

**Cenni sulle Unità di Misura in Dosimetria**  
applicate a fasci di fotoni

*Gianfelice Cinque*

- 1. Premessa (convenzioni e terminologia);**
- 2. Definizioni in Radiometria;**
- 3. Coefficienti d'interazione con la materia;**
- 4. Quantità utilizzate in Dosimetria.**

**Unità di misura definite in accordo al Sistema Internazionale (SI) già MKS(A):**

**principali:** m, kg, s, A, mol, cd

**secondarie/derivate:** C, J, sr, W

**secondarie specifiche:** Bq, Gy, ...

**Altre unità non consistenti ma utilizzate:**

eV(=1,602·10<sup>-19</sup> J·s), u(=1,660·10<sup>-27</sup> kg) y, d, h, min

**Radiazioni ionizzanti => separazione di carica (oltre all'eccitazione) elettronica nel mezzo**

es. fotoni ( $\gamma$  /X) ionizzanti in radiobiologia sopra i 10 eV

**Quantità fisiche stocastiche  $\Leftrightarrow$  seguono intrinsecamente distribuzioni di probabilità**

## UNITA' RADIOMETRICHE

**Energia radiante = Numero di particelle Energia a riposo**  $\Leftrightarrow$   **$R = N \cdot E$**

**Flusso di particelle**  $\Leftrightarrow$   **$\dot{N} = dN/dt$  [s<sup>-1</sup>]**

**Flusso di energia**  $\Leftrightarrow$   **$\dot{R} = dR/dt$  [W]**

**es. per fotoni: flusso radiante = potenza radiante =  $\dot{R}$**

**Fluenza = Numero di particelle/area sottesa da una sfera**  $\Leftrightarrow$   **$\Phi = dN/da$  [m<sup>-2</sup>]**

**Fluenza d'energia = Energia/area sottesa da una sfera**  $\Leftrightarrow$   **$\Psi = dR/da$  [J m<sup>-2</sup>]**

**sempre:**  $\Psi = E \cdot \Phi$

**per  $n = dN/dV$  costante:**  $\Phi = n \cdot v \cdot t$

**Tasso (rate) di Fluenza**  $\Leftrightarrow$   **$\dot{\Phi} = d\Phi/dt$  [m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>]**

**Tasso (rate) di Fluenza di energia**  $\Leftrightarrow$   **$\dot{\Psi} = d\Psi/dt$  [W m<sup>-2</sup>]**

**n.b: densità di flusso =  $\dot{\Phi}$  e densità di flusso d'energia =  $\dot{\Psi}$**

**inoltre:  $\dot{\Phi} = n \cdot v$**

**Radianza di particelle = tasso di Fluenza / angolo solido attorno ad una direzione**  
 $\Leftrightarrow \dot{\Phi}_{\Omega} = d\dot{\Phi}/d\Omega \text{ [m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}\text{]}$

**Radianza di energia = tasso di Fluenza di energia / angolo solido attorno ad una direzione**  
 $\Leftrightarrow \dot{\Psi}_{\Omega} = d\dot{\Psi}/d\Omega \text{ [W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}\text{]}$

e.s. per fotoni:  $\dot{\Phi}_{\Omega} = \text{radianza di fotoni}$  e  $\dot{\Psi}_{\Omega} = \text{radianza}$   
n.b: direzione in coordinate sferiche  $\Leftrightarrow (\theta, \phi)$   
inoltre:  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$

**Distribuzione di Radianza di particelle**  $\Leftrightarrow \dot{\Phi}_{\Omega,E} = d\dot{\Phi}_{\Omega}/dE$

**Distribuzione di Radianza in energia**  $\Leftrightarrow \dot{\Psi}_{\Omega,E} = d\dot{\Psi}_{\Omega}/dE$   
con:  $\dot{\Psi}_{\Omega,E} = E \dot{\Phi}_{\Omega,E}$

n.b: il campo di radiazione delle particelle è completamente definito da  $\dot{\Phi}_{\Omega,E}$

**Fluenza, Tasso e Radianza come quantità vettoriali possono essere ricavati per integrazione dalla Distribuzione vettoriale di radianza**  $\Leftrightarrow \vec{\Phi}_{\Omega,E} = \hat{\Omega} \dot{\Phi}_{\Omega,E}$   
dove  $\hat{\Omega}$  è il versore con direzione e verso del flusso di radiazione

## COEFFICIENTI D'INTERAZIONE CON LA MATERIA

**Sezione d'urto = Probabilità d'interazione col singolo bersaglio / Fluenza**

$$\Leftrightarrow \sigma = P / \Phi \text{ [m}^2\text{]}$$

**Sezione d'urto differenziale**

$$\Leftrightarrow d^2\sigma / dE d\Omega$$

**unità di misura frequenti:**

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

**per interazioni diverse ed indipendenti:**  $\sigma = \sum_i \sigma_i = \sum_i P_i / \Phi$

**n.b:**  $\sigma$  e  $d^2\sigma / dE d\Omega$  sono fondamentali in quanto da esse si possono ricavare tutti i coefficienti d'interazione

**Coefficiente d'attenuazione lineare  $\equiv$  Probabilità d'interazione di una particella in un tratto dl del mezzo  $\equiv \mu \text{ [m}^{-1}\text{]} = 1 / \text{libero cammino medio} = 1 / \lambda$**

**Coefficiente d'attenuazione di massa  $\Leftrightarrow \mu / \rho = 1/(\rho \cdot dl) dN/N \text{ [m}^2 \text{ kg}^{-1}\text{]}$**

**ovvero:**  $N = N_0 e^{-(\mu/\rho) \cdot l \cdot \rho}$

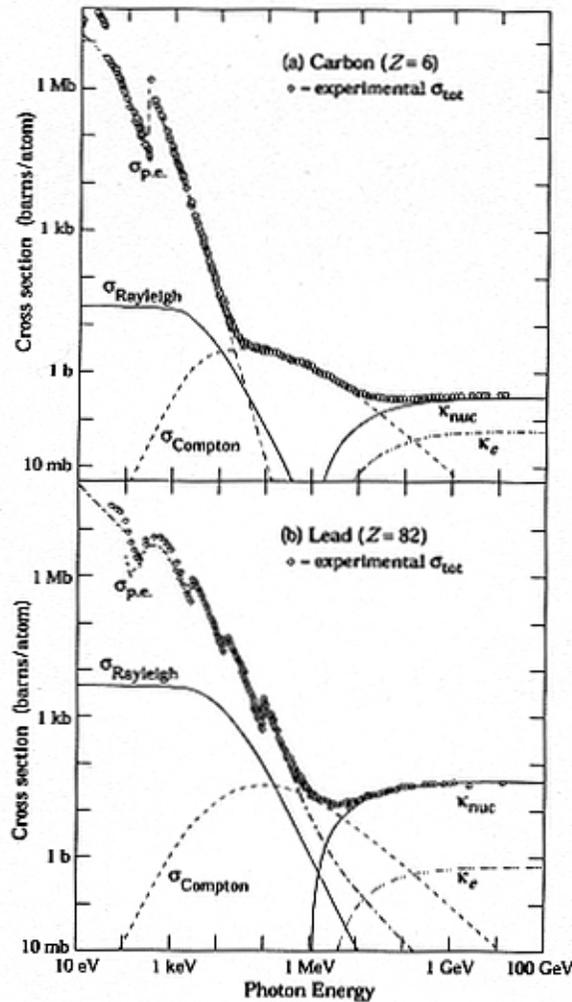
**per interazioni diverse ed indipendenti:**  $\mu / \rho = N_A/M \cdot \sigma = N_A/M \cdot \sum_i \sigma_i$

**con  $N_A = 6,0225 \cdot 10^{23}$  e  $M = \text{massa molare del bersaglio}$**

**per composti (trascurando contributi molecolari):**  $\mu / \rho = 1/\rho \sum_L (n^t)_L \cdot \sigma_L$

**con  $n^t$  numero di bersagli del tipo L per unità di volume**

18 26. Passage of particles through matter



**Figure 26.13:** Photon total cross sections as a function of energy in carbon and lead, showing the contributions of different processes:

- $\sigma_{p.e.}$  = Atomic photoelectric effect (electron ejection, photon absorption)
- $\sigma_{Rayleigh}$  = Coherent scattering (Rayleigh scattering—atom neither ionized nor excited)
- $\sigma_{Compton}$  = Incoherent scattering (Compton scattering off an electron)
- $\kappa_{nuc}$  = Pair production, nuclear field
- $\kappa_e$  = Pair production, electron field

Data from Hubbell, Gimm, and Øverbø, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **9**, 1023 (1980). Curves for these and other elements, compounds, and mixtures may be obtained from

<http://physics.nist.gov/PhysRefData>. The photon total cross section is approximately flat for at least two decades beyond the energy range shown. Original figures courtesy J.H. Hubbell (NIST).

**Coefficiente di trasferimento d'energia per unità di massa = frazione d'energia trasferita come energia cinetica alle particelle cariche in un tratto  $dl$  del mezzo / densità di massa**

$$\Leftrightarrow \mu_{tr} / \rho = 1/(\rho \cdot dl) dR_{tr} / R \quad [m^2 kg^{-1}]$$

per fotoni il coefficiente tiene conto dell'energia di legame degli elettroni

per interazioni indipendenti:  $\mu_{tr} / \rho = N_A/M \cdot \sum_i f_i \sigma_i$

con  $f_i$  = frazione media d'energia trasferita cinematicamente nell'interazione di tipo  $i$

per composti:

$$\mu_{tr} / \rho = 1 / \rho \sum_L (n^L)_L \sum_i f_i^L \sigma_i^L$$

**Coefficiente d'assorbimento d'energia per unità di massa =  $\mu_{tr}/\rho \cdot (1-g)$   $[m^2 kg^{-1}]$**   
con  $g$  frazione d'energia riemessa radiativamente da cariche secondarie

**Potere d'arresto per unità di massa (Mass Stopping Power) = frazione d'energia persa da una carica in un tratto  $dl$  del mezzo / densità di massa**

$$\Leftrightarrow S / \rho = 1/\rho dE / dl \quad [J m^2 kg^{-1}]$$

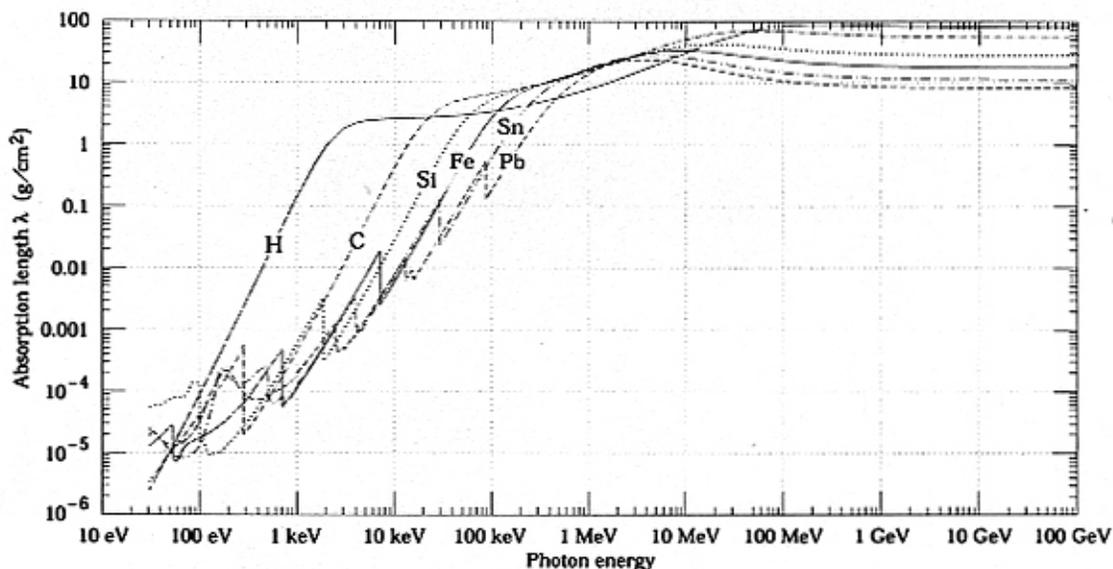
inoltre:  $S / \rho = 1/\rho (dE/dl)_{el} + 1/\rho (dE/dl)_{rad} + 1/\rho (dE/dl)_{nuc}$

dove  $(dE/dl)_{nuc}$  si riferisce a fenomeni atomici (non nucleari)

**Potere d'arresto lineare (Linear Stopping Power)  $\Leftrightarrow S = dE / dl \quad [J m^{-1}]$**

Spesso  $S / \rho$  si esprime in  $[eV m^2 kg^{-1}]$  od anche in  $[MeV cm^2 g^{-1}]$

## 20 26. Passage of particles through matter



**Fig. 26.15:** The photon mass attenuation length (or mean free path)  $\lambda = 1/(\mu/\rho)$  for various elemental absorbers as a function of photon energy. The mass attenuation coefficient is  $\mu/\rho$ , where  $\rho$  is the density. The intensity  $I$  remaining after traversal of thickness  $t$  (in mass/unit area) is given by  $I = I_0 \exp(-t/\lambda)$ . The accuracy is a few percent. For a chemical compound or mixture,  $1/\lambda_{\text{eff}} \approx \sum_{\text{elements}} w_Z/\lambda_Z$ , where  $w_Z$  is the proportion by weight of the element with atomic number  $Z$ . The processes responsible for attenuation are given in not Fig. 26.9. Since coherent processes are included, not all these processes result in energy deposition. The data for  $30 \text{ eV} < E < 1 \text{ keV}$  are obtained from [http://www-cxro.lbl.gov/optical\\_constants](http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants) (courtesy of Eric M. Gullikson, LBNL). The data for  $1 \text{ keV} < E < 100 \text{ GeV}$  are from <http://physics.nist.gov/PhysRefData>, through the courtesy of John H. Hubbell (NIST).

**Linear Energy Transfer (LET) = frazione d'energia persa da una particella carica per collisioni elettroniche in un tratto  $dl$  del mezzo meno la somma delle energie cinetiche rilasciate agli elettroni oltre il valore  $\Delta$**

$$\Leftrightarrow L_{\Delta} = dE_{\Delta} / dl \quad [\text{J m}^{-1}]$$

**n.b:**

$$L_{\Delta} = S_{el} - dE_{kin \ E > \Delta} / dl \quad [\text{J m}^{-1}]$$

**Energia media spesa in un gas per la formazione di coppie = Energia cinetica iniziale / Numero di coppie formate**

$$\Leftrightarrow W = E / N \quad [\text{J}]$$

**spesso  $W$  è espresso in eV**

## UNITA' IN DOSIMETRIA

**Energia cinetica rilasciata per unità di massa (Kerma) = energia cinetica iniziale associata alle particelle cariche liberate da particelle incidenti neutre in una massa dm del mezzo**  $\Leftrightarrow$   **$K = dE_{tr} / dm$  [J kg<sup>-1</sup>]=[Gy]**

**n.b:** l'energia di legame degli elettroni non è inclusa nel coefficiente

**per X/γ di energia E:**  **$K = \Phi E \mu_{tr}/\rho$**   
 **$K / \Phi =$  coefficiente di Kerma delle particelle di energia E nel mezzo**

**Kerma rate**  $\Leftrightarrow$   **$\dot{K} = dK / dt$  [W kg<sup>-1</sup>]=[Gy s<sup>-1</sup>]**

**Esposizione = carica totale degli ioni di un segno prodotti da fotoni in aria per unità di massa**  $\Leftrightarrow$   **$X = dQ / dm$  [C kg<sup>-1</sup>]**

**n.b:** non è inclusa la ionizzazione da fotoni prodotti radiativamente (influyente solo ad alte energie)

**inoltre:**  **$X = e/W \Phi E \mu_{tr}/\rho (1-g)$**   
**per X/γ di energia E < 1 MeV:**  **$X = e/W K_{air} (1-g)$**

**Tasso (rate) d'esposizione**  $\Leftrightarrow$   **$\dot{X} = dX / dt$  [C kg<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>]**

**Energy deposit = energia netta depositata in una singola interazione**

$$\Leftrightarrow \quad \epsilon_i = \epsilon_{in} + \epsilon_{out} + Q \text{ [J]}$$

con  $Q > 0$  se l'energia a riposo di tutte le particelle interessate diminuisce

**Energy imparted = energia netta depositata in un volume**

$$\Leftrightarrow \quad \epsilon = \sum_i \epsilon_i \text{ [J]}$$

**Mean energy imparted = energia media depositata in un volume**

$$\Leftrightarrow \quad \epsilon = R_{in} - R_{out} + \sum Q \text{ [J]}$$

**Energia specifica = energia netta depositata in un volume per unità di massa**

$$\Leftrightarrow \quad z = \epsilon / m \text{ [J kg}^{-1}\text{]} = \text{[Gy]}$$

**Dose assorbita = energia media depositata in un volume per unità di massa**

$$\Leftrightarrow \quad D = d\epsilon / dm \text{ [J kg}^{-1}\text{]} = \text{[Gy]}$$

**Tasso di dose assorbita**

$$\Leftrightarrow \quad \dot{D} = dD / dt \text{ [Gy s}^{-1}\text{]}$$



## **Bibliografia minima**

**International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) Report 60 “Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation” (1998)**

**[www.icru.org](http://www.icru.org)**

**K. Hagiwara et al. “The Review of Particle Physics” Phys. Rev. D66, 010001 (2002)**

**[pdg.web.cern.ch/pdg](http://pdg.web.cern.ch/pdg)**