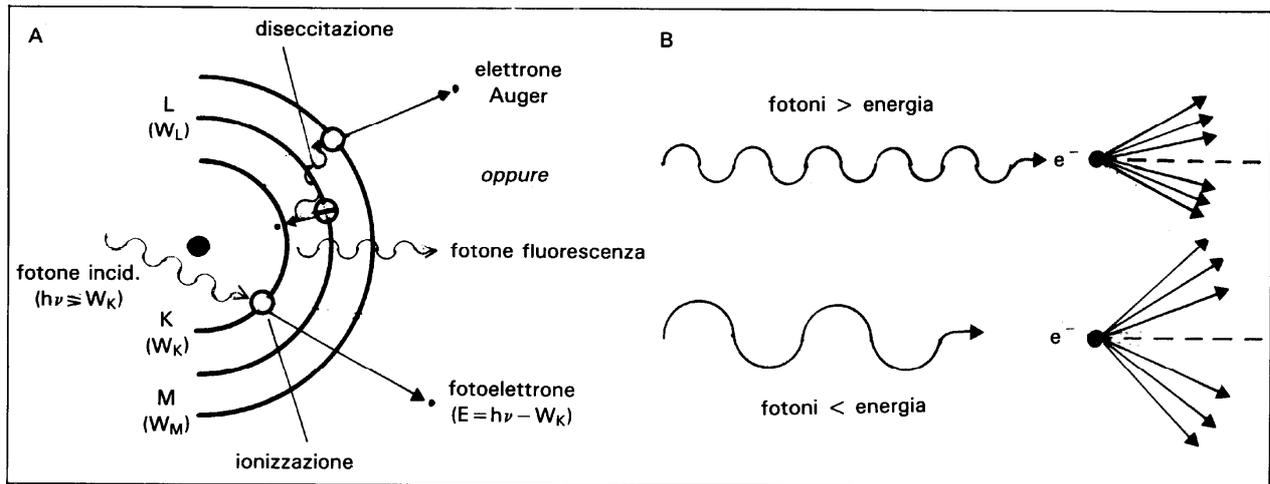


# L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

## Effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico è quello predominante a basse energie: per materiali ad alto numero atomico  $Z$ , l'effetto si ha fino ad energie di 1MeV.



Se un fotone di energia  $h\nu$  colpisce un elettrone interno e la sua energia è **maggiore dell'energia di legame dell'elettrone**, il fotone viene completamente assorbito nell'urto e l'elettrone (detto anche **fotoelettrone**) viene espulso dall'atomo con una energia cinetica pari alla differenza tra l'energia  $h\nu$  e quella di legame.

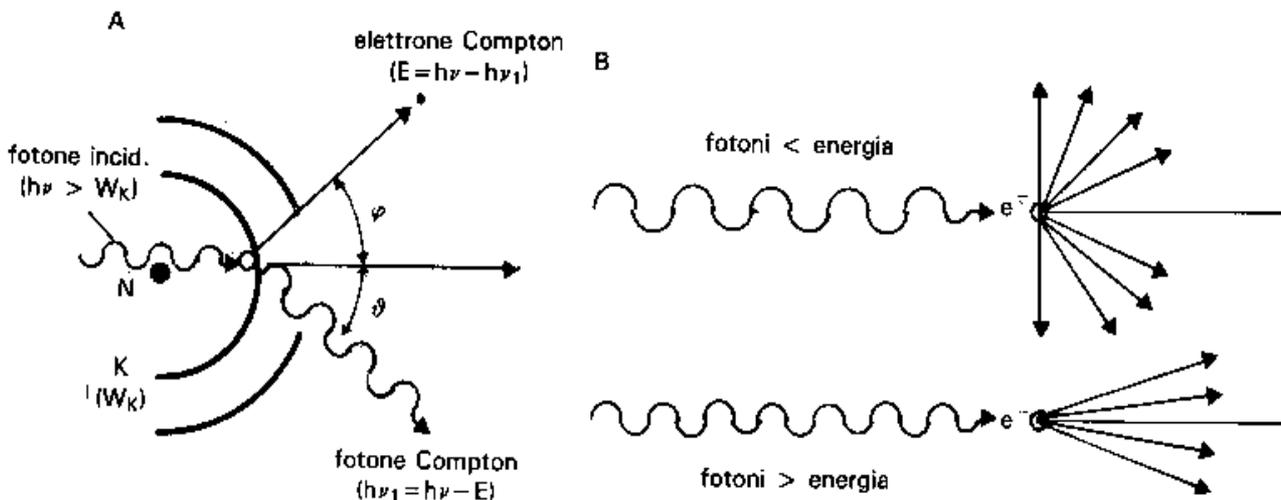
L'atomo risulta così in uno stato di eccitazione e dopo breve tempo un altro elettrone occuperà il vuoto lasciato nell'orbita con conseguente emissione di una radiazione elettromagnetica detta **radiazione caratteristica o di fluorescenza**.

La probabilità dell'effetto fotoelettrico dipende dalla quarta potenza numero atomico  $Z$  del materiale assorbente, inversamente dalla terza potenza dell'energia del fotone incidente e dal numero di atomi  $N$  presenti nel materiale assorbente.

# L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

## Effetto Compton

Al crescere dell'energia del fotone diminuisce la probabilità dell'effetto fotoelettrico, mentre diventa predominante l'effetto Compton o di diffusione incoerente.



Se il fotone incidente di energia  $h\nu$  interagisce con un **elettrone orbitale esterno** (considerato «libero» o «debolmente legato»), nell'urto parte della sua energia viene trasferita all'elettrone.

L'elettrone è messo in movimento con una certa energia cinetica, mentre il fotone (o «fotone diffuso») cambia direzione di propagazione ed assume una energia minore pari alla differenza tra quella incidente e quella cinetica dell'elettrone.

La direzione del fotone diffuso e dell'elettrone emesso dipende dalla energia cinetica dell'elettrone, dall'energia del fotone incidente e da quella del fotone diffuso.

## L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

### **Effetto Compton: fotone di energia bassa**

Nel caso di *fotoni di energia bassa* (molto inferiore a 0.511MeV), l'energia fornita all'elettrone orbitale è molto piccola, il fotone diffuso mantiene pressoché inalterata la direzione di propagazione e l'elettrone viene espulso perpendicolarmente ad essa.

### **Effetto Compton: fotone diffuso di energia alta**

Nel caso di *fotoni di energia elevata.*, nell'urto, gran parte dell'energia del fotone incidente viene trasferito all'elettrone orbitale che si muoverà nella stessa direzione del fotone incidente.

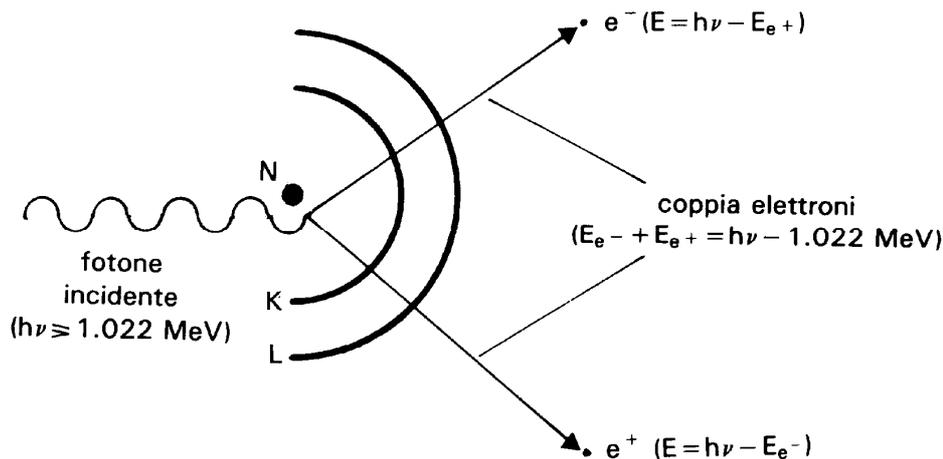
Il fotone diffuso caratterizzato da una energia molto minore di quella incidente manterrà la stessa direzione di propagazione ma con verso contrario (**fotoni retrodiffusi**).

*La probabilità dell'effetto Compton dipende dal numero atomico  $Z$  del materiale assorbente, inversamente dall'energia del fotone incidente e dal numero di atomi  $N$  presenti nel materiale assorbente.*

## L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

### Creazione di coppie

Per energie dei fotoni incidenti superiori a 1,022 MeV, si ha un particolare fenomeno detto *produzione di coppie*: tale processo è legato all'interazione diretta del fotone con il nucleo dell'atomo del mezzo assorbitore.



Nell'interazione il fotone può scomparire completamente dando luogo ad una coppia di elettroni positive e negativi di energia cinetica pari alla differenza dell'energia del fotone incidente e l'energia di 1,022 MeV corrispondente all'equivalente energetico della massa delle due particelle (**teoria di Einstein sulla equivalenza tra materia ed energia**).

L'effetto quindi è la creazione di due particelle: un elettrone di data energia cinetica che si muoverà nel mezzo perdendo via via la propria energia negli urti con gli elettroni orbitali e un «**antielettrone**» (corrispondente antimateria dell'elettrone) che a sua volta interagirà con gli elettroni del mezzo assorbitore in un *processo di annichilazione* ovvero di sparizione con successiva emissione di due fotoni di energia pari a 0,511 MeV e di direzione opposta.

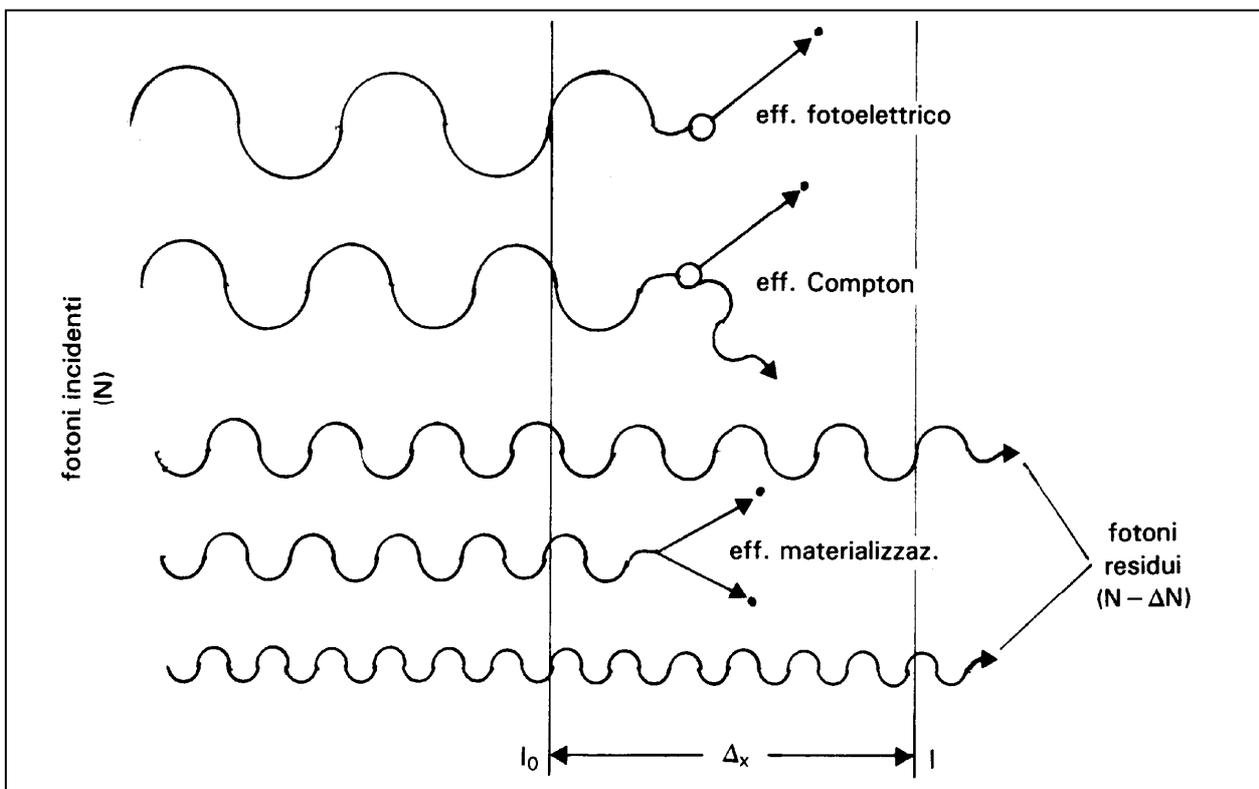
*La probabilità di questo effetto dipende fundamentalmente dall'energia e dal numero atomico Z.*

# L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

## L'ASSORBIMENTO DEI FOTONI

### Andamento esponenziale dell'assorbimento della radiazione elettromagnetica

Se un fascio monoenergetico di fotoni (*radiazione primaria di  $N_0$  fotoni a energia pari  $h\nu$* ) attraversa un materiale di spessore  $\Delta x$ , un certo numero di fotoni  $\Delta N$  viene rimosso dal fascio per effetto dei processi di interazione con la materia



# L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

## L'ASSORBIMENTO DEI FOTONI

Variando lo spessore del materiale assorbente si verifica che la diminuzione del numero di fotoni  $N$  (*radiazione primaria attenuata*) risulta proporzionale allo spessore di materiale  $\Delta x$  ed al numero iniziale  $N$  di fotoni secondo la seguente relazione:

$$\Delta N \propto N \Delta x \quad \text{o} \quad \Delta I \propto I \Delta x$$

essendo  $I$  l'intensità del fascio.

Si definisce come costante di proporzionalità il **coefficiente di attenuazione lineare**  $\mu$  espresso da:

$$\mu = -\frac{\Delta N}{N \Delta x} \quad (\text{di dimensione cm}^{-1})$$

*La costante  $\mu$  dipende e dall'energia del fascio monoenergetico e dal materiale assorbente.*

Dalla relazione sperimentale precedente si ottiene un andamento di tipo esponenziale per il processo di attenuazione del fascio di radiazione in un dato materiale, espresso nel seguente modo:

$$N = N_0 \cdot \exp(-\mu x) \quad \text{o} \quad I = I_0 \cdot \exp(-\mu x)$$

# L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

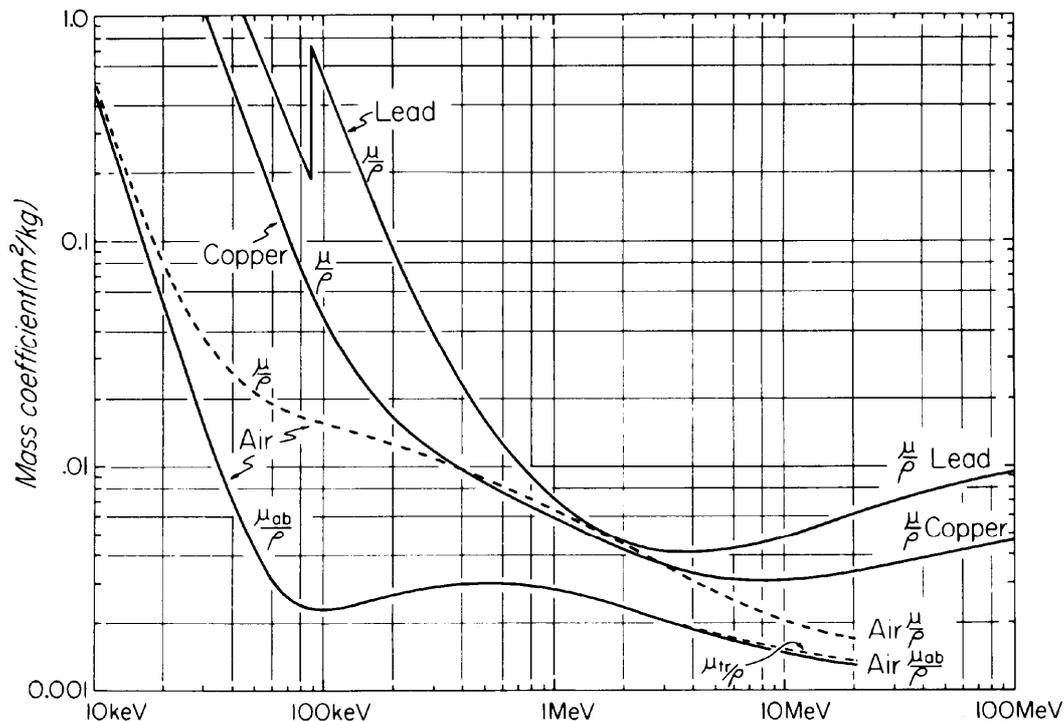
## Il coefficiente di attenuazione lineare: Energia assorbita ed Energia diffusa

Il *coefficiente di attenuazione lineare* rappresenta la probabilità per unità di percorso che un fotone ha di interagire con la sostanza nella quale si propaga.

Per ciascun processo di interazione è possibile definire una probabilità di interazione per unità di percorso, che dipenderà dall'energia E del fascio monoenergetico e dalle proprietà del materiale (numero atomico Z e densità atomica N).

$$\mu = \Sigma (\mu_{\text{photo}} + \mu_{\text{compton}} + \mu_{\text{pair}})$$

- **coefficiente di assorbimento  $\mu_a$**  : *probabilità che l'energia incidente sia assorbita dagli elettroni secondari prodotti nell'interazione e trasformata in energia cinetica*
- 
- **coefficiente di diffusione  $\mu_d$**  : *probabilità che l'energia incidente del fotone incidente sia trasformata in energia diffusa dei fotoni secondari*

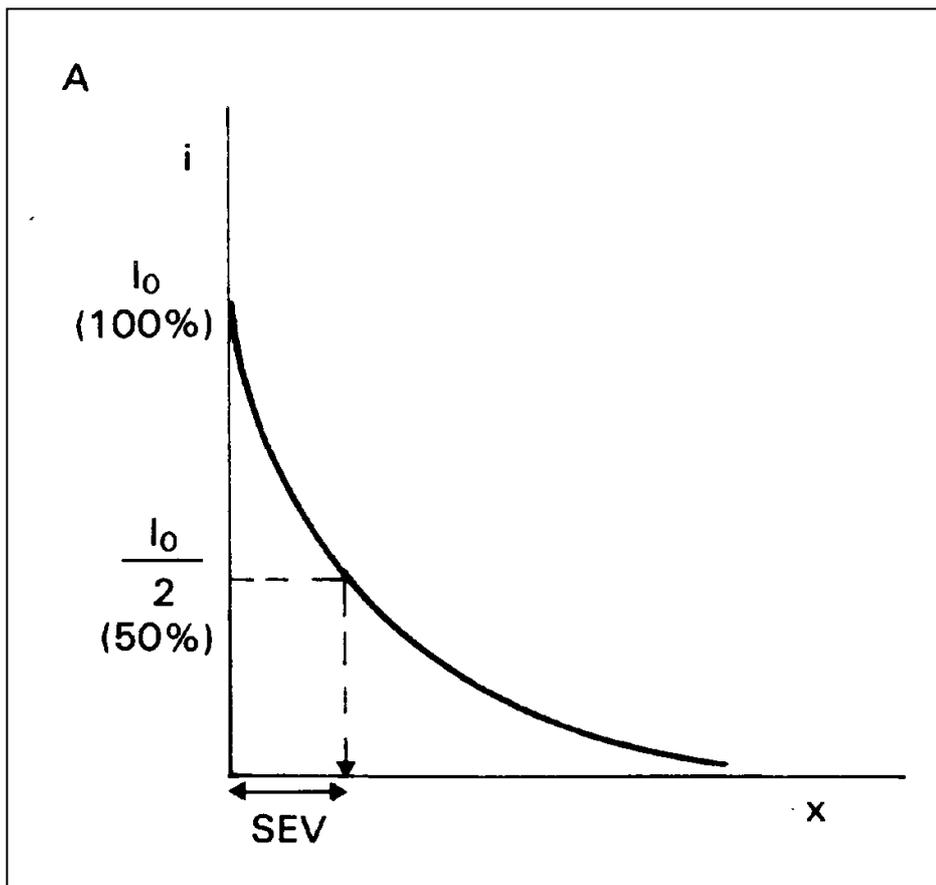


## L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

### Lo spessore emivalente e l'energia equivalente: potere di penetrazione

Si chiama **spessore di dimezzamento o emivalente** (*H.V.L.* o *half value layer*) lo spessore necessario a dimezzare l'intensità del fascio primario ed espresso dalla relazione:

$$\text{H.V.L.} = \frac{\ln 2}{\mu}$$



Una volta fissato il materiale assorbitore, il valore dell' H.V.L. in quanto funzione di  $\mu$  dipende solo dall'energia del fascio.

Lo spessore di dimezzamento per un dato materiale allora può essere usato per esprimere la "qualità" del fascio di radiazione elettromagnetica cioè la sua energia.

# L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

## **Attenuazione, assorbimento e tessuti biologici**

Per un tipo di radiazione elettromagnetica ed una certa energia i processi di interazione dipendono dalle caratteristiche del materiale irradiato (**densità media e numero atomico medio**).

**Energie basse ( $10\text{keV} < h\nu < 200\text{keV}$ ) e materiali ad alto Z:** \_\_\_\_\_ predomina l'effetto fotoelettrico.

**Medie ed alte energie ( $200\text{keV} < h\nu < 10\text{MeV}$ ):** maggiore \_\_\_\_\_ è la probabilità dell'effetto Compton.

Nel caso di **tessuti biologici** si possono individuare essenzialmente tre tipologie per le quali ciascun processo di interazione avrà maggiore o minore probabilità di avvenire.

**Tessuti molli :** sono caratterizzati da una densità media assimilabile all'unità ( $\approx 1 \text{ g/cm}^3$ ) contenendo circa 90% d'acqua; sono costituiti essenzialmente da atomi di idrogeno, carbonio, azoto, ossigeno con tracce di sodio, manganese, fosforo, calcio e potassio e quindi il numero atomico efficace è pari a 7.6.  
Caso particolare tra i tessuti molli è il *tessuto polmonare* caratterizzato da una densità media assai bassa ( $\approx 0.3 \text{ g/cm}^3$ ).

**Tessuto adiposo:** contiene atomi di idrogeno, carbonio, azoto, ossigeno ed il numero efficace è pari a 6.10 con una densità minore dell'acqua pari a circa  $0.9 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ .

**Tessuto osseo:** contiene le stesse specie atomiche presenti nel tessuto molle, ma con una percentuale maggiore per quelle ad alto Z, in particolare fosforo e calcio; il numero atomico efficace è relativamente alto pari a 12 e la densità varia da 1.20 (componente spugnosa) a 1.80 (componente compatta).

## L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

Per tutti questi tipi di tessuti la densità elettronica presenta modeste differenze.

	COMPOSIZIONE						$Z_{\text{eff}}$	$\rho$	$\rho_{\text{el}}$ (el./g · 10 <sup>23</sup> )
	H	C	N	O	P	Ca			
<b>Tessuti molli</b>	10.2	12.3	3.4	73	0.7	0.3	<b>7.60</b>	1.0	<b>3.36</b>
<b>Tessuto adiposo</b>	11.5	77		11.5			<b>6.10</b>	0.9	<b>3.48</b>
<b>Tessuto osseo</b>	6.4	28	2.7	41	7.2	14.7	<b>12</b>	1.2/1.8	<b>3</b>
<b>Acqua</b>	11.1			88.9			<b>7.67</b>	1.0	<b>3.34</b>

# L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

## Dispersione quadratica delle radiazioni

Indipendentemente dall'attenuazione, un fascio di radiazioni nel suo tragitto al di fuori della sorgente radiogena, subisce una diminuzione di intensità per unità di superficie, dipendente dalla divergenza del fascio.

La legge relativa è detta **legge della dispersione quadratica della radiazione** (o *legge del quadrato della distanza*) secondo cui l'intensità di un fascio di radiazioni in punti situati a distanze diverse dalla sorgente è inversamente proporzionale al quadrato di tali distanze.

*Se si definisce con  $I_0$  la intensità di emissione di una data sorgente, alla distanza  $d$  dalla stessa sorgente la intensità della radiazione assumerà il valore dato dalla relazione:*

$$I_d = \frac{I_0}{d^2}$$

