\int_0^{\infty} N(t)dt} = \frac{1}{\lambda}$$

E' la vita media che corrisponde all'intervallo di tempo nel quale il numero di radionuclide iniziali si reduce di un fattore e

$$T_{1/2} = (\ln 2) / \lambda = \tau (\ln 2)$$

L'intensita' di una sorgente radioattiva non e' specificata attraverso il numero di radionuclidi presenti al tempo t o con il numero di particelle o fotoni emessi ma attraverso il numero di disintegrazione che avvengono nell'unita' di tempo piuttosto che

Activity

The activity, A , of an amount of a radionuclide in a particular energy state at a given time is the quotient of $-dN$ by dt , where dN is the mean change in the number of nuclei in that energy state due to spontaneous nuclear transformations in the time interval dt , thus

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

Unit: s^{-1}

The special name for the unit of activity is becquerel (Bq)

The activity, A , of an amount of a radionuclide in a particular energy state is equal to the product of the decay constant, λ , for that state, and the number N of nuclei in that state, thus,

$$A = \lambda N$$

L'attività non ci dà indicazioni sulla quantità di materiale radioattivo presente.

Se volessimo conoscere informazioni sulla concentrazione di radioattività allora dovremmo far uso dell'attività specifica A_s

L'attività specifica è il numero di disintegrazioni per unità di tempo nell'unità di massa

$$A_s = \lambda \frac{N_A}{M_A}$$

Unit: Bq g⁻¹

Air-kerma-Rate Constant

The air-kerma-rate constant, Γ_δ , of a radio-nuclide emitting photons is the quotient of $l^2 \dot{K}_\delta$ by A , where \dot{K}_δ is the air-kerma rate due to photons of energy greater than δ , at a distance l in vacuo from a point source of this nuclide having an activity A , thus

$$\Gamma_\delta = \frac{l^2 \dot{K}_\delta}{A}$$

Unit: $\text{m}^2 \text{Jkg}^{-1}$

If the special names gray (Gy) and becquerel (Bq) are used, the unit of air-kerma-rate constant is $\text{m}^2 \text{Gy Bq}^{-1} \text{s}^{-1}$.

I fotoni inclusi nella definizione sono i raggi gamma, i raggi x caratteristici e la radiazione di frenamento interna

La costante air-kerma-rate, caratteristica di ogni radionuclide, e' definita in termini di una sorgente ideale puntiforme

Per una sorgente di dimensioni finite possono aversi attenuazione, scattering, annichilazioni ed radiazione di frenamento esterna

