

Coefficienti di interazione

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

In una interazione fra radiazione e materia, l'energia e la direzione di una particella incidente possono subire una alterazione o in alternativa la particella e' assorbita.

A seguito dell'interazione si puo' avere l'emissione di radiazione secondaria

La probabilita' di tale interazione e' caratterizzata dai coefficienti di interazione

Essi sono riferibili a specifici processi di interazione, tipo ed energia delle radiazioni e targhetta o materiale attraversato

Radiazioni indirettamente ionizzanti

Particelle neutre

Radiazioni direttamente ionizzanti

Particelle cariche

Le particelle indirettamente ionizzanti sono principalmente raggi X e gamma e neutroni che interagendo con la materia mettono in moto particelle cariche secondarie, rispettivamente elettroni e positroni, protoni e nuclei

I secondari carichi messi in moto sono i responsabili dell'energia depositata nei materiali attraversati.

TABLE 2.2 – Classification of photon interactions

Type of interaction	Absorption	Elastic (Coherent)	Inelastic (Incoherent)
Interaction with	A	B	C
I. Atomic electrons	Photoelectric effect $\tau_{pe} \begin{cases} \propto Z^4 \text{ (low energy)} \\ \propto Z^5 \text{ (high energy)} \end{cases}$	Rayleigh scattering $\sigma_R \propto Z^2$ (low energy limit)	Compton scattering $\sigma \propto Z$
II. Nucleons	<i>Photonuclear reactions</i> $(\gamma, n) (\gamma, p) (\gamma, f), \text{ etc.}$ $\sigma_{\gamma N} \propto Z$ $(h\nu \geq 10 \text{ MeV})$	Elastic nuclear scattering	Nuclear resonance scattering
III. Electric field of charged particles	Pair production a. Field of nucleus $\kappa_n \propto Z^2 \text{ (} h\nu \geq 1.02 \text{ MeV)}$ b. <i>Field of electron</i> $\kappa_e \propto Z \text{ (} h\nu \geq 2.04 \text{ MeV)}$	Delbrück scattering	
IV. Mesons	Photomeson production $h\nu \geq 140 \text{ MeV}$		

Cross Section

The cross section, σ , of a target entity, for a particular interaction produced by incident charged or uncharged particles of a given type and energy, is the quotient of N by Φ , where N is the mean number of such interactions per target entity subjected to the particle fluence Φ , thus

Unit: m^2

$$\sigma = \frac{N}{\Phi}$$

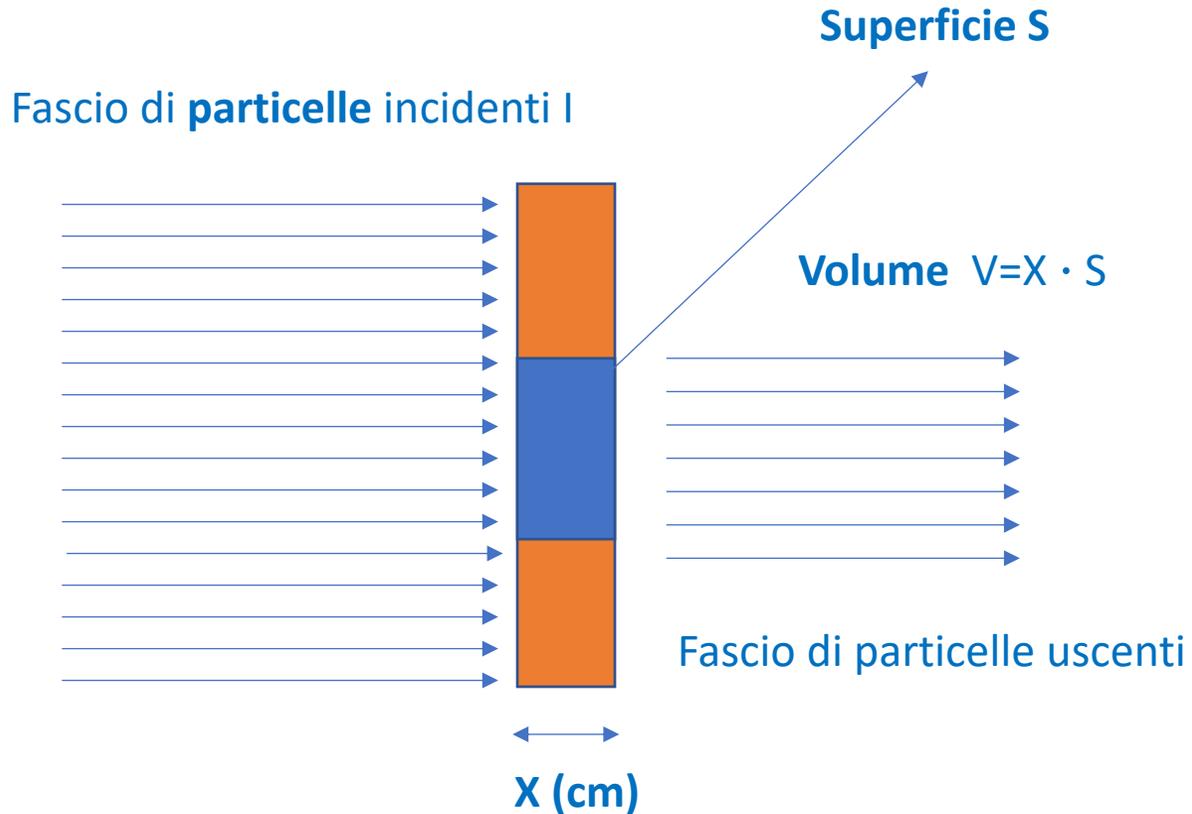
Se particelle incidenti di un dato tipo ed energia possono interagire in maniera diversa e indipendente, la sezione d'urto risultante detta sezione d'urto totale altro non e' che la somma di ciascuna componente

L'unita' speciale per la sezione d'urto comunemente utilizzata e' il barn, b , definito da $1b = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$: nota bene $1 \text{ fm}^2 = (10^{-15} \text{ m})^2 = 10^{-30} \text{ m}^2$

La descrizione completa di un processo di interazione comporterebbe la conoscenza delle distribuzioni delle sezioni d'urto in termini di energia e direzione di tutte le particelle emergenti.

$$\sigma = \sum_j \sigma_j = \frac{1}{\Phi} \sum_J N_J$$

L'interazione delle radiazioni con la materia viene descritta dalla sezione d'urto



Facciamo il caso di uno spessore di materia X sufficientemente piccolo che non perturbi l'intensita' del fascio per tutto il suo spessore, di cui va a colpire la superficie S, che contiene un numero n di atomi per cm^3 .

Nell'ipotesi di avere un fascio di intensita' I che colpisce la superficie S. Il numero di interazioni per unita' di tempo che si verificano nell'assorbitore/bersaglio e' proporzionale all'intensita' del fascio di particelle incidenti, al numero di atomi per cm^3 e al volume colpito.

Numero di reazioni al secondo $\propto I \cdot n \cdot V = I \cdot n \cdot S \cdot x$

La costante di proporzionalita' e' la sezione d'urto σ

Numero di reazioni al secondo = $\sigma \cdot I \cdot n \cdot S \cdot x$

Mass Attenuation Coefficient

The mass attenuation coefficient, μ/ρ , of a material, for **uncharged** particles of a given type and energy, is the quotient of dN/N by ρdl , where dN/N is the mean fraction of the particles that experience interactions in traversing a distance dl in the material of density ρ , thus

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dN}{dl N}$$

Unit: m^2kg^{-1}

La grandezza μ è il coefficiente di attenuazione lineare .

La probabilita' che una particella non carica con incidenza perpendicolare a uno strato di materiale di spessore dl subisca una interazione è μdl .

$1/\mu$ è detto libero cammino medio λ cioè la distanza che una particella percorre senza subire interazioni ovvero lo spessore in cui il numero di particelle incidenti si riduce a $1/e$.

Detto N il numero di particelle incidenti su uno strato di spessore dl , in esso interagiranno un numero di particelle $dN = \mu dl \cdot N$

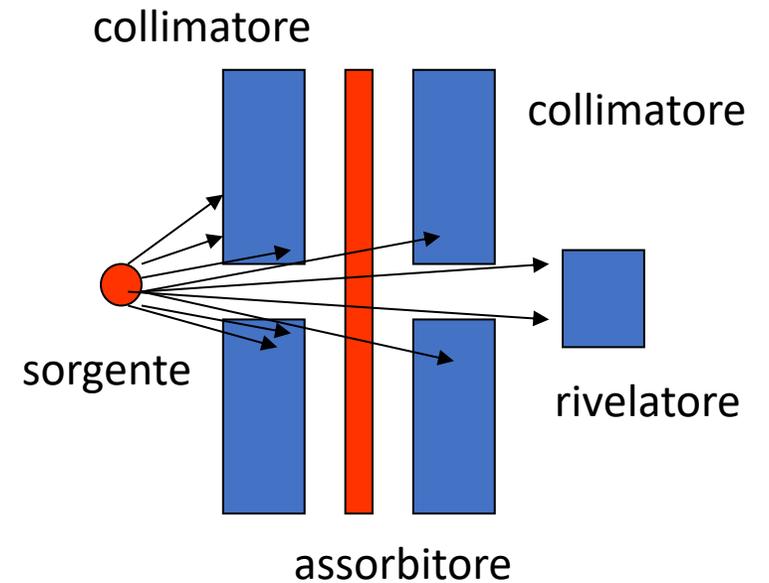
La variazione di $dN/N = -\mu dl$

Se integriamo su uno spessore finito x , indicato N_0 il numero di particelle incidenti ed N_x il numero di particelle uscenti allora

$$\int_{N_0}^{N_x} \frac{dN}{N} = \int_0^x -\mu dl$$

Per $x=1/\mu$

da cui $N = N_0 e^{-\mu x}$



Condizioni di buona geometria

Il coefficiente di attenuazione lineare μ è legato con lo spessore emivalente $t_{1/2}$ e quello decimale $t_{1/10}$ dalle seguenti relazioni

$$t_{1/2} = \frac{-\ln(1/2)}{\mu}$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\mu x}$$

$$t_{1/10} = \frac{-\ln(1/10)}{\mu}$$

$$e^{-\mu x} = 1/2$$

$$e^{-\mu x} = 1/10$$

È del tutto evidente che il coefficiente lineare di attenuazione dipende dalla densità

È comodo eliminare tale dipendenza utilizzando il coefficiente di attenuazione massico

Mass Attenuation Coefficient

Il coefficiente di attenuazione massico μ/ρ puo' essere espresso in termini di sezione d'urto totale s . Esso si ottiene moltiplicando la sezione d'urto totale s per il quoziente N_A/M dove N_A e' il numero di Avogadro e M e' la massa molare del materiale (la massa molare e' la massa in grammi di una mole e coincide numericamente con la massa molecolare o con la massa atomica)

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{M} \sigma = \frac{N_A}{M} \sum_J \sigma_J \text{ che puo' essere scritta}$$

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{M} \sigma = \frac{n_t}{\rho} \sigma$$

$$n_t = N_A * \text{Concentrazione molare}$$

Dove s_J e' la componente della sezione d'urto relativa alla interazione del tipo J

Done n_t e' la densita' di numero cioe' il numero di determinati oggetti per unita' di volume per quel tipo di targhetta

Analogamente alla

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

si puo' scrivere

$$N = N_0 e^{-\mu/\rho \rho x}$$

$$\sigma_{tot} = \sum_J \sigma_J = \sigma_{\tau} + \sigma_c + \sigma_{coh} + \sigma_k$$

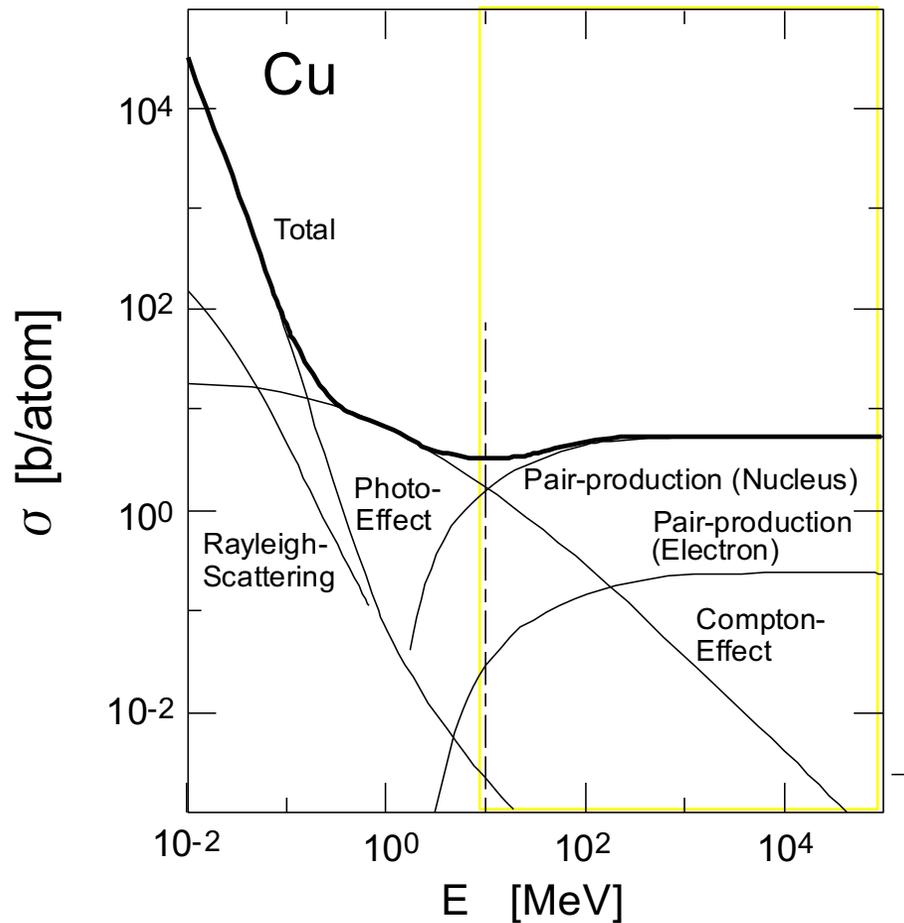
Coefficiente di attenuazione lineare per effetto fotoelettrico τ

Coefficiente di attenuazione lineare per effetto effetto Compton c

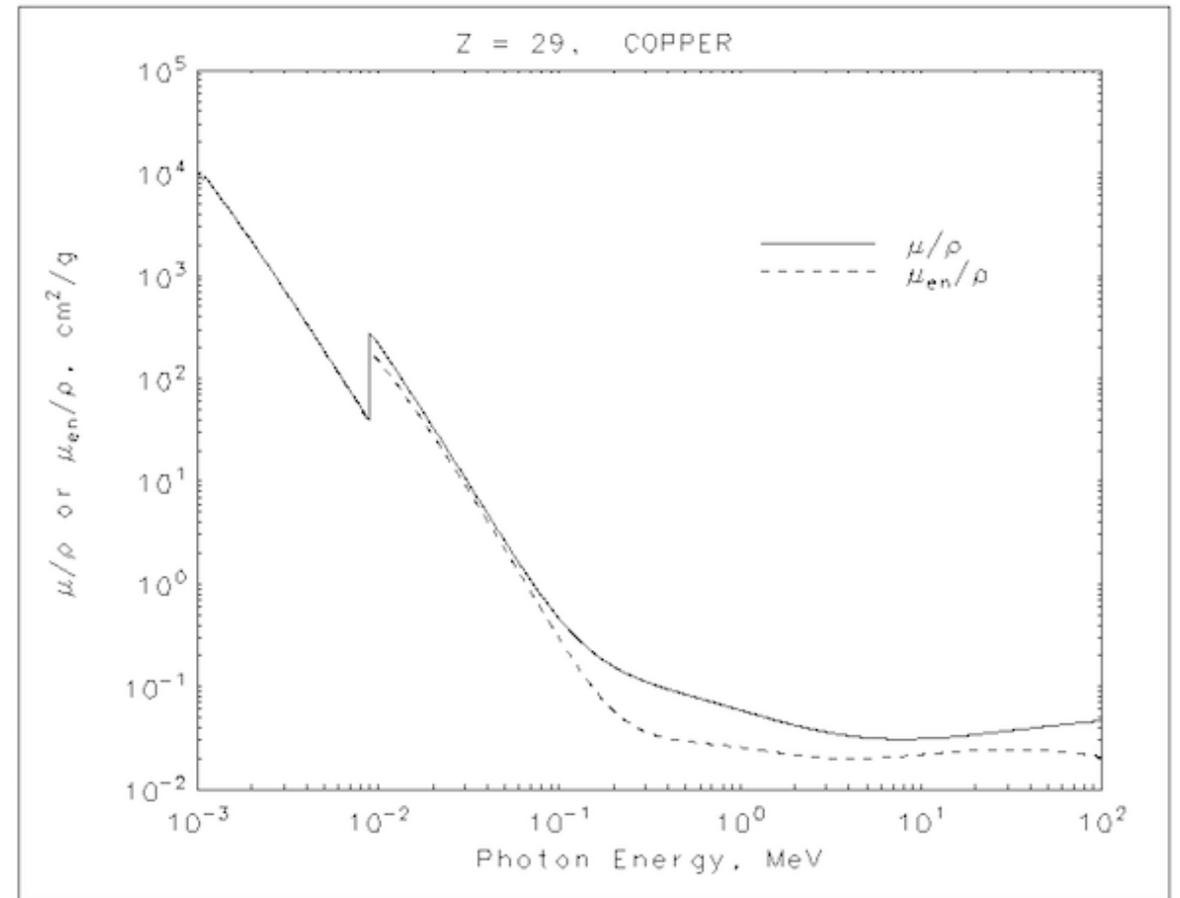
Coefficiente di attenuazione lineare per effetto diffusione coerente coh

Coefficiente di attenuazione lineare per creazione di coppie κ

Anche in questo caso si preferisce eliminare la dipendenza dalla densita' dividendo per ρ



Andamento della sezione d'urto nel rame per i piu' importanti processi di interazione dei fotoni nel rame in funzione dell'energia



Andamento del coefficiente di assorbimento massico nel rame per i piu' importanti processi di interazione dei fotoni nel rame in funzione dell'energia

Se il mezzo considerato e' una miscela di elementi allora si avra'

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{comp}} = \sum_i w_i \frac{\mu_i}{\rho_i}$$

dove w_i e' la frazione in peso dell'i-esimo elemento

La formula piu' generale possibile per il coefficiente di attenuazione massico di un composto trattato come se fosse costituito da atomi indipendenti e' dato da

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho} \sum_L (n_t)_L \sigma_L = \frac{1}{\rho} \sum_L (n_t)_L \sum_J \sigma_{LJ}$$

Dove n_t e' la densita' di numero per la targhetta di tipo L

σ_L e' la sezione d'urto totale per la targhetta L

σ_{LJ} la sezione d'urto dell'interazione di tipo J per la targhetta di tipo L

Mass Energy Transfer Coefficient

The mass energy transfer coefficient, μ_{tr}/ρ , of a material, for **uncharged particles**, of a given type and energy is the quotient of dR_{tr}/R by ρdl , where dR_{tr}/R is the mean energy that is transferred to kinetic energy of charged particles by interactions of the uncharged particles of incident radiant energy R , in traversing a distance dl in the material of density ρ , thus

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho dl} \frac{dR_{tr}}{R}$$

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

E per analogia e' il coefficiente di trasferimento massico puo' essere scritto in termini di sezione d'urto

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{N_A}{M} = \frac{N_A}{M} \sum_J f_J \sigma_J$$

Dove f_J e' il quoziente dell'energia media trasferita all'energia cinetica delle particelle in una interazione di tipo J dall'energia cinetica della particella incidente non carica

Il coefficiente di trasferimento di energia massico e' legato al coefficiente di assorbimento massico dalla relazione

$$\mu_{tr}/\rho = \mu/\rho f$$

do
ve

$$f = \frac{\sum_J f_J \sigma_J}{\sum_J \sigma_J}$$

rappresenta la frazione di energia della particella incidente che è trasferita sotto forma di energia cinetica alla particella carica nell'interazione di tipo J

Se il mezzo considerato e' una miscela di elementi allora si avra'

$$\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{comp} = \sum_i m_i \frac{\mu_{tri}}{\rho_i}$$

dove w_i e' la frazione in peso dell'i-esimo elemento

La formula piu' generale possibile per il coefficiente di attenuazione massico di un composto trattato come se fosse costituito da atomi indipendenti e' dato da

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \sum_L (n_t)_L = \sum_J f_{L,J} \sigma_{L,J}$$

Dove n_t e' la densita' di numero per la targhetta di tipo L

$\sigma_{L,J}$ la sezione d'urto dell'interazione di tipo J per la targhetta di tipo

$f_{L,J}$ e' il rapporto fra l'energia media trasferita all'energia cinetica dei secondari carichi in un'interazione di tipo J con la targhetta di tipo L dall'energia cinetica della particella non carica incidente

Quando si è interessati a conoscere l'energia effettivamente depositata in un certo elemento di volume è necessario far uso del coefficiente di assorbimento di energia massico μ_{en}/ρ

$$\mu_{en}/\rho = \mu_{tr}/\rho(1-g)$$

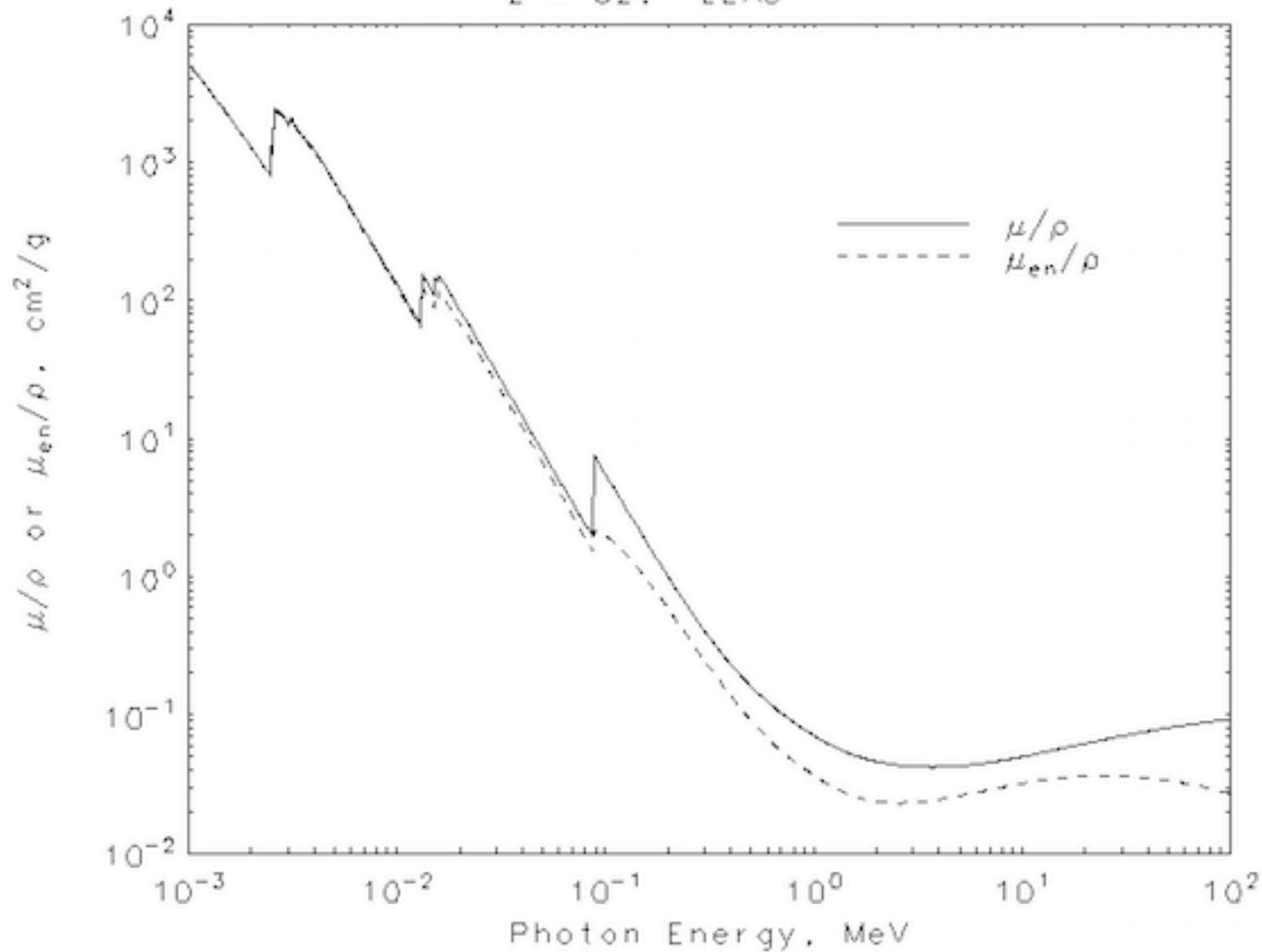
dove g è la frazione dell'energia che le particelle secondarie cariche perdono in radiazione di frenamento nel materiale di interesse.

Il coefficiente di assorbimento di energia massico dipende dallo stopping power di cui parleremo successivamente

I valori numerici di g sono ricavabili come vedremo dallo stopping power e comunque tabulati in letteratura essi sono strettamente connessi con l'efficienza di irraggiamento.

I valori dei coefficienti μ_{tr}/ρ e μ_{en}/ρ sono apprezzabilmente diversi solo quando i secondari carichi messi in moto hanno energie molto maggiori della loro energia di quiete come è evidente dalla tabella e figura in seguito riportate

Z = 82. LEAD



Lead
Z = 82

HTML table format

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	5.210E+03	5.197E+03
1.50000E-03	2.356E+03	2.344E+03
2.00000E-03	1.285E+03	1.274E+03
2.48400E-03	8.006E+02	7.895E+02
2.48400E-03	1.397E+03	1.366E+03
2.53429E-03	1.726E+03	1.682E+03
2.58560E-03	1.944E+03	1.895E+03
2.58560E-03	2.458E+03	2.390E+03
3.00000E-03	1.965E+03	1.913E+03
3.06640E-03	1.857E+03	1.808E+03
3.06640E-03	2.146E+03	2.090E+03
3.30130E-03	1.796E+03	1.748E+03
3.55420E-03	1.496E+03	1.459E+03
3.55420E-03	1.585E+03	1.546E+03
3.69948E-03	1.442E+03	1.405E+03
3.85070E-03	1.311E+03	1.279E+03
3.85070E-03	1.368E+03	1.335E+03
4.00000E-03	1.251E+03	1.221E+03
5.00000E-03	7.304E+02	7.124E+02
6.00000E-03	4.672E+02	4.546E+02
8.00000E-03	2.287E+02	2.207E+02
1.00000E-02	1.306E+02	1.247E+02
1.30352E-02	6.701E+01	6.270E+01
1.30352E-02	1.621E+02	1.291E+02
1.50000E-02	1.116E+02	9.100E+01
1.52000E-02	1.078E+02	8.807E+01
1.52000E-02	1.485E+02	1.131E+02
1.55269E-02	1.416E+02	1.083E+02
1.58608E-02	1.344E+02	1.032E+02
1.58608E-02	1.548E+02	1.180E+02
2.00000E-02	8.636E+01	6.899E+01
3.00000E-02	3.032E+01	2.536E+01
4.00000E-02	1.436E+01	1.211E+01
5.00000E-02	8.041E+00	6.740E+00
6.00000E-02	5.021E+00	4.149E+00
8.00000E-02	2.419E+00	1.916E+00
8.80045E-02	1.910E+00	1.482E+00
8.80045E-02	7.683E+00	2.160E+00
1.00000E-01	5.549E+00	1.976E+00
1.50000E-01	2.014E+00	1.056E+00
2.00000E-01	9.985E-01	5.870E-01
3.00000E-01	4.031E-01	2.455E-01
4.00000E-01	2.323E-01	1.370E-01
5.00000E-01	1.614E-01	9.128E-02
6.00000E-01	1.248E-01	6.819E-02
8.00000E-01	8.870E-02	4.644E-02
1.00000E+00	7.102E-02	3.654E-02
1.25000E+00	5.876E-02	2.988E-02
1.50000E+00	5.222E-02	2.640E-02
2.00000E+00	4.606E-02	2.360E-02
3.00000E+00	4.234E-02	2.322E-02
4.00000E+00	4.197E-02	2.449E-02
5.00000E+00	4.272E-02	2.600E-02
6.00000E+00	4.391E-02	2.744E-02
8.00000E+00	4.675E-02	2.989E-02
1.00000E+01	4.972E-02	3.181E-02
1.50000E+01	5.658E-02	3.478E-02
2.00000E+01	6.206E-02	3.595E-02

I valori numerici di g sono piu' elevate alle alte energie nei materiali pesanti, mentre sono relativamente modesti nei materiali a basso Z e cosi' come nei materiali biologici.

I valori dei coefficienti μ/ρ e μ_{en}/ρ sono apprezzabilmente diversi solo quando le energie delle particelle cariche prodotte sono molto maggiori della loro energia di quiete specialmente nel caso di materiali ad alto Z

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{comp} = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{comp} (1 - g_{comp})$$

e

$$g_{comp} = \sum_i w_i g_i$$

dove w_i e' la frazione in peso dell' i -esimo elemento

e g_i rappresenta la frazione di energia che i secondari carichi dissipano in radiazione di frenamento nell' i -esimo elemento

Se si avesse bisogno di conoscere il valor medio per esempio del coefficienti di attenuazione massico pesato sulla fluenza di fotoni la cui distribuzione differenziale fosse Φ_E

$$\frac{\bar{\mu}}{\rho} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{\mu}{\rho} \Phi_E dE}{\int_0^{\infty} \Phi_E dE} = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\infty} \frac{\mu}{\rho} \Phi_E dE$$

E' evidente che per analogia si possono ricavare tutti gli altri coefficienti

Le particelle direttamente ionizzanti sono le particelle cariche che interagendo con la materia perdono energia prevalentemente per eccitazione e ionizzazione degli atomi e delle molecole del mezzo attraversato (perdite per collisione) ma anche per irraggiamento

Le modalita' di interazione sono determinate dall'energia cinetica della particella carica e dalla minima distanza a cui essa si avvicina all'atomo colpito

Collisioni distanti = la particella si comporta come carica puntiforme e l'atomo colpito come un tutt'uno

Collisioni prossime = collisione diretta con un elettrone periferico

A seguito delle collisioni e della ionizzazione causata sono liberati elettroni con un'energia pari alla differenza fra l'energia ceduta dalla particella ionizzante e la sua energia di legame.

Si parla di elettroni secondari se questi ultimi a loro volta sono in grado di ionizzare e se le loro tracce sono distinguibili da quelle primarie.

Tali elettroni, detti raggi δ , a loro volta si comportano come particelle primarie che trasportano l'energia ricevuta lungo proprie tracce e la trasferiscono al mezzo in punti distanti dal sito di prima collisione

Nel caso delle particelle cariche leggere (elettroni e positroni) la perdita d'energia per collisione è la responsabile della cessione dell'energia solo a basse energie.

Gia' a partire da qualche MeV le perdite di energia per irraggiamento diventano veramente importanti.

Mass Stopping Power - Potere frenante massico

The mass stopping power, S/ρ , of a material, for charged particles of a given type and energy, is the quotient of dE by ρdl , where dE is the mean energy lost by a charged particle in traversing a distance dl in the material of density ρ , thus

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl}$$

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

La grandezza E puo' essere espressa in eV e di conseguenza S/ρ puo' essere espresso in $\text{eV m}^2 \text{ kg}^{-1}$ o meglio fatte gli opportuni cambiamenti in $\text{MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$

La perdita di energia per unità di percorso viene chiamato potere frenante lineare S

$$S = \frac{dE}{dl}$$

Le particelle cariche principalmente sia che esse siano pesanti (protoni, deutoni, alfa etc.) che leggere (principalmente elettroni e positroni) perdono energia anche per irraggiamento

Le particelle cariche interagiscono con nuclei nucleo e vengono deflesse subendo una accelerazione centripeta a cui corrisponde l'emissione di radiazione elettromagnetica la cosiddetta bremsstrahlung , radiazione di frenamento.

Le accelerazioni dipendono dalla massa della particella incidente.

Per particelle pesanti le perdite per frenamento sono trascurabili fino ad energie dell'ordine del GeV.

Per gli elettroni al contrario e' la causa principale del loro rallentamento.

Il potere frenante massico totale puo' essere espresso essenzialmente dalla seguente relazione.

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{el} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{rad} = \frac{1}{\rho} (S_{el} + S_{rad})$$

Dove

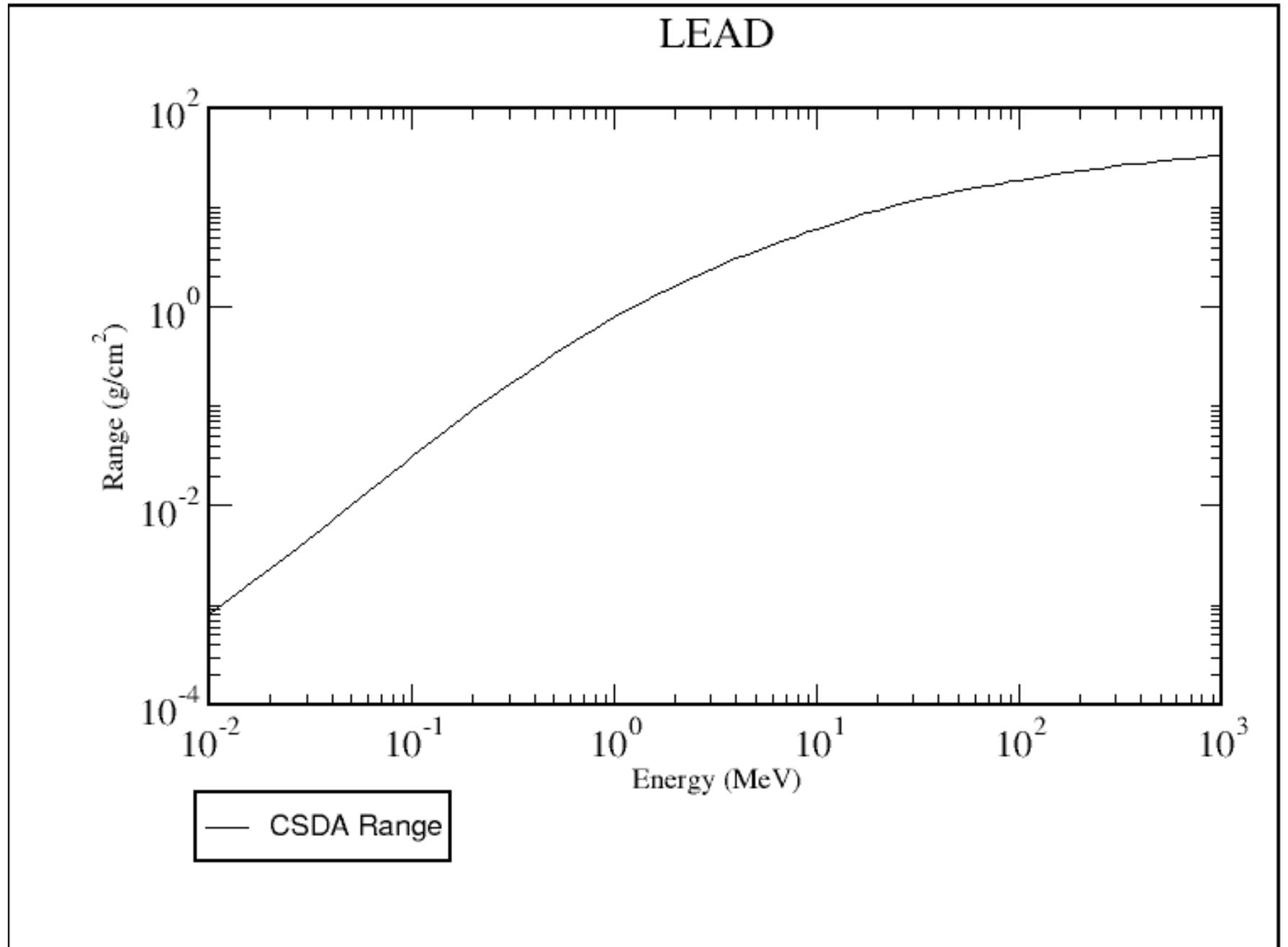
S_{el} è dovuto alla collisione con gli elettroni

S_{rad} è dovuto all'irraggiamento

Elettroni in Pb

(required) Kinetic Energy (MeV)	Stopping Power (MeV cm ² /g)			CSDA Range (g/cm ²)	Radiation Yield	Density Effect Parameter	1.500E+00	1.004E+00	1.792E-01	1.183E+00	1.219E+00	9.009E-02	2.854E-01
	Collision	Radiative	Total				1.750E+00	1.014E+00	2.053E-01	1.219E+00	1.427E+00	1.001E-01	3.360E-01
1.000E-02	8.428E+00	2.045E-02	8.448E+00	8.255E-04	1.191E-03	4.841E-04	2.000E+00	1.024E+00	2.319E-01	1.256E+00	1.629E+00	1.096E-01	3.855E-01
1.250E-02	7.356E+00	2.251E-02	7.379E+00	1.143E-03	1.500E-03	6.147E-04	2.500E+00	1.044E+00	2.866E-01	1.331E+00	2.016E+00	1.277E-01	4.817E-01
1.500E-02	6.561E+00	2.421E-02	6.585E+00	1.502E-03	1.810E-03	7.491E-04	3.000E+00	1.063E+00	3.427E-01	1.406E+00	2.381E+00	1.447E-01	5.743E-01
1.750E-02	5.945E+00	2.566E-02	5.971E+00	1.902E-03	2.121E-03	8.872E-04	3.500E+00	1.080E+00	3.999E-01	1.480E+00	2.728E+00	1.608E-01	6.631E-01
2.000E-02	5.453E+00	2.693E-02	5.480E+00	2.339E-03	2.432E-03	1.029E-03	4.000E+00	1.095E+00	4.582E-01	1.553E+00	3.057E+00	1.761E-01	7.479E-01
2.500E-02	4.714E+00	2.908E-02	4.743E+00	3.323E-03	3.051E-03	1.324E-03	4.500E+00	1.108E+00	5.174E-01	1.626E+00	3.372E+00	1.906E-01	8.289E-01
3.000E-02	4.182E+00	3.086E-02	4.212E+00	4.445E-03	3.664E-03	1.633E-03	5.000E+00	1.120E+00	5.773E-01	1.698E+00	3.673E+00	2.045E-01	9.061E-01
3.500E-02	3.779E+00	3.240E-02	3.812E+00	5.695E-03	4.271E-03	1.956E-03	5.500E+00	1.132E+00	6.379E-01	1.769E+00	3.962E+00	2.177E-01	9.798E-01
4.000E-02	3.463E+00	3.376E-02	3.497E+00	7.066E-03	4.872E-03	2.294E-03	6.000E+00	1.142E+00	6.991E-01	1.841E+00	4.239E+00	2.304E-01	1.050E+00
4.500E-02	3.208E+00	3.500E-02	3.243E+00	8.552E-03	5.467E-03	2.646E-03	7.000E+00	1.160E+00	8.233E-01	1.983E+00	4.762E+00	2.543E-01	1.182E+00
5.000E-02	2.997E+00	3.613E-02	3.034E+00	1.015E-02	6.055E-03	3.011E-03	8.000E+00	1.175E+00	9.495E-01	2.125E+00	5.249E+00	2.765E-01	1.304E+00
5.500E-02	2.821E+00	3.718E-02	2.858E+00	1.185E-02	6.638E-03	3.390E-03	9.000E+00	1.189E+00	1.077E+00	2.266E+00	5.705E+00	2.970E-01	1.417E+00
6.000E-02	2.670E+00	3.817E-02	2.708E+00	1.365E-02	7.214E-03	3.783E-03	1.000E+01	1.201E+00	1.206E+00	2.407E+00	6.133E+00	3.162E-01	1.523E+00
7.000E-02	2.426E+00	3.998E-02	2.466E+00	1.752E-02	8.349E-03	4.608E-03	1.250E+01	1.226E+00	1.535E+00	2.761E+00	7.102E+00	3.589E-01	1.759E+00
8.000E-02	2.237E+00	4.162E-02	2.279E+00	2.175E-02	9.461E-03	5.485E-03	1.500E+01	1.246E+00	1.870E+00	3.116E+00	7.954E+00	3.955E-01	1.964E+00
9.000E-02	2.087E+00	4.313E-02	2.130E+00	2.629E-02	1.055E-02	6.413E-03	1.750E+01	1.262E+00	2.210E+00	3.472E+00	8.713E+00	4.274E-01	2.147E+00
1.000E-01	1.964E+00	4.454E-02	2.008E+00	3.113E-02	1.162E-02	7.392E-03	2.000E+01	1.277E+00	2.554E+00	3.830E+00	9.399E+00	4.555E-01	2.310E+00
1.250E-01	1.737E+00	4.772E-02	1.785E+00	4.438E-02	1.419E-02	1.005E-02	2.500E+01	1.299E+00	3.252E+00	4.551E+00	1.059E+01	5.028E-01	2.596E+00
1.500E-01	1.583E+00	5.054E-02	1.633E+00	5.905E-02	1.664E-02	1.300E-02	3.000E+01	1.318E+00	3.961E+00	5.279E+00	1.161E+01	5.412E-01	2.841E+00
1.750E-01	1.471E+00	5.312E-02	1.524E+00	7.492E-02	1.896E-02	1.623E-02	3.500E+01	1.332E+00	4.678E+00	6.011E+00	1.250E+01	5.731E-01	3.055E+00
2.000E-01	1.387E+00	5.555E-02	1.442E+00	9.180E-02	2.118E-02	1.971E-02	4.000E+01	1.345E+00	5.402E+00	6.747E+00	1.329E+01	6.002E-01	3.247E+00
2.500E-01	1.269E+00	6.015E-02	1.329E+00	1.280E-01	2.533E-02	2.736E-02	4.500E+01	1.356E+00	6.132E+00	7.488E+00	1.399E+01	6.235E-01	3.420E+00
3.000E-01	1.193E+00	6.460E-02	1.257E+00	1.668E-01	2.917E-02	3.579E-02	5.000E+01	1.365E+00	6.865E+00	8.231E+00	1.463E+01	6.439E-01	3.579E+00
3.500E-01	1.140E+00	6.900E-02	1.209E+00	2.074E-01	3.276E-02	4.484E-02	5.500E+01	1.374E+00	7.603E+00	8.977E+00	1.521E+01	6.618E-01	3.725E+00
4.000E-01	1.102E+00	7.340E-02	1.175E+00	2.494E-01	3.614E-02	5.437E-02	6.000E+01	1.381E+00	8.345E+00	9.726E+00	1.574E+01	6.777E-01	3.861E+00
4.500E-01	1.074E+00	7.781E-02	1.152E+00	2.924E-01	3.935E-02	6.426E-02	7.000E+01	1.395E+00	9.836E+00	1.123E+01	1.670E+01	7.048E-01	4.107E+00
5.000E-01	1.053E+00	8.228E-02	1.135E+00	3.361E-01	4.241E-02	7.443E-02	8.000E+01	1.406E+00	1.134E+01	1.274E+01	1.753E+01	7.270E-01	4.326E+00
5.500E-01	1.037E+00	8.677E-02	1.124E+00	3.804E-01	4.536E-02	8.479E-02	9.000E+01	1.415E+00	1.284E+01	1.426E+01	1.828E+01	7.457E-01	4.521E+00
6.000E-01	1.026E+00	9.132E-02	1.117E+00	4.250E-01	4.820E-02	9.529E-02	1.000E+02	1.423E+00	1.436E+01	1.578E+01	1.894E+01	7.617E-01	4.699E+00
7.000E-01	1.009E+00	1.005E-01	1.110E+00	5.149E-01	5.363E-02	1.166E-01	1.250E+02	1.441E+00	1.816E+01	1.960E+01	2.036E+01	7.931E-01	5.083E+00
8.000E-01	1.000E+00	1.098E-01	1.110E+00	6.050E-01	5.877E-02	1.380E-01	1.500E+02	1.455E+00	2.198E+01	2.344E+01	2.153E+01	8.164E-01	5.404E+00
9.000E-01	9.957E-01	1.193E-01	1.115E+00	6.949E-01	6.369E-02	1.595E-01	1.750E+02	1.466E+00	2.582E+01	2.729E+01	2.251E+01	8.343E-01	5.679E+00
1.000E+00	9.939E-01	1.290E-01	1.123E+00	7.843E-01	6.842E-02	1.809E-01	2.000E+02	1.476E+00	2.966E+01	3.114E+01	2.337E+01	8.488E-01	5.921E+00
1.250E+00	9.966E-01	1.537E-01	1.150E+00	1.004E+00	7.960E-02	2.337E-01	2.500E+02	1.491E+00	3.737E+01	3.886E+01	2.480E+01	8.705E-01	6.330E+00
							3.000E+02	1.504E+00	4.509E+01	4.660E+01	2.598E+01	8.862E-01	6.670E+00
							3.500E+02	1.514E+00	5.283E+01	5.435E+01	2.697E+01	8.982E-01	6.960E+00
							4.000E+02	1.523E+00	6.058E+01	6.210E+01	2.783E+01	9.077E-01	7.213E+00

Range di elettroni in piombo



Linear Energy Transfer (LET)

The linear energy transfer or restricted linear electronic stopping power, L_{Δ} , of a material, for charged particles of a given type and energy, is the quotient of dE_{Δ} by dl , where dE_{Δ} is the mean energy lost by the charged particles due to electronic interactions in traversing a distance dl , minus the mean sum of the kinetic energies in excess of Δ of all the electrons released by the charged particles, thus

$$L_{\Delta} = \frac{dE_{\Delta}}{dl}$$

Unit: J m⁻¹

La grandezza' E_{Δ} puo' essere espressa in eV

L_{Δ} puo' essere espresso in keV mm⁻¹

Il trasferimento lineare d'energia puo' essere espresso anche dalla

$$L_{\Delta} = \frac{dE_{\Delta}}{dl} = S_{el} - \frac{dE_{ke,\Delta}}{dl}$$

Dove S_{el} e' il potere frenante massico per collisione e $dE_{ke,\Delta}$ e' la somma media delle energie cinetiche, maggiori di Δ , di tutti gli elettroni rilasciati dalla particella carica nell'attraversare lo spessore dl

Questa nuova espressione ci permette di capire meglio i concetti

L'energia rilasciata da una particella primaria carica agli elettroni, nell'attraversare dl , meno l'energia trasportata via dagli elettroni secondari carichi, che hanno energia iniziale maggiore di Δ e' uguale all'energia "localmente trasferita" sebbene la definizione fa riferimento a un taglio in energia e non a una distanza.

Scrivendo L_{100} significa considerare tutte le collisioni con trasferimento di energia minori di 100 eV

Scrivendo L_{∞} significa considerare tutte le collisioni e il loro trasferimento di energia.

L_{∞} coincide con il potere frenante massico per collisione S_{el}

$$S_{el} = \left(\frac{dE}{dl} \right)_{el}$$

$$L_{\infty} = \frac{dE_{\infty}}{dl}$$

Il LET e' formalmente identico al potere frenante ma l'uno e' riferito all'energia depositata nel mezzo e l'altro all'energia ceduta dalla particella incidente

Il LET e' stato introdotto per caratterizzare in qualche modo la qualita' della radiazione dalla quale dipendono gli effetti indotti. Si sarebbe volute sostituire l'energia persa dalle particelle con quella depositata nel mezzo.

In realta' il LET varia lungo la traccia e qualunque calcolo dell'energia depositata rappresenta solo un'approssimazione e non conto delle fluttuazioni delle perdite di energia per straggling. In ultima analisi non e' detto che particelle dello stesso LET producano lo stesso effetto biologico.

Vale a pena mettere in evidenza che il LET e' utilizzato in radioprotezione per definire la qualita' della radiazione e le grandezze dosimetriche

Valore di separazione

particelle a basso LET_∞



30-50 keV mm⁻¹

particelle ad alto LET_∞

**A seconda
dell'energia il
LET_∞ varia**

elettroni

0.2-30 keV mm⁻¹

protoni

50-100 keV mm⁻¹

alfa

40-250 keV mm⁻¹

nuclei di rinculo

100-4000 keV mm⁻¹

Dati tratti dalla pubblicazione ICRU 16

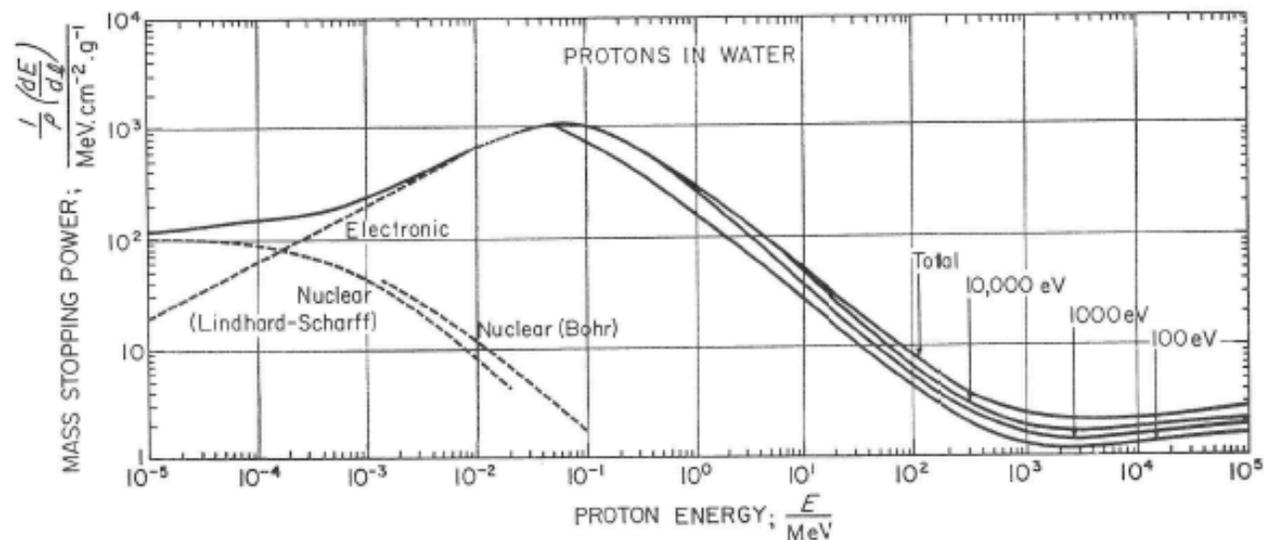


Fig. A5. Mass stopping power for water for protons versus proton energy. Restricted stopping powers for 100, 1,000, and 10,000 eV are also shown.

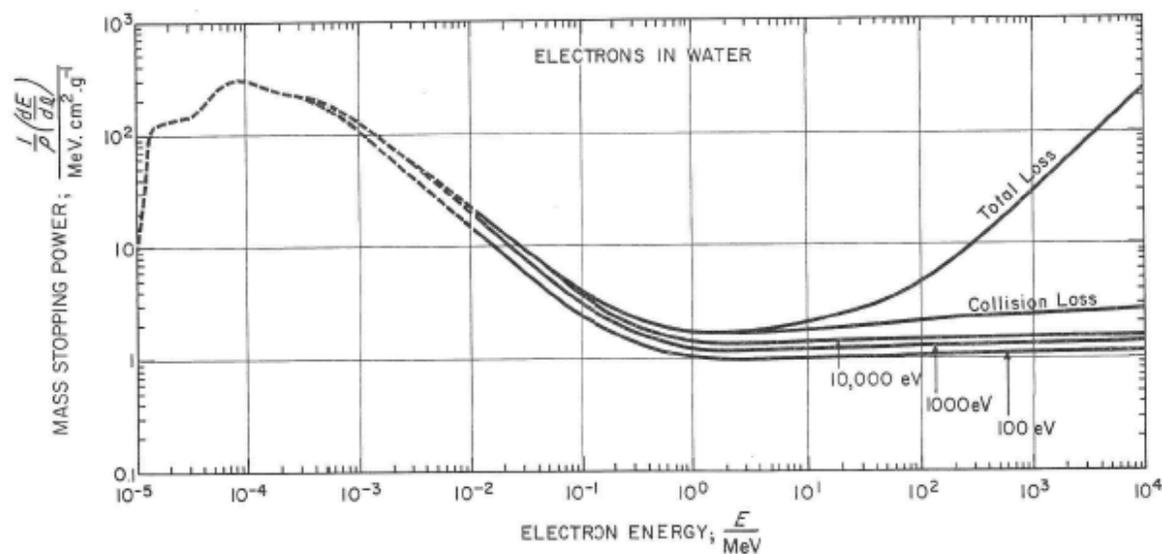


Fig. A2. Mass stopping power for water for electrons versus electron energy. Below 10 keV theoretical formulae are inapplicable (see text). Limited experimental data only are available; consequently this region is shown dashed. In the region between 10 keV and 100 keV both measured and calculated values are used. Restricted stopping power for Δ values of 100, 1,000, and 10,000 eV are shown.

Radiation Chemical Yield

The radiation chemical yield, $G(x)$, of an entity, x , is the quotient of $n(x)$ by $\bar{\varepsilon}$, where $n(x)$ is the mean amount of substance of that entity produced, destroyed, or changed in a system by the mean energy imparted, $\bar{\varepsilon}$, to the matter of that system, thus

$$G(x) = \frac{n(x)}{\bar{\varepsilon}}$$

Unit: mol J⁻¹

La quantità correlate chiamata G value e' definita come il numero medio eventi chimici prodotti dall'assorbimento di un energia di 100 eV

La mole e' la quantita' di una sostanza in grammi che contiene esattamente un numero di Avogadro di entita' fondamentali (nuova definizione in corso di approvazione)

The mole is the amount of substance of a system that contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kg of ^{12}C .

L'unita' di massa atomica $1.66 \times 10^{-24}\text{g} = 1/12$ della massa di un atomo di ^{12}C

La massa di un atomo di ^{12}C vale 12 u.m.a , ovvero $12 \times 1.66 \times 10^{-24}\text{g}$

In 12 grammi di ^{12}C ci sono $12/12 \times 1.66 \times 10^{-24}\text{g} = 6.022 \times 10^{23}$

Una mole corrisponde alla quantita' in grammi di un individuo chimico numericamente uguale al suo peso atomico (o molare)

Ionization Yield in a Gas

The ionization yield in a gas, Y , is the quotient of N by E , where N is the mean total liberated charge of either sign, divided by the elementary charge, when the initial kinetic energy E of a charged particle of a given type is completely dissipated in the gas, thus

$$Y = \frac{N}{E}$$

Unit: J^{-1}

La grandezza Y puo' essere espressa in eV

Dalla definizione discende che la carica prodotta dalla bremsstrahlung o da altra radiazione secondaria emessa dalle particelle cariche iniziali e secondarie e' inclusa in N.

La carica della particella carica iniziale non e' inclusa in N perche' questa carica non e' liberata nell'ambito del processo di dissipazione di energia

La resa di ionizzazione o ionization yield in un gas e' un caso particolare della grandezza del radiation chemical yield

Mean Energy Expended in a Gas per Ion Pair Formed

The mean energy expended in a gas per ion pair formed, W , is the quotient of E by N , where N is the mean total liberated charge of either sign, divided by the elementary charge, when the initial kinetic energy E of a charged particle introduced into the gas is completely dissipated in the gas, thus

$$W = \frac{E}{N}$$

Unit: J

La grandezza W puo' essere espressa in eV