

# FONDAMENTI DI FISICA DELLE RADIAZIONI

di  
**Rossella Vidimari**

## INDICE

<b>Paragrafo</b>	<b>1</b>	<b><u>Materia e radiazione</u></b>
	1.1	Crisi della fisica classica (spettro del corpo nero ed effetto fotoelettrico)
	1.2	Modello atomico di Rutherford e di Bohr
	1.3	Proprietà ondulatorie della materia (ipotesi di de Broglie e la meccanica ondulatoria)
	1.4	La struttura elettronica degli elementi
	1.5	Emissione ed assorbimento
<b>Paragrafo</b>	<b>2</b>	<b><u>La radiazione elettromagnetica</u></b>
	2.1	Aspetto ondulatorio delle onde elettromagnetiche
	2.2	Aspetto corpuscolare delle onde elettromagnetiche 33
	2.3	Le sorgenti delle radiazioni elettromagnetiche
<b>Paragrafo</b>	<b>3</b>	<b><u>Le interazioni degli elettroni con la materia</u></b>
	3.1	Eccitazione e ionizzazione
	3.2	Radiazione di frenamento
	3.3	Assorbimento della radiazione corpuscolare carica
<b>Paragrafo</b>	<b>4</b>	<b><u>L'interazione dei fotoni con la materia</u></b>
	4.1	Effetto fotoelettrico
	4.2	Diffusione classica
	4.3	Effetto Compton
	4.4	Creazione di coppie
<b>Paragrafo</b>	<b>5</b>	<b><u>L'assorbimento dei fotoni</u></b>
	5.1	Andamento esponenziale dell'assorbimento della radiazione elettromagnetica
	5.2	Il coefficiente di attenuazione lineare (Energia assorbita ed energia diffusa)
	5.3	Lo spessore emivalente e l'energia equivalente (potere di penetrazione)
	5.4	Attenuazione, assorbimento e tessuti biologici
	5.5	Dispersione quadratica delle radiazioni

## MATERIA E RADIAZIONE

### 1.1 Crisi della fisica classica (spettro del corpo nero ed effetto fotoelettrico)

Alla fine del secolo scorso, la teoria fisica predominante ammetteva come unici costituenti dell'Universo fisico la *materia* e la *radiazione*.

La *materia* è costituita da particelle perfettamente localizzabili, soggette alla legge di Newton della meccanica classica, secondo cui lo stato di una particella è perfettamente definito dalla sua posizione e velocità.

La *radiazione* presenta un comportamento ondulatorio ed obbedisce alle leggi della elettrodinamica di Maxwell; le sue variabili dinamiche sono le componenti del campo elettrico e del campo magnetico in ogni punto dello spazio.

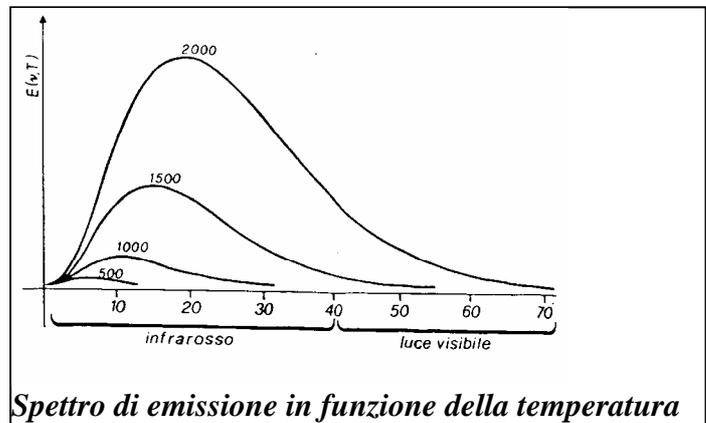
Applicazione di tale teoria ai moti molecolari aveva portato risultati utili alla teoria cinetica dei gas. Nel 1897 (esperimento di Thomson sui raggi catodici) veniva scoperto l'elettrone di cui parve evidente la natura corpuscolare potendone studiare la traiettoria in campi elettrici e magnetici. Parallelamente tramite gli esperimenti di diffrazione di Young e la scoperta di Maxwell sulla connessione tra fenomeni ottici e sonori veniva affermata la natura ondulatoria della luce.

A cavallo del secolo, ulteriori esperimenti misero in luce nuove problematiche non inquadrabili nello schema delle leggi classiche e che invalidavano la distinzione precedentemente ammessa tra materia e radiazione.

Storicamente i problemi che misero in luce i limiti di validità delle leggi classiche furono la **modalità di emissione e di assorbimento di radiazione da parte della materia** (problema del corpo nero) e lo sviluppo di un **modello atomico** soddisfacente.

*Problema del corpo nero:* la termodinamica classica non riesce a spiegare il tipico andamento dello spettro di emissione di un corpo nero ovvero di un oggetto la cui superficie assorbe completamente la energia radiante che lo investe.

Nel 1890 Planck riproduce teoricamente tale andamento introducendo **l'ipotesi dei quanti** secondo cui l'energia raggiante viene emessa o assorbita non in modo continuo ma in quantità discrete:



*"ogni processo di assorbimento o di emissione di radiazione monocromatica di frequenza  $\nu$  si manifesta con una successione di atti elementari in ognuno dei quali la quantità di energia  $\epsilon$  emessa o assorbita è sempre la stessa e precisamente:*

$$\epsilon = h\nu$$

*essendo  $h$  la costante di Planck pari a  $6.625 \cdot 10^{-34}$  Js."*

In altre parole l'energia al pari della materia presenta una natura discontinua essendo formata da quantità elementari.

La teoria dei quanti trovava conferma nella spiegazione data da Einstein (1905) all'effetto

fotoelettrico osservato per la prima volta da Hertz nel 1887.

Una superficie metallica colpita da una radiazione di frequenza particolarmente alta emette elettroni secondo particolari modalità:

- 1) l'effetto ha luogo solo se la frequenza della radiazione incidente ha una frequenza maggiore di un certo valore di soglia caratteristico del metallo;
- 2) gli elettroni escono con diverse velocità che vanno da zero ad un valore massimo;
- 3) il flusso di elettroni (numero per unità d'area e di tempo) è proporzionale all'intensità della radiazione incidente.

Anche in questo caso la teoria classica della luce non riusciva a spiegare completamente tale fenomeno. Solo ammettendo che l'energia della radiazione incidente fosse quantizzata non solo all'atto dell'assorbimento e della emissione ma anche nello spazio, tale effetto era spiegabile come un processo d'urto tra i **quanti di radiazione** o **fotoni incidenti** e gli elettroni atomici del metallo.

Infatti solo se l'energia del fotone incidente è maggiore alla quantità di energia di legame dell'elettrone all'atomo l'effetto ha luogo (1); l'energia dell'elettrone scalzato dall'atomo è pari alla differenza tra l'energia del fotone incidente e quella di legame dell'elettrone (2); variando l'intensità dei fotoni quindi il loro numero varia il numero di elettroni scalzati quindi emessi (3).

## 1.2 Modello atomico di Rutherford e di Bohr

Agli inizi del 1900, diversi studi sui raggi catodici, sulle sostanze radioattive, portarono a concepire l'atomo, elettricamente neutro, come costituito da una parte carica positivamente, cui era associata la quasi totalità della massa dell'atomo stesso, e da un certo numero di elettroni.

Oggi si accettano come valori di carica e di massa dell'elettrone pari a:

$$\begin{aligned} e^\circ &= 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb} \\ m_e &= 9.110 \cdot 10^{-28} \text{ g} = 1/1837 M_H \end{aligned}$$

essendo  $M_H$  la massa dell'atomo di idrogeno.

Lo studio del moto delle molecole nei gas e sulla densità dei solidi portava ad attribuire agli atomi un raggio di  $10^{-8}$  cm.

Rutherford (1911-1913) attraverso l'analisi dei risultati sulla diffusione delle particelle  $\alpha$  (nuclei di atomi di elio) da parte di lamine sottili d'oro, dimostrò che la parte pesante e carica positivamente costituiva un nucleo centrale di raggio non superiore a  $10^{-10}$  e che attorno a questo nucleo dovevano essere disposti gli elettroni su orbite con raggio dell'ordine dei  $10^{-8}$ .

Tale modello presentava delle difficoltà teoriche. Per le leggi dell'elettrodinamica classica l'elettrone, quindi una particella carica, che descrive una traiettoria curva ed è quindi soggetto ad una accelerazione centripeta deve emettere onde elettromagnetiche e perdere progressivamente energia cadendo nel nucleo: **spettro di emissione continuo e instabilità del nucleo!**

Bohr nel 1913 ispirandosi all'ipotesi quantistica di Planck introdusse le seguenti ipotesi per superare tali difficoltà:

- 1) per gli elettroni di un atomo esistono delle orbite privilegiate, stabili, sulle quali l'elettrone non irraggia; queste orbite sono discrete e di conseguenza discreti sono i valori dell'energia ad esse corrispondenti (**livelli energetici**).
- 2) L'**emissione** (o l'**assorbimento**) di radiazione avviene per effetto della transizione di un elettrone da un'orbita ad un'altra di energia inferiore (o superiore); durante tale processo si ha emissione (o assorbimento) di un singolo quanto la cui energia dipende dalla differenza di energia delle due orbite.

Da queste ipotesi Bohr determina per l'atomo di idrogeno il raggio  $r_n$  delle orbite possibili e la corrispondente energia  $E_n$  funzione del numero quantico principale  $n$

### 1.3 Proprietà ondulatorie della materia (ipotesi di de Broglie e la meccanica ondulatoria)

L'aspetto ondulatorio della materia non fu suggerito da fatti sperimentali ma fu formulato da de Broglie (1925) in base a condizioni puramente teoriche.

Egli formulò l'ipotesi che come è possibile associare ad un'onda elettromagnetica una particella (fotone) di energia  $h\nu$ , viceversa ad una particella di energia  $E$  e quantità di moto  $p$  corrisponde un'onda di lunghezza d'onda  $\lambda$  pari a  $h/p$ .

**Il moto di un elettrone in una orbita privilegiata dell'atomo può essere allora studiata come una onda confinata in una determinata regione dello spazio.**

La teoria ondulatoria dell'elettrone viene ulteriormente sviluppata da Schroedinger per determinare correttamente i livelli energetici dell'atomo di idrogeno. Egli sviluppa una equazione d'onda la cui soluzione è una funzione d'onda associata all'elettrone che assume il significato fisico di **densità di probabilità** di trovare l'elettrone in una certa regione dello spazio. Tale equazione ponendo alcune condizioni al contorno fornisce le energie permesse e il valore dei quattro numeri quantici che descrivono la forma, l'orientamento nello spazio delle orbite possibili (**orbitali elettronici**). I quattro numeri quantici sono così definiti:

- **numero quantico principale  $n$**  (intero: 1,2,3,..) che caratterizza l'energia di legame elettronica in una data orbita  $E_n$  (corrispondente all'energia necessaria per sottrarre l'elettrone dall'orbita);

- **numero quantico orbitale  $l$**  (intero da 0,..,( $n-1$ )) che caratterizza la forma dell'orbita classica (grado di ellitticità);

- **numero quantico magnetico orbitale  $m_l$**  (intero da 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,...  $\pm l$ ) che caratterizza l'orientamento nello spazio;

- **numero quantico di spin  $m_s$**  ( $\pm 1/2$ ).

Per un dato *numero quantico principale*  $n$  è definito un certo livello elettronico (K, L, M, N, ..) suddiviso in differenti sottolivelli al variare del *numero quantico*  $l$  (livelli s, p, d, f,..).

Ad esempio riportiamo in tabella la distribuzione dei livelli per  $n=4$ .

Livello	K			L			M			N	
	1	2		3			4				
Numero quantico principale $n$ :	1	2		3			4				
Sottolivello	s	s	p	s	p	d	s	p	D	f	
Numero quantico orbitale $l$ :	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3	
Numero di elettroni	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	
Numero totale elettroni	2	8		18			32				

Nel 1925 Paoli formula il principio di esclusione: *in un sistema di elettroni non vi possono essere due elettroni aventi i quattro numeri quantici identici*. Di conseguenza in un orbitale elettronico non possono esistere più di 2 elettroni.

### 1.4 La struttura elettronica degli elementi

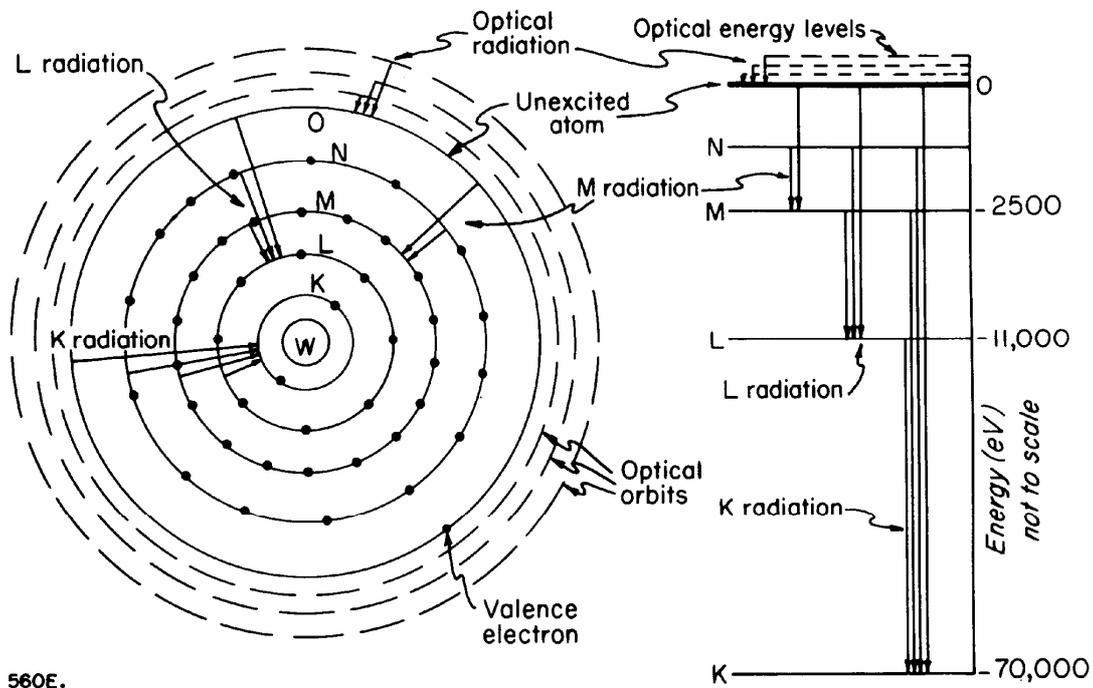
La conferma della correttezza della teoria ondulatoria o meccanica quantistica viene dalla perfetta descrizione della struttura elettronica degli elementi. Mendeleev nel 1869 diede per primo una classificazione degli elementi (**sistema periodico degli elementi**), suddividendoli in base alle loro proprietà fisico-chimiche ed alle relazioni intercorrenti tra queste ultime ed il peso atomico (o **massa atomica** definita come rapporto tra la massa dell'atomo e la massa atomica dell'isotopo 12 del carbonio pari a 12 g).

La teoria quantistica spiega rigorosamente l'ordinamento degli elementi semplici nel sistema periodico prendendo come parametro ordinatore al posto del peso atomico un'altra grandezza: il

### numero atomico Z.

Il numero atomico  $Z$  esprime il numero di particelle di carica elettrica positiva ( $+Ze$ ) **protoni**, che costituiscono il nucleo dell'atomo ed è pari al numero di **elettroni orbitali** (particelle di carica elettrica negativa  $-e$ ): l'atomo stabile risulta elettricamente neutro.

Per un dato elemento di numero atomico  $Z$ , la distribuzione degli elettroni orbitali è univocamente determinata secondo le leggi della meccanica quantistica e le proprietà chimico-fisiche dipendono dalla configurazione elettronica cioè variano in base al numero di elettroni che occupano i sottolivelli più esterni. Un livello che contiene tutti gli elettroni che gli compete si definisce **completo** o chiuso. Quando il sottolivello non è completo tende a perdere o ad acquistare elettroni al fine di raggiungere tale configurazione stabile (in questa tendenza risiede l'attività chimica degli elementi e la proprietà di formare dei composti che realizzano la struttura elettronica più stabile). Gli elementi che risultano più stabili sono infatti i gas detti **gas nobili** che possiedono l'ultimo strato completo: Elio (He), Neon (Ne), Argon (Ar), Cripton (Kr) e Xenon (Xe).



*Rappresentazione schematica dell'atomo di tungsteno: sono rappresentati a sinistra gli orbitali elettronici possibili e a destra i corrispondenti "livelli energetici"*

## 1.5 Emissione ed assorbimento

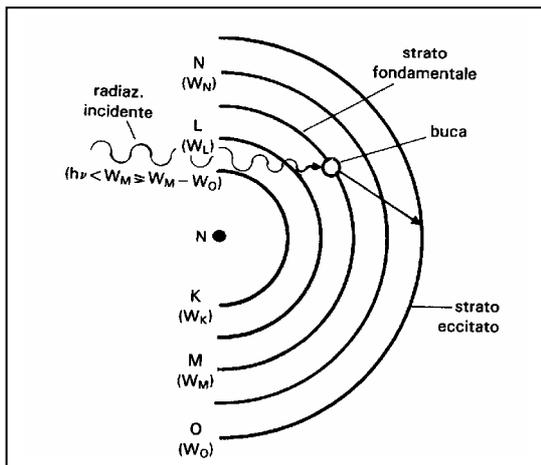
In un atomo gli elettroni tendono a disporsi nelle orbite più interne per rendere minore possibile la energia del sistema. Se un elettrone di un certo livello viene colpito da un radiazione elettromagnetica, potrà saltare ad un livello di energia più esterno (**fenomeno di eccitazione** dell'atomo) o addirittura fuoriuscire dall'atomo (**fenomeno di ionizzazione** dell'atomo) solo se l'energia del fotone è pari alla differenza di energia dei due livelli o nel secondo caso pari all'energia di legame: *processo di assorbimento*.

Al crescere del numero atomico  $Z$  l'energia di legame dei livelli più esterni vale pochi eV e quindi saranno possibili transizioni con onde elettromagnetiche di bassa frequenza (anche luminosa).

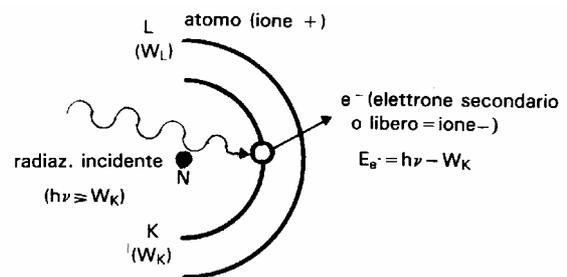
Lo stato di eccitazione ha una vita media breve in quanto l'atomo tende sempre alla configurazione più stabile: l'elettrone ritornerà al livello iniziale o nel caso della ionizzazione un elettrone esterno cadrà a coprire il vuoto lasciato, emettendo un fotone di energia pari alla differenza dei due livelli: *processo di emissione*.

Per atomi ad alto  $Z$  le energie di legame per i livelli più interni sono dell'ordine dei keV e quindi si hanno emissioni di radiazione X.

### *Eccitazione di un atomo irradiato*



### *Ionizzazione di un atomo irradiato*

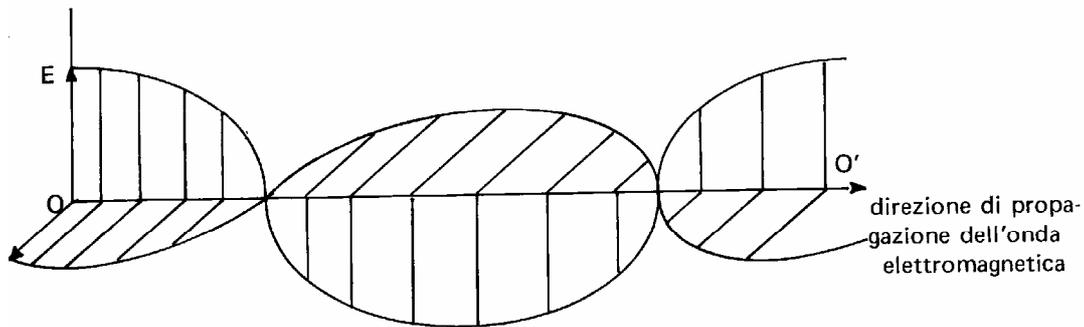


## Paragrafo 2

### LA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

#### 2.1 Aspetto ondulatorio delle onde elettromagnetiche

Seguendo la teoria elettromagnetica di Maxwell, una radiazione elettromagnetica è considerata come propagazione di un campo elettrico e di un campo magnetico alternanti (onde sinusoidali), tra loro in fase e perpendicolari, e perpendicolari alla direzione di propagazione.



L'onda elettromagnetica è definita quindi dalle grandezze:

**Periodo T (sec):** durata di una oscillazione completa

**Frequenza  $\nu$  ( $1\text{Hz}=\text{sec}^{-1}$ ):** numero di oscillazioni complete nell'unità di tempo

**Lunghezza d'onda  $\lambda$  (cm):** spazio percorso da un'oscillazione nell'intervallo di tempo di un periodo

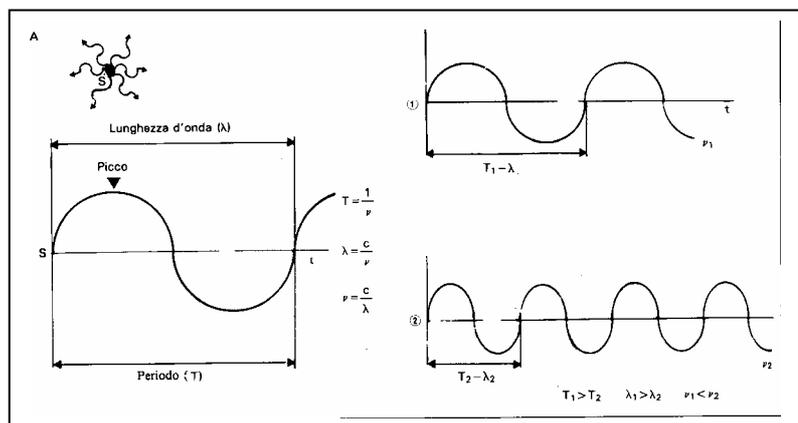
Tra loro legate dalle relazioni:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

$$\nu = 1/T$$

essendo  $c$  la velocità della luce che nel vuoto vale  $3 \cdot 10^8$  m/s.

Fenomeni tipicamente ondulatori della radiazione elettromagnetica sono la riflessione, la rifrazione, la diffrazione, l'interferenza).



#### 2.2 Aspetto corpuscolare delle onde elettromagnetiche

Secondo la teoria dei quanti di Planck ed Einstein la radiazione elettromagnetica mostra un aspetto corpuscolare nei fenomeni di emissione, assorbimento di energia e nei processi di interazione radiazione e materia.

### 2.3 Le sorgenti delle radiazioni elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche si distinguono in diversi gruppi fondamentalmente per la frequenza e quindi per la natura del processo che le origina:

<b>FOTONI</b>	<b>Frequenza <math>\nu</math> (Hz)</b>	<b>Energia (eV)</b>	<b>Processo di origine</b>	<b>Impiego medico</b>
Radiofrequenze	$10^4 \div 10^9$	$10^{-10} \div 10^{-6}$	Circuito elettrico oscillante	Termoterapia, ipertermia, risonanza magnetica
Microonde	$10^9 \div 10^{12}$	$10^{-5} \div 10^{-2}$		
Infrarossi	$10^{12} \div 10^{13}$	$10^{-2} \div 10^{-1}$	Vibrazioni molecolari (corpi «caldi»)	Termoterapia, termografia
Ottici	$10^{14} \div 10^{15}$		Eccitazione di atomi di gas o riscaldamento elevato di corpi	Laser
Ultravioletti	$10^{15} \div 10^{16}$	$10 \div 10^2$	Eccitazione	
Radiazione X	$10^{17} \div 10^{24}$	$10^3 \div 10^6$	Processi di interazione di elettroni con l'atomo	Radiodiagnostica
Radiazione $\gamma$	$10^{17} \div 10^{24}$	$10^3 \div 10^6$	Processi di interazione nucleare	Radioterapia Medicina nucleare

## LE INTERAZIONI DEGLI ELETTRONI CON LA MATERIA

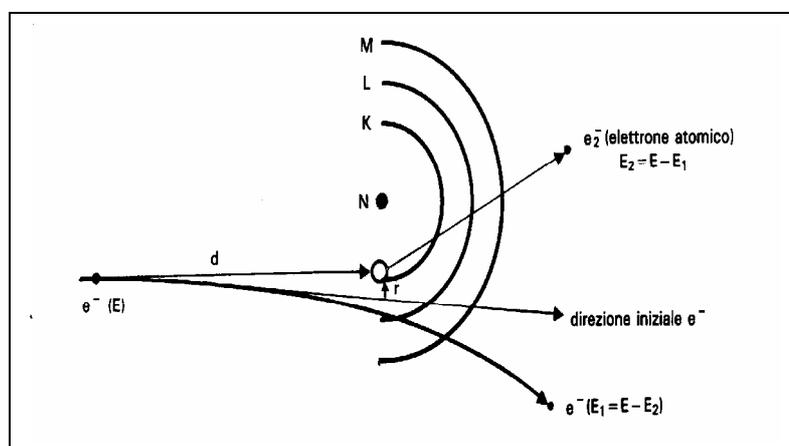
### 3.1 Eccitazione e ionizzazione

Gli elettroni liberi interagiscono con la materia fino a perdere la loro energia cinetica con un meccanismo sia di urto con gli elettroni orbitali degli atomi costituenti il materiale in cui penetrano sia di interazioni con i nuclei atomici.

Nel caso di urto con gli elettroni orbitali, l'effetto dipenderà dalla energia dell'elettrone incidente e da quale elettrone orbitale è stato colpito.

Infatti se l'energia trasferita nell'urto è minore dell'energia di legame dell'elettrone orbitale quest'ultimo salta ad un livello più esterno e l'atomo passa ad uno stato di eccitazione. L'atomo ritornerà allo stato di minima energia ovvero riportando l'elettrone al livello d'origine, emettendo a sua volta una radiazione elettromagnetica a bassa frequenza (calore o radiazione infrarossa nei solidi o radiazione luminosa nei gas).

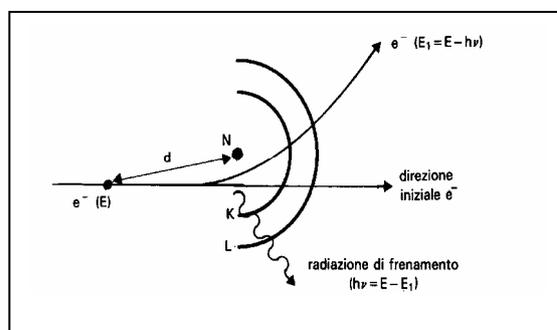
Nel caso in cui l'energia trasferita dall'elettrone incidente è pari o maggiore della energia di legame di un elettrone orbitale al nucleo, l'atomo risulterà ionizzato. Successivamente per la propria natura di ione carico positivamente, l'atomo tenderà a catturare un elettrone libero riacquistando lo stato di neutralità ed emettendo una radiazione elettromagnetica di energia pari a quella di legame detta anche **radiazione caratteristica**.



### 3.2 Radiazione di frenamento

L'elettrone muovendosi liberamente entro la materia può interagire non solo con gli elettroni orbitali ma anche con i nuclei degli atomi costituenti il materiale.

Il processo d'interazione con il nucleo detto anche «**bremstrahlung**» (=frenamento) è un processo d'interazione tra una particella carica in movimento ed il campo elettrico prodotto dal nucleo (carica positiva): nell'interazione la traiettoria dell'elettrone viene curvata per l'attrazione verso il nucleo e nella conseguente decelerazione l'elettrone perde energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. La perdita di energia e quindi l'energia emessa va da 0 ad un massimo corrispondente all'energia cinetica dell'elettrone incidente.

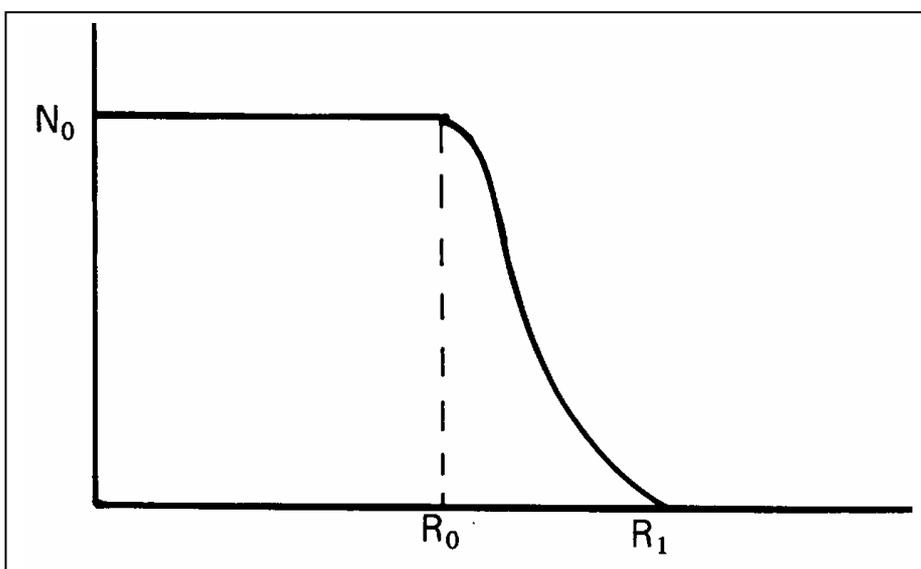


La radiazione di frenamento totale per atomo risulta direttamente proporzionale al numero atomico Z del mezzo assorbente.

### 3.3 Assorbimento della radiazione corpuscolare carica

L'elettrone incidente o elettrone veloce durante il suo cammino all'interno di un dato materiale perde continuamente piccole quantità di energia attraverso questi due tipi di processi, fino a raggiungere lo stato di quiete ed essere catturato da uno ione. La traiettoria risulta tortuosa: quindi per una data energia dell'elettrone e per un dato materiale si usa parlare non di percorso effettivamente compiuto ma della **profondità massima di penetrazione  $R_{\max}$  (= range)** nella materia.

Nel grafico seguente si riporta il tipico andamento del numero di particelle cariche assorbite in un dato materiale. Si osserva come per una profondità minore di un certo valore  $R_0$  non si ha assorbimento (gli elettroni perdono energia ma continuano nel loro cammino); per valori di spessori compresi tra  $R_0$  e  $R_1$  il numero di particelle cariche via via diminuisce fino al completo assorbimento (il processo dell'assorbimento è un fenomeno statistico).



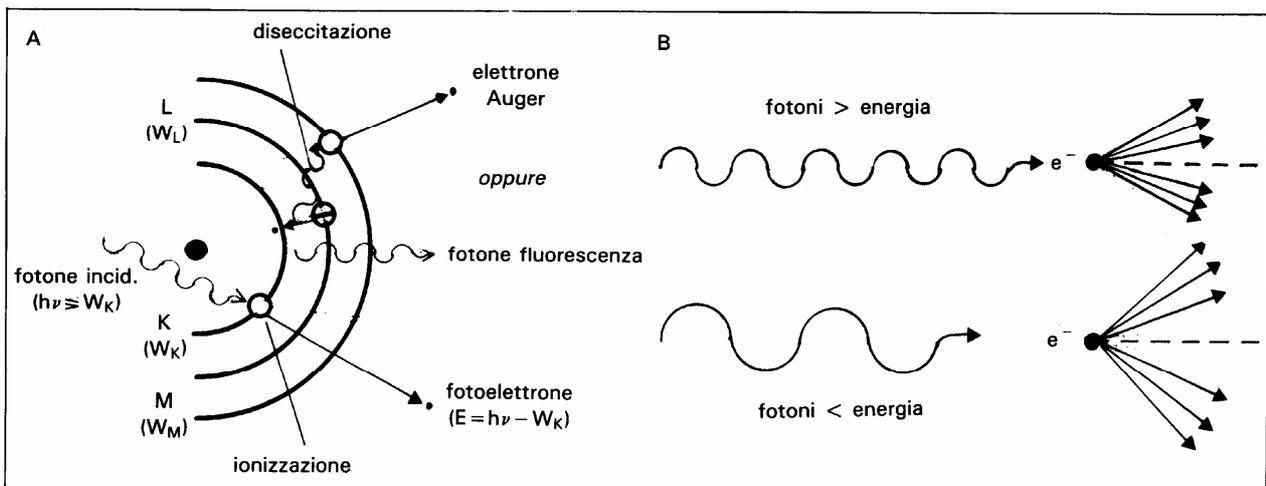
## L'INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

### 4.1 Effetto fotoelettrico

Tra i diversi modi di interazione tra fotoni e materia, 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 (livello K, L ..) 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.



### 4.2 Diffusione classica

A basse energie se il fotone incidente interagisce con gli elettroni orbitali più esterni, caratterizzati da bassi valori di energia di legame, l'effetto è quello tipico di un urto elastico senza assorbimento di energia ma una variazione della direzione di propagazione (o traiettoria) del fotone incidente.

### 4.3 Effetto Compton

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

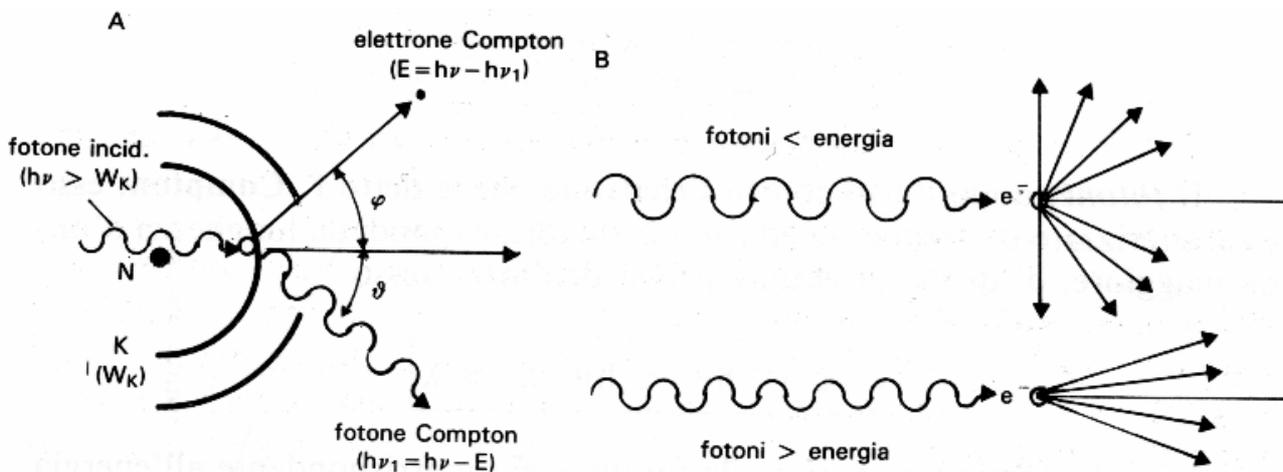
Se il fotone incidente di energia  $h\nu$  interagisce con un elettrone orbitale esterno (considerato «libero» o «debolmente legato»), nell'urto parte della sua energia viene trasferita all'elettrone. L'elettrone è messo in movimento con una certa energia cinetica, mentre il fotone (o «fotone diffuso») cambia direzione di propagazione ed assume una energia minore pari alla differenza tra quella incidente e quella cinetica dell'elettrone. Una energia minore per il fotone diffuso implica una frequenza minore o equivalentemente una lunghezza d'onda maggiore.

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. Per fare un esempio consideriamo due casi limite: *fotoni di energia bassa* (molto inferiore a 0.511MeV) e *fotoni di energia elevata*.

Nel primo caso 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.

Nel secondo caso, 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.



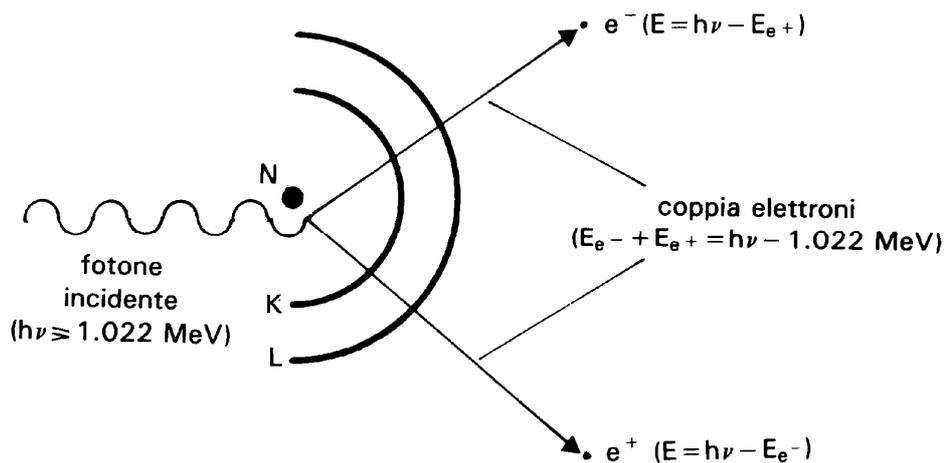
### 4.4 Creazione di coppie

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 (par.3) 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'ASSORBIMENTO DEI FOTONI**

**5.1 Andamento esponenziale dell'assorbimento della radiazione elettromagnetica**

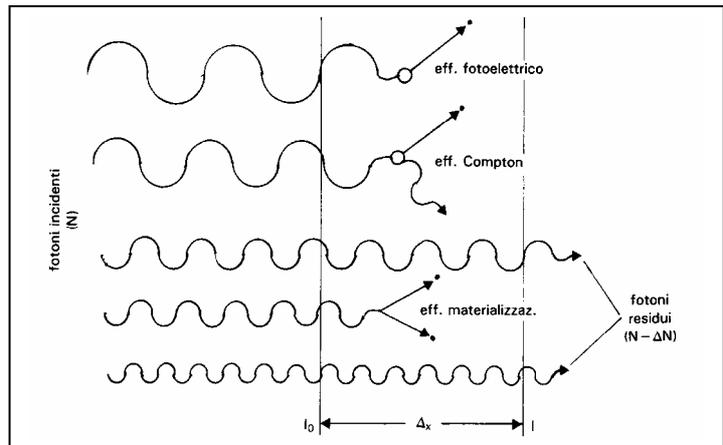
Se un fascio monoenergetico di fotoni (radiazione primaria di  $N_0$  fotoni a energia pari  $h\nu$ ) attraversa un materiale di spessore  $\Delta x$ , un certo numero di fotoni  $\Delta N$  viene rimosso dal fascio per effetto dei processi di interazione descritti nel paragrafo precedente. Variando lo spessore del materiale assorbitore si verifica che la diminuzione del numero di fotoni  $N$  (radiazione primaria attenuata) risulta proporzionale allo spessore di materiale ed al numero iniziale di fotoni secondo la seguente relazione:

$$\Delta N \propto N \Delta x$$

o

essendo  $I$  l'intensità del fascio:

$$\Delta I \propto I \Delta x$$



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

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

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:

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

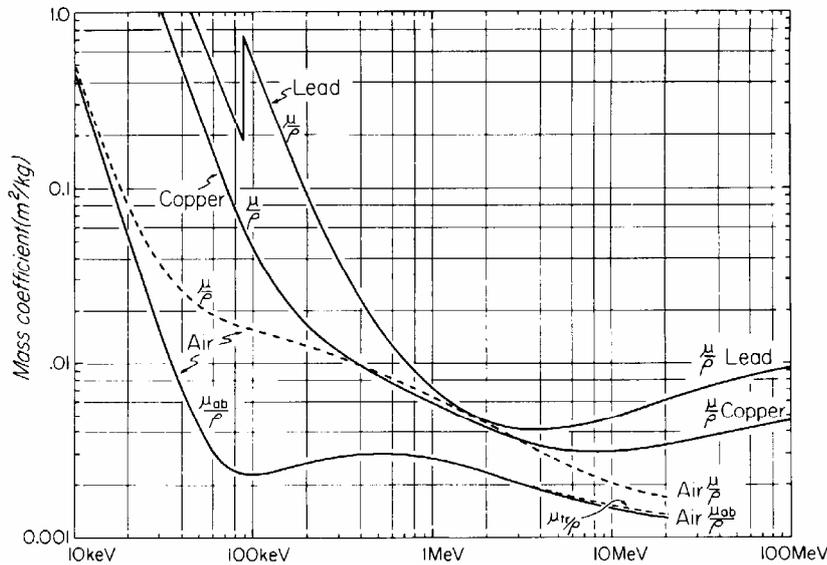
**5.2 Il coefficiente di attenuazione lineare (Energia assorbita ed energia diffusa)**

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  $N$ ).

Il valore di  $\mu$  risulta quindi somma dei coefficienti lineari per i tre principali processi di assorbimento.

In particolare il coefficiente  $\mu$  può essere scomposto in due componenti: **coefficiente di**

**assorbimento**  $\mu_a$  pari alla probabilità che l'energia incidente sia assorbita dagli elettroni secondari prodotti nell'interazione e trasformata in energia cinetica, e **coefficiente di diffusione**  $\mu_d$  pari alla probabilità che l'energia incidente del fotone incidente sia trasformata in energia diffusa dei fotoni secondari (effetto Compton e produzione di coppia).



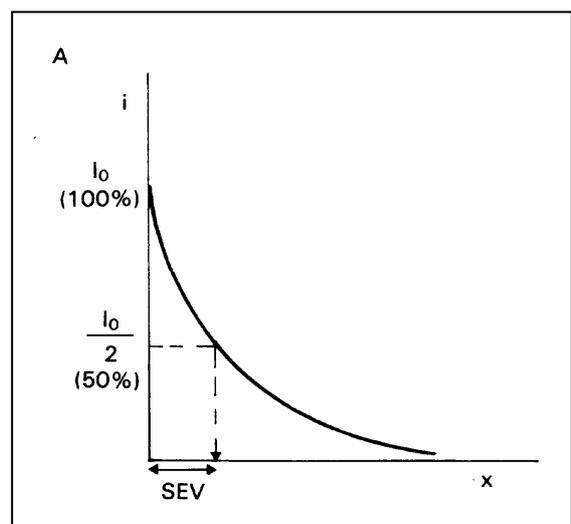
### 5.3 Lo spessore emivalente e l'energia equivalente (potere di penetrazione)

Dato l'andamento esponenziale della legge di assorbimento della radiazione in un dato materiale, risulta significativo definire lo spessore del materiale per cui l'intensità del fascio diminuisce di una certa percentuale.

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.



## 5.4 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**). Per energie basse ( $10\text{keV} < h\nu < 200\text{keV}$ ) e per materiali ad alto Z diventa predominante l'effetto fotoelettrico; a medie ed alte energie ( $200\text{keV} < h\nu < 10\text{MeV}$ ) maggiore è la probabilità dell'effetto Compton per il quale prevale la dipendenza dalla densità elettronica (definita come numero di elettroni per unità di massa) rispetto il numero atomico Z.

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.

**I 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 ( $\approx 0.3 \text{ g/cm}^3$ ).

**Il 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  $0.9 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ .

**Il 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).

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

	COMPOSIZIONE						Numero atomico efficace	Densità	Densità elettronica (el./g · 10 <sup>23</sup> )
	H z=1	C z=6	N z=7	O z=8	P z=15	Ca z=20			
Tessuti molli	10.2	12.3	3.4	73	0.7	0.3	7.60	1.0	3.36
Tessuto adiposo	11.5	77		11.5			6.10	0.9	3.48
Tessuto osseo	6.4	28	2.7	41	7.2	14.7	12	1.2/1.8	3
Acqua	11.1			88.9			7.67	1.0	3.34

## 5.5 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:

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