



Principi di bioingegneria

Lezione 15

Interazione elettromagnetiche con i tessuti biologici

Gabriele Maria Fortunato

gabriele.fortunato@unipi.it

Elementi di fisica dei campi elettromagnetici

Campo elettrico \vec{E} : grandezza fisica attraverso la quale descriviamo una regione dello spazio le cui proprietà sono perturbate dalla presenza di una distribuzione di carica elettrica

$$E = \frac{F}{q} \left(\frac{V}{m} \right)$$

Differenza di potenziale: lavoro compiuto dal campo elettrico sull'unità di carica

$$V_{12} = \int E \cdot ds \quad (\text{V})$$

Corrente elettrica: flusso ordinato di cariche elettriche

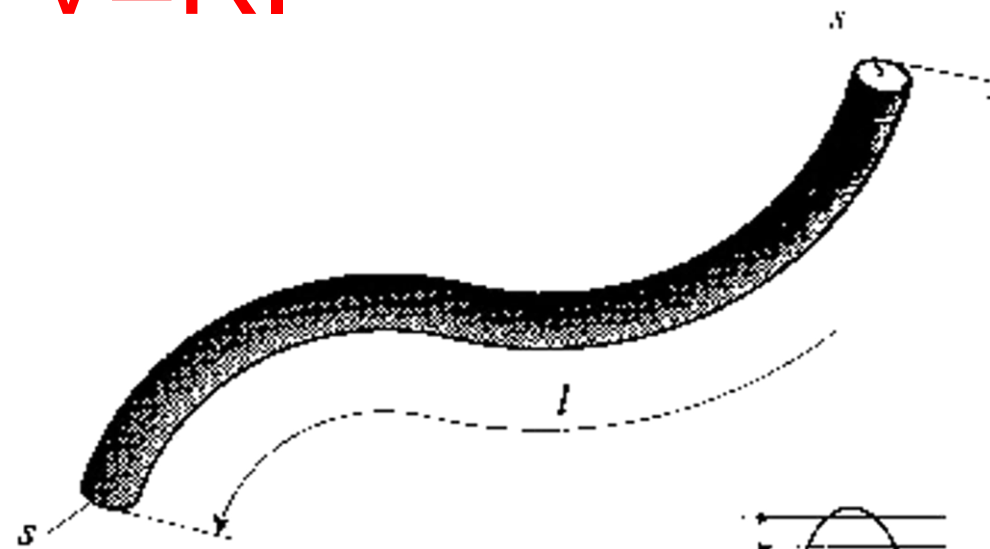
$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (\text{A})$$

Legge di Ohm: $V=RI$

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ } (\Omega)$$

Densità di corrente : $\vec{J} = \frac{i}{S} \hat{n}$

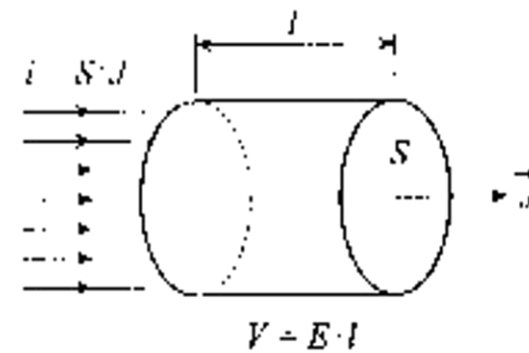
$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$



a)



b)



Effetto Joule: conversione dell'energia elettrica in calore in un conduttore

Potenza: quantità di energia trasferita nell'unità di tempo dal campo elettrico alle cariche in movimento

$$P = i^2 \cdot R = \frac{V^2}{R} \quad (W)$$

Campo magnetico $\vec{H} \left(\frac{A}{m} \right)$: regione dello spazio dove si manifestano forze sui dipoli magnetici e sui conduttori percorsi da correnti elettriche

Induzione magnetica: $\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (T)$

Onde elettromagnetiche:

$$\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

Cos'è la luce?

La Luce: Natura Corpuscolare o Ondulatoria?

- **Natura particellare della luce:** Newton (1642-1727) considerava la luce come un fascio di particelle, capaci, ad esempio, di rimbalzare sulla superficie di uno specchio.
- **Natura ondulatoria della luce:** nella prima metà del XIX secolo fu dimostrata la natura ondulatoria della luce, integrando l'ottica con la teoria elettromagnetica di Maxwell e Boltzmann.

Radiazione elettromagnetica o luce

James C. Maxwell (1831-79) dimostrò che tutte le proprietà note della luce erano spiegabili attraverso un insieme di equazioni

Modello ondulatorio: la luce (o, più in generale, la radiazione elettromagnetica) è formata da onde

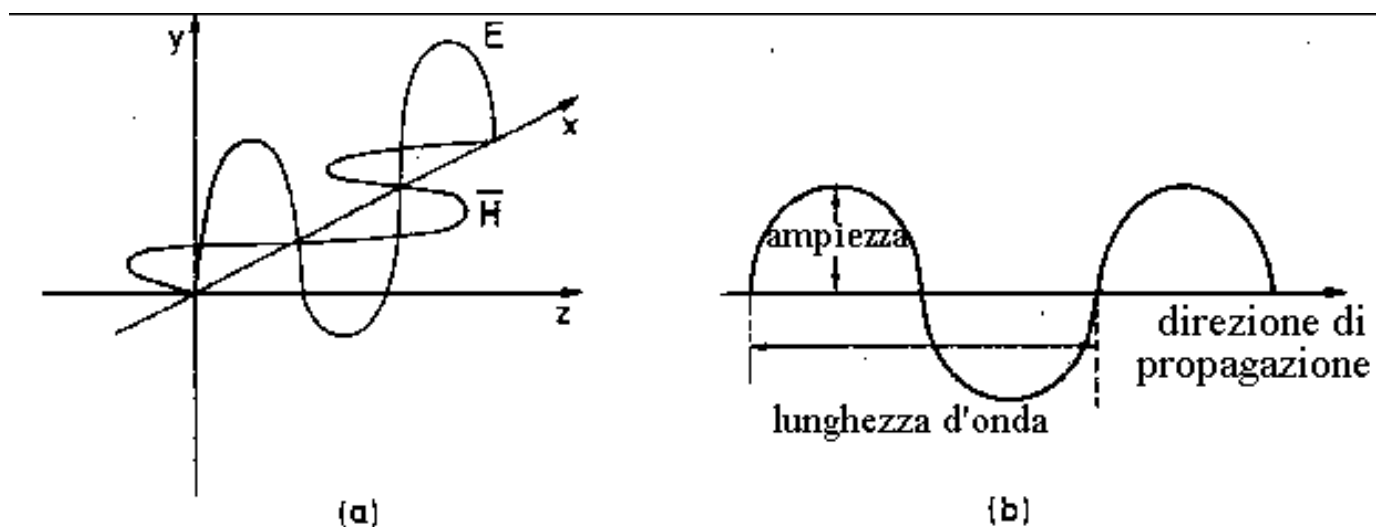
retta con una velocità (c) pari a $2.9979 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ nel vuoto

La radiazione elettromagnetica si propaga nel vuoto a **velocità costante** = velocità della luce (c)

Data un direzione di propagazione esistono un campo elettrico e un campo magnetico ortogonali fra loro e alla

In figura è riportato un esempio di una radiazione in cui il campo elettrico (e quindi il campo magnetico

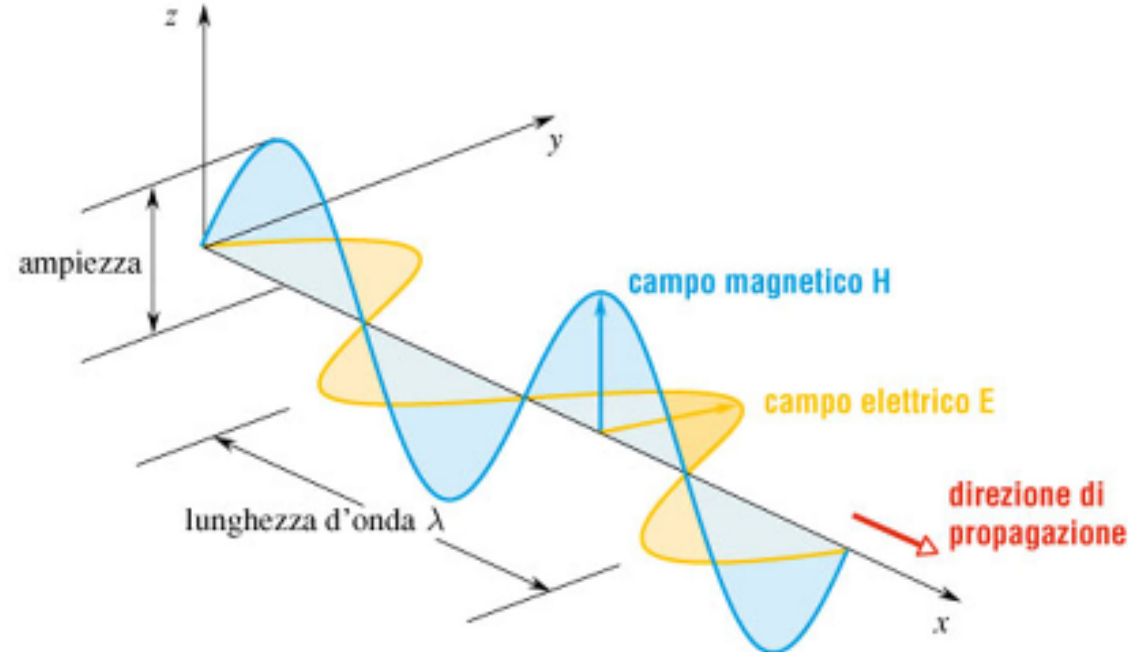
Questo tipo di luce si dice *luce polarizzata* su un piano

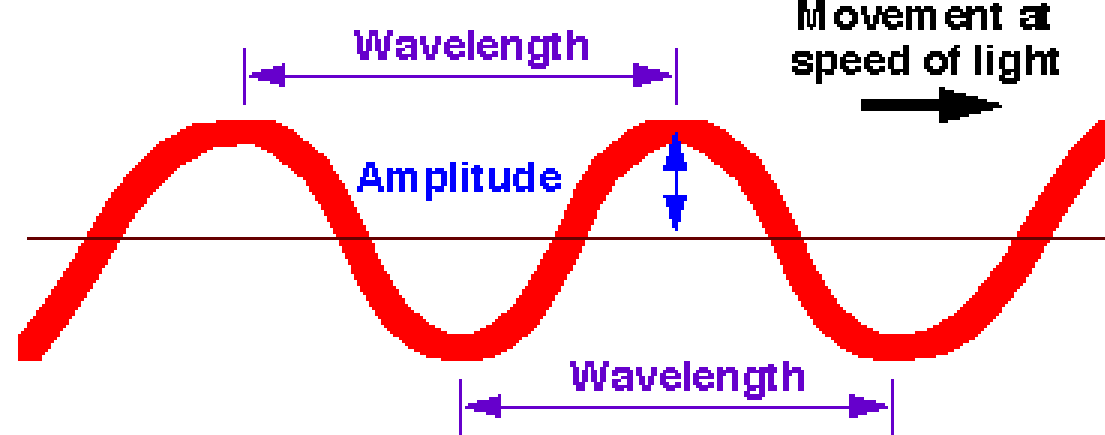


Le intensità dei due campi hanno andamento sinusoidale (onda) in fase fra loro.

La Radiazione Elettromagnetica

- In fisica classica la luce è considerata come consistere di un campo elettrico e un campo magnetico oscillanti (natura ondulatoria della luce).
- L'intensità massima del campo è l'**ampiezza**.
- La distanza tra due massimi è la **lunghezza d'onda**, λ (m)





©1997 Oklahoma Climatological Survey. All rights reserved.

Lunghezza d'onda λ = tratto corrispondente all'intero ciclo di valori del campo

Frequenza n = numero di volte per secondo in cui il campo elettrico assume l'intero ciclo di valori (unità di misura s^{-1})

**Ampiezza A = è il massimo valore assunto dal campo elettrico o magnetico.
L'intensità della radiazione (energia) è proporzionale al quadrato dell'ampiezza**

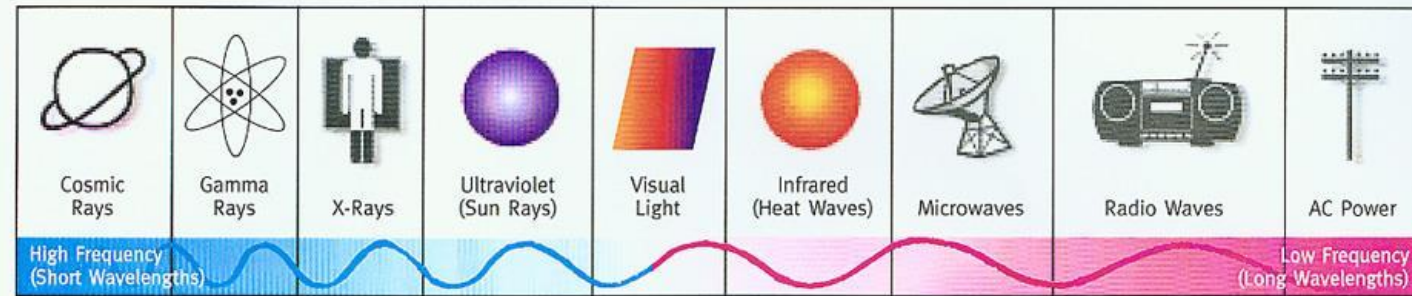
$$n(\text{Hz}) = c (\text{m s}^{-1}) / \lambda (\text{m})$$

Le lunghezze d'onda delle radiazioni elettromagnetiche variano da 10^6 m fino a valori 10^{-6} m .

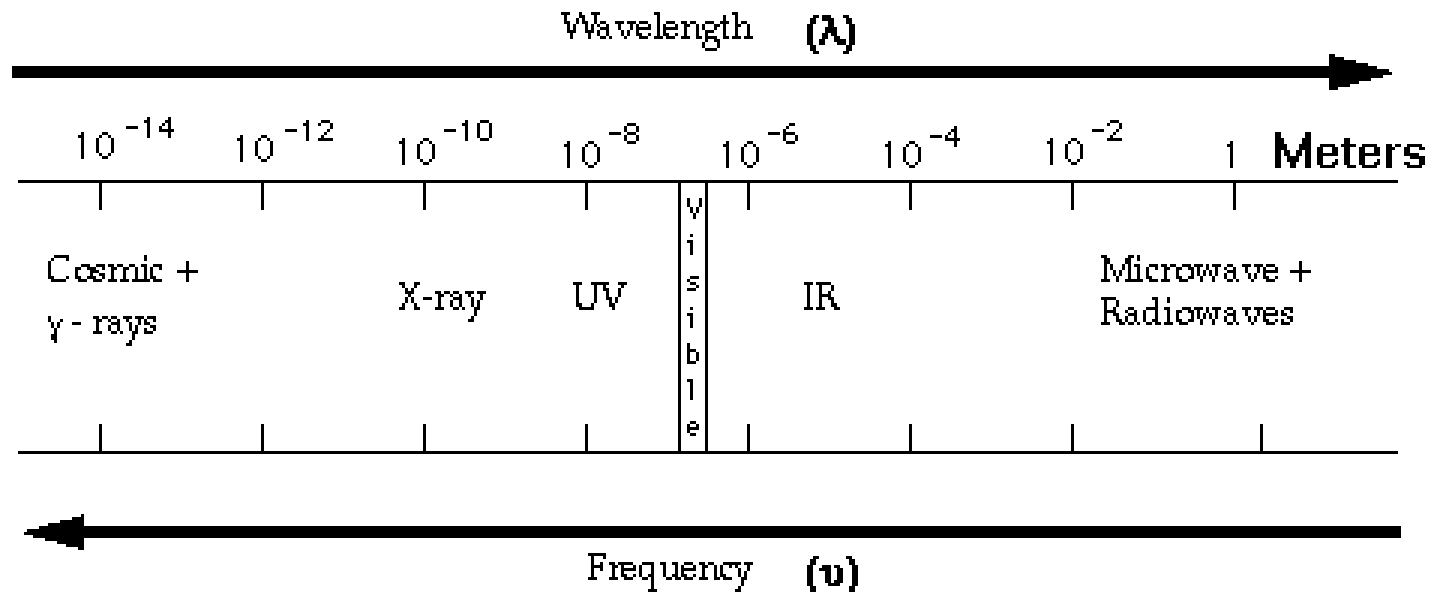
Si dice monocromatica una radiazione che associa un unico valore di λ

L'occhio umano è sensibile solo a radiazioni comprese nell'intervallo $4-8 \times 10^{-7} \text{ m}$.

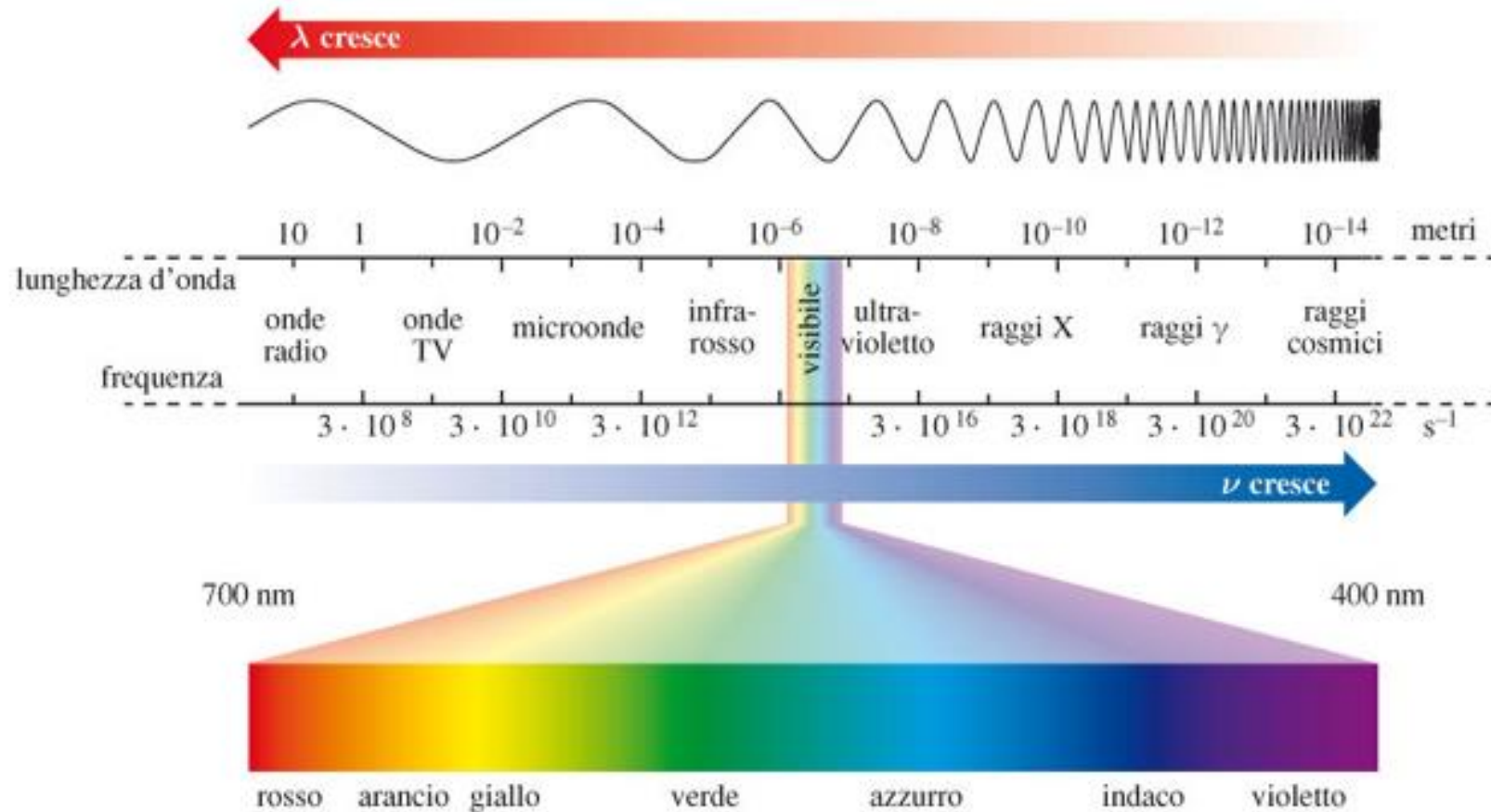
Spettro delle radiazioni elettromagnetiche



by Andreas Kamlowski

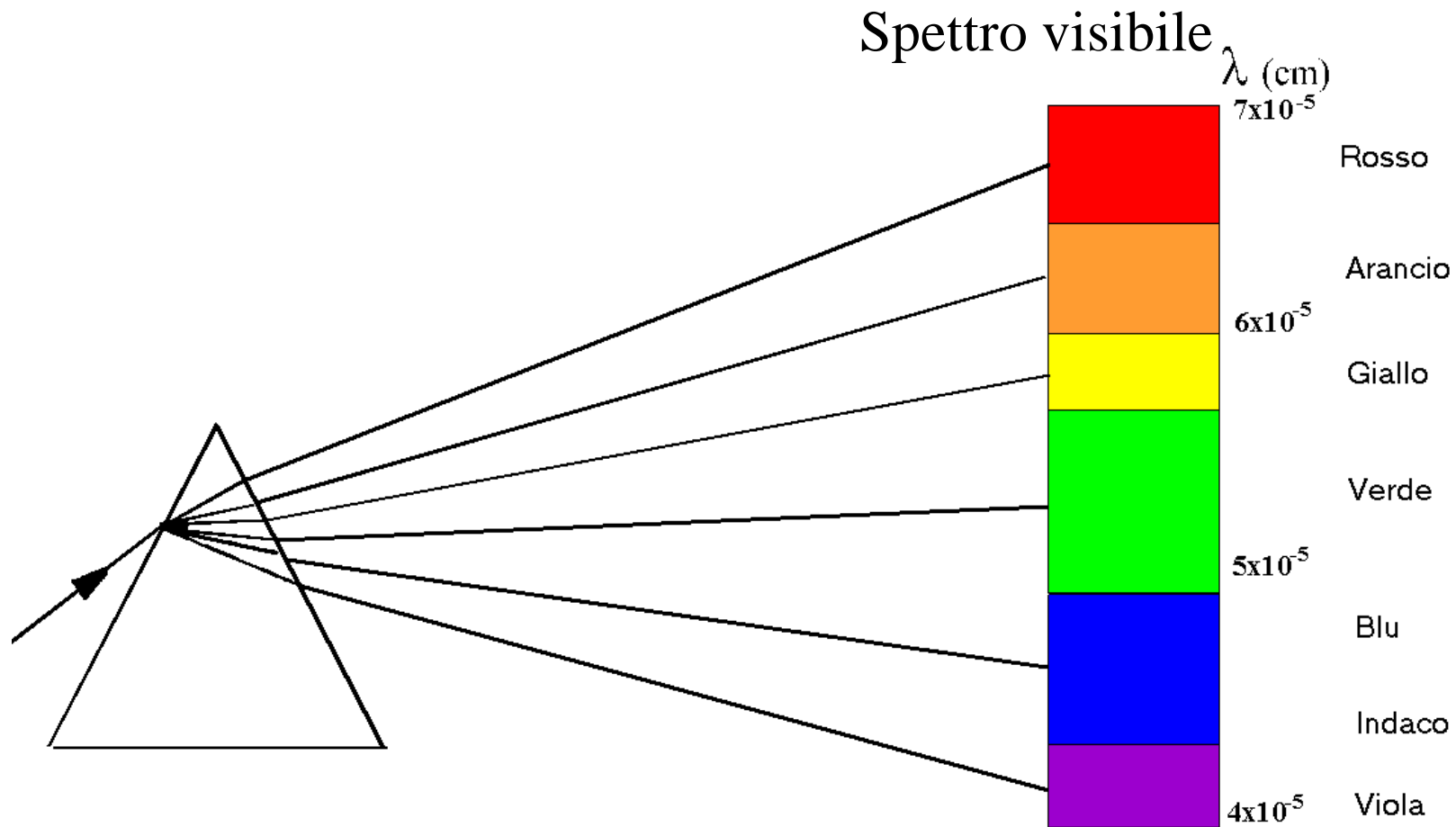


La radiazione elettromagnetica ha diverse denominazioni per diversi intervalli di lunghezze d'onda.



Dispersione della luce visibile da parte di un prisma e spettro della luce.

Dispersione delle componenti di diversa lunghezza d'onda



L'insieme delle radiazioni monocromatiche separate si chiama spettro.

1. Quando la luce attraversa un mezzo denso, come il prisma di vetro, la velocità della luce è leggermente diversa a seconda
2. La luce ha un angolo di rifrazione differente a seconda della velocità del raggio di luce.



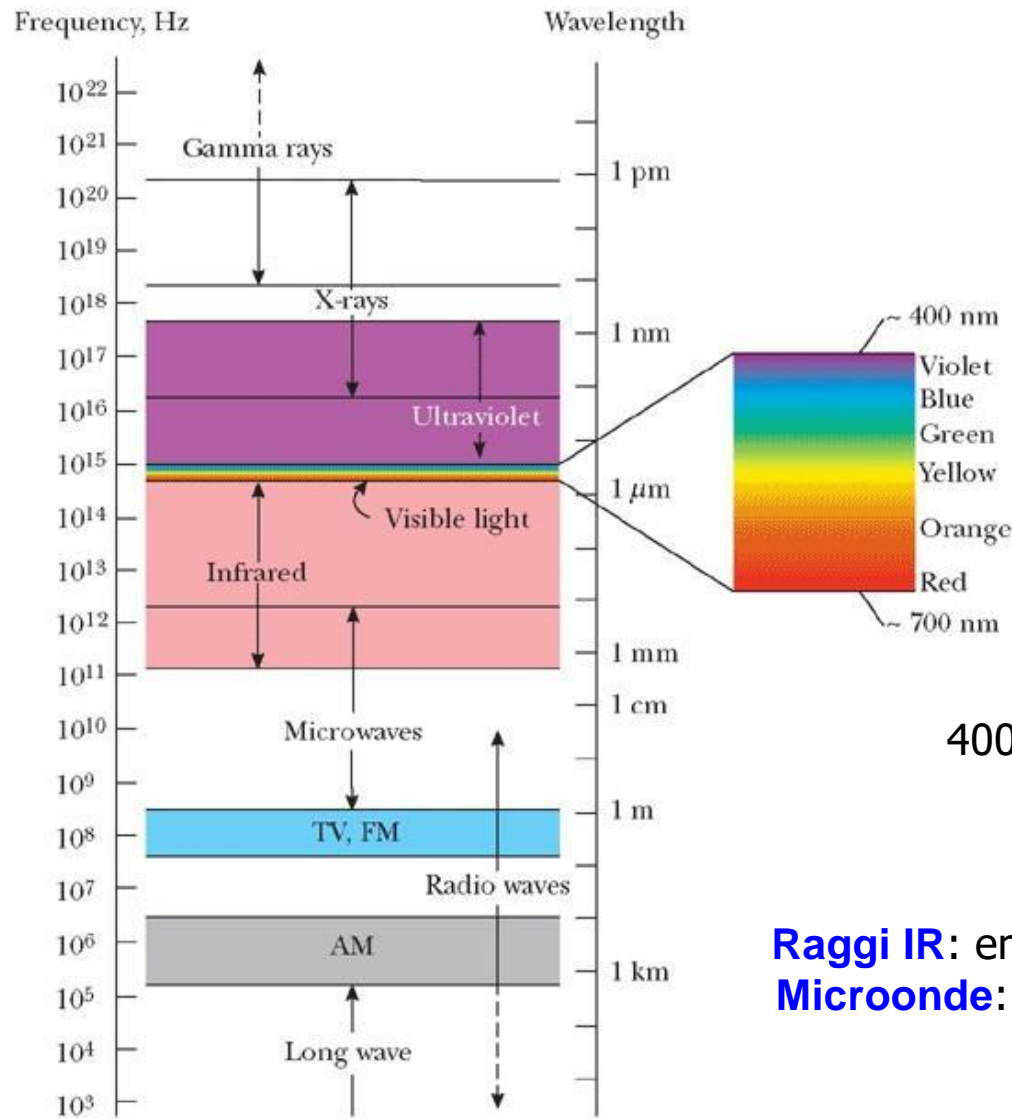
**l'angolo di rifrazione della luce varia a seconda
della lunghezza d'onda.**

seconda della lunghezza d'onda.

Bande frequenziali corrispondenti all'ultravioletto, al visibile e all'infrarosso.

Banda		λ [nm]	ν [THz]
Ultravioletto	UV-C	100 - 280	2997 - 1067
	UV-B	280 - 320	1067 - 934
	UV-A	320 - 390	934 - 769
Visibile	Violetto	390 - 455	769 - 659
	Blu	455 - 492	659 - 610
	Verde	492 - 577	610 - 520
	Giallo	577 - 597	520 - 503
	Arancio	597 - 622	503 - 482
	Rosso	622 - 760	482 - 384
Infrarosso	IR-A	760 - 1400	384 - 214
	IR-B	1400 - 3000	214 - 100
	IR-C	3000 - 10^6	100 - 3

Lo spettro delle onde elettromagnetiche:



Raggi gamma: origine nucleare, λ : 10^{-10} - 10^{-14} m

Raggi X: prodotti tramite la decelerazione di elettroni su un metallo, λ : 10^{-8} - 10^{-13} m (10 nm - 10^{-4} nm)

Raggi UV: emissione dal sole – assorbimento in stratosfera (ozono), λ : 4×10^{-7} - 6×10^{-7} m (400 nm – 0.6 μm)

400 - 430 nm – violetto ; 430 – 485 nm – blu ; 560 – 575 nm – giallo

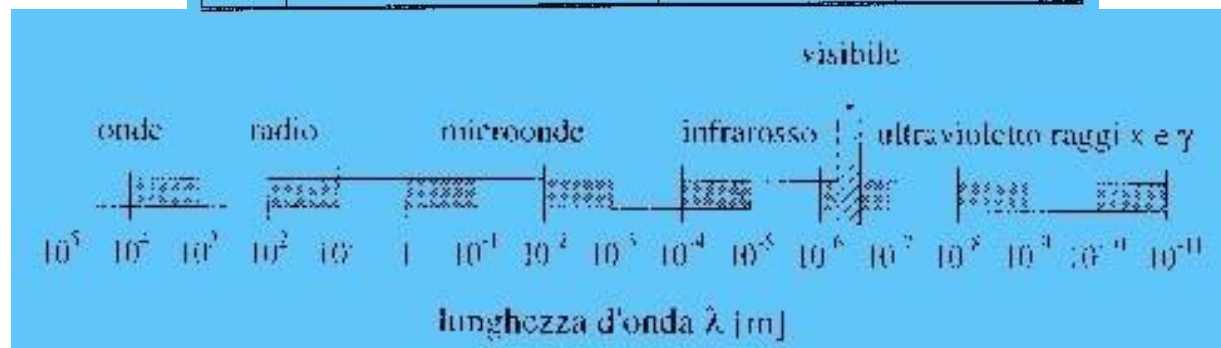
Raggi IR: emessi dai corpi caldi; λ : 700 nm - 1 mm

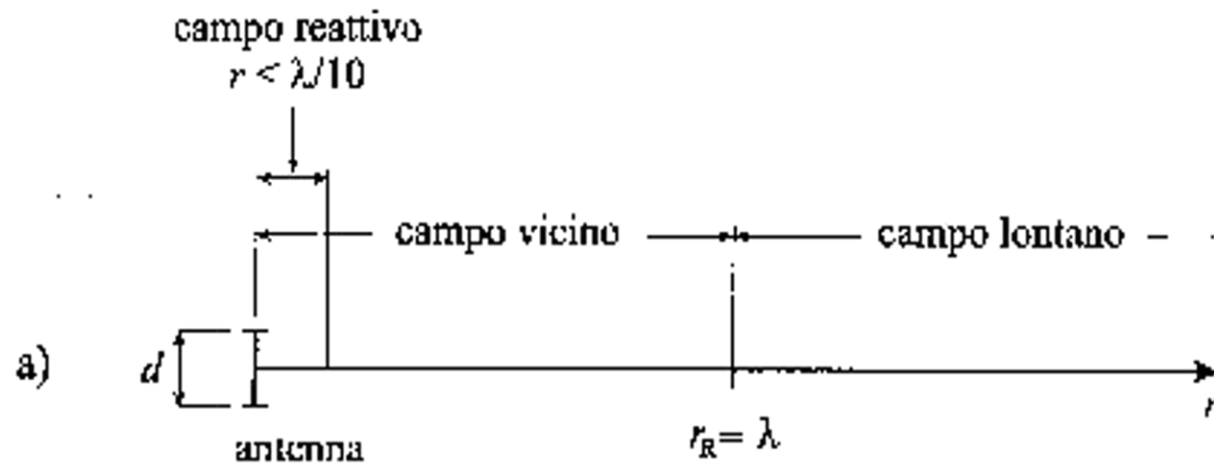
Microonde: λ : 1 mm- 30 cm (es. forni)

Spettro del campo elettromagnetico

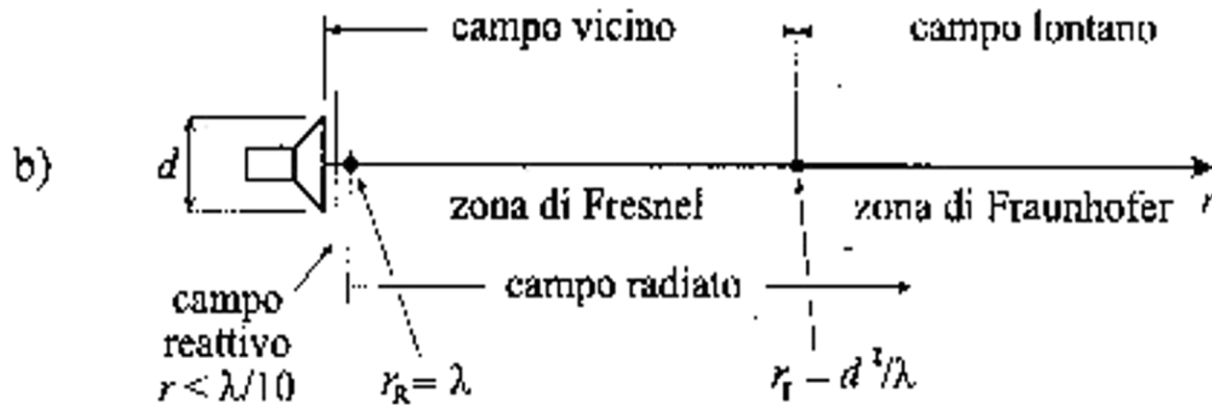
Tabella I-1 - Nomenclatura delle onde radio e microonde

Sigla	Denominazione	Frequenza f	Lunghezza d'onda λ
ELF	frequenze estremamente basse (extremely low frequency)	$< 3 \text{ kHz}$	$0 \div 100 \text{ km}$
VLF	frequenze bassissime (very low frequency)	$3 \div 30 \text{ kHz}$	$100 \div 10 \text{ km}$
LF	frequenze basse o onde lunghe (low frequency)	$30 \div 300 \text{ kHz}$	$10 \div 1 \text{ km}$
MF	medie frequenze o onde medie (medium frequency)	$300 \text{ kHz} \div 3 \text{ MHz}$	$1 \text{ km} \div 100 \text{ m}$
HF	alte frequenze o onde corte (high frequency)	$3 \div 30 \text{ MHz}$	$100 \div 10 \text{ m}$
VHF	frequenze altissime o onde metriche (very high frequency)	$30 \div 300 \text{ MHz}$	$10 \text{ m} \div 1 \text{ m}$
UHF	onde decimetriche (ultra high frequency)	$300 \text{ MHz} \div 3 \text{ GHz}$	$1 \text{ m} \div 10 \text{ cm}$
SHF	Onde centimetriche (super high frequency)	$3 \text{ GHz} \div 30 \text{ GHz}$	$10 \div 1 \text{ cm}$
EHF	Onde millimetriche (extremely high frequency)	$30 \div 300 \text{ GHz}$	$1 \text{ cm} \div 1 \text{ mm}$





Campo reattivo: campo presente vicino la sorgente; dipende dalla distribuzione di cariche e di correnti sulla sorgente, che a loro volta dipendono dalla geometria della stessa e dalle proprietà elettriche dei suoi componenti



Il campo reattivo è confinato nei pressi della sorgente in un volume che si estende fino a distanze dell'ordine di frazioni di λ usualmente $\frac{\lambda}{10}$



Nella zona di campo reattivo, le ampiezze E ed H non sono legate da un rapporto costante, né esiste una maniera semplice di dedurre l'una dall'altra. Il campo elettrico e magnetico hanno configurazioni molto complesse

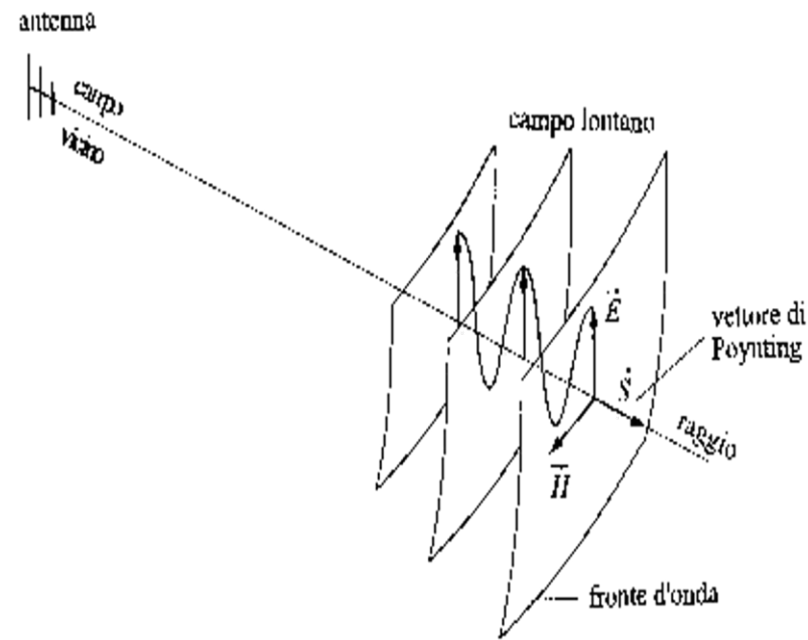
Nella zona di campo vicino se le dimensioni dell'intero sistema radiante sono grandi (rispetto a λ), le onde emesse dai singoli elementi in cui può pensarsi composto il radiatore, arrivano nel punto di osservazione con sfasamenti diversi e danno luogo ad un campo risultante, il quale, a seguito di fenomeni di interferenza può mostrare rapide e rilevanti variazioni di ampiezza in punti tra loro vicini (distanti λ , o meno)

Per quanto riguarda i campi radiativi bisogna distinguere tra zona di campo vicino (zona di Fresnel) e zona di campo lontano (zona di Fraunhofer)



Sia r_l la maggiore delle due quantità $r_r = \lambda$ $r_f = \frac{d^2}{\lambda}$: i punti distanti dalla sorgente più di r_l definiscono la zona di campo lontano mentre quelli a distanza minori di r_l appartengono alla zona di campo vicino

Poter dire di essere nella zona di campo vicino o lontano dipende oltre che dalla distanza r dalla sorgente (o meglio, dal rapporto fra distanza e lunghezza d'onda) anche dalle dimensioni di questa, sempre in rapporto alla lunghezza d'onda.



1. il rapporto tra le ampiezze E ed H è costante $\eta = \frac{E}{H}$
nel vuoto η è circa 377Ω .
2. E , H e la direzione di propagazione costituiscono una terna destrorsa
3. L'intensità di un'onda sferica decresce come $\frac{1}{r^2}$ all'aumentare di r
4. E ed H decrescono come $\frac{1}{r}$

Meccanismi di interazione

Gli organismi viventi esposti ai campi EM interagiscono con essi assorbendone energia.

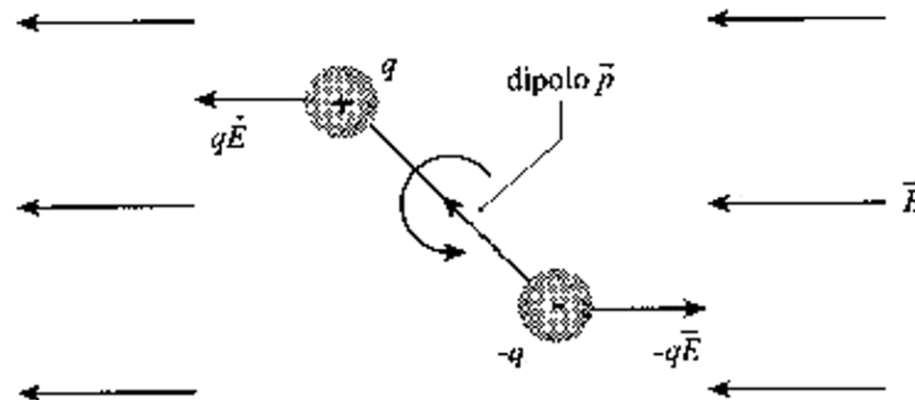
σ (conducibilità): parametro che caratterizza un materiale come conduttore di elettricità.

Materiale	Conducibilità [S/m]	Materiale	Conducibilità [S/m]
Argento	6.1×10^7	Acqua di mare	4
Rame	5.8×10^7	Acqua dolce	10^{-3}
Alluminio	3.5×10^7	Acqua distillata	2×10^{-4}
Ottone	1.5×10^7	Vetro	$10^{-11} - 10^{-14}$
Piombo	4.8×10^6	Mica	$10^{-11} - 10^{-15}$

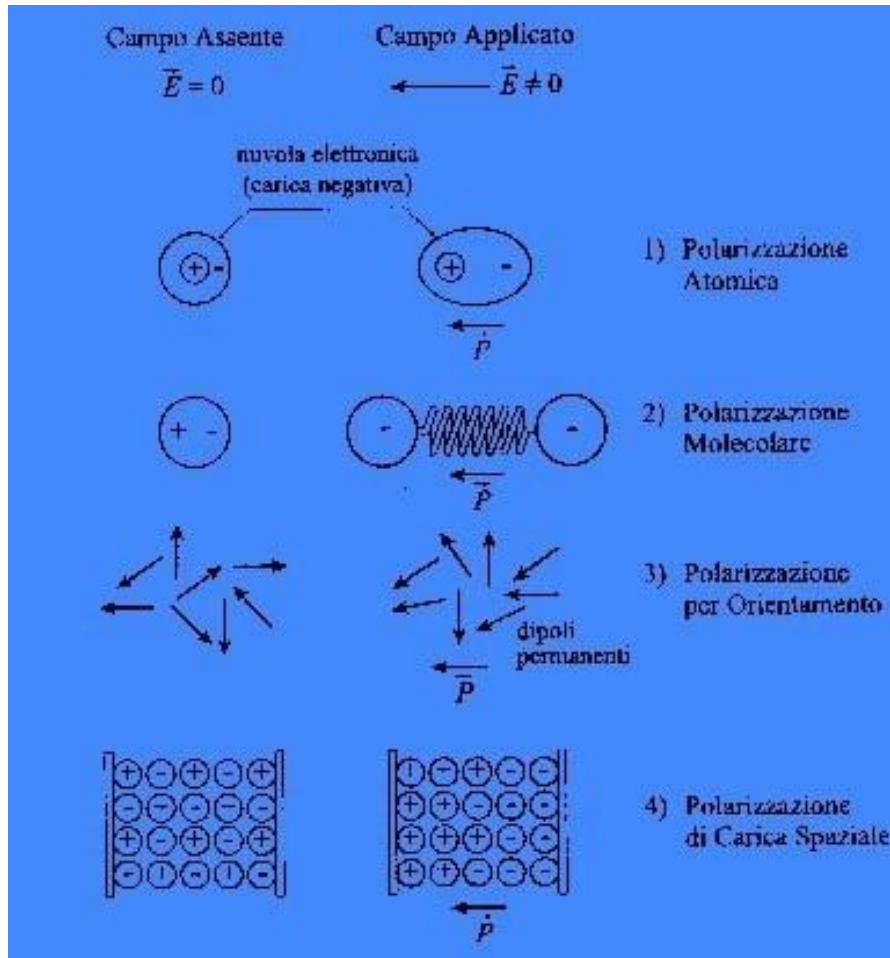
Momento di dipolo: $\vec{p} = qd$

I dipoli possono risultare dall'applicazione di un campo elettrico oppure possono preesistere all'applicazione del campo

In presenza di campo elettrico i dipoli permanenti tendono a disporsi parallelamente ad esso



Altro meccanismo è la polarizzazione di carica spaziale dovuto alla presenza di ostacoli (quali membrane isolanti, barriere di potenziale) che si oppongono al libero fluire dei portatori di carica all'interno del materiale



$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{E}$$

χ *Esprime il contributo dei dipoli alla costante dielettrica*

Corrente di conduzione dovuta ai dipoli \rightarrow

$$J_d = \omega \epsilon_0 \epsilon_r E$$

Impieghi della radiazione elettromagnetica in **campo biomedico**

Le radiazioni elettromagnetiche appartenenti a differenti bande frequenziali trovano diverse tipologie di impieghi in campo biomedico. Si citano di seguito alcuni esempi:

- **Raggi γ :** data la loro alta frequenza, sono le radiazioni più energetiche tra quelle usate in medicina e si prestano per la *sterilizzazione* di strumenti e per scopi *terapeutici*, specialmente in oncologia, dove si usano per bombardare selettivamente tessuti tumorali. Hanno anche impieghi *diagnostici* nel campo della medicina nucleare. Infatti, utilizzando *isotopi radioattivi* è possibile

e *scintillatori* in grado di convertire la radiazione γ in visibile per essere analizzata.

- **Raggi X:** sono usati in diagnostica per ottenere immagini radiografiche, nonché rappresentazioni di sezioni corporee mediante sistemi TAC (Tomografia Assiale Computerizzata).

Raggi X e raggi gamma

Radiazioni molto penetranti e potenzialmente pericolose per l'uomo



Raggi X: lunghezze d'onda comprese tra 10^{-8} m e 10^{-11} m

Applicazioni: radiografie (raggi X passano attraverso tessuti molli, ma sono arrestati dalle ossa), struttura delle molecole

Raggi gamma: lunghezze d'onda minori di 10^{-12} m

Sono prodotti da sostanze radioattive e reazioni nucleari, acceleratori

Applicazioni: radioterapia, sterilizzazioni

Impieghi della radiazione elettromagnetica in **campo biomedico**

Radiazione ottica: un uso comune di tale radiazione è quello *analitico* negli *spettrofotometri*. Inoltre, ciascuno dei tre gruppi costituenti la radiazione ottica

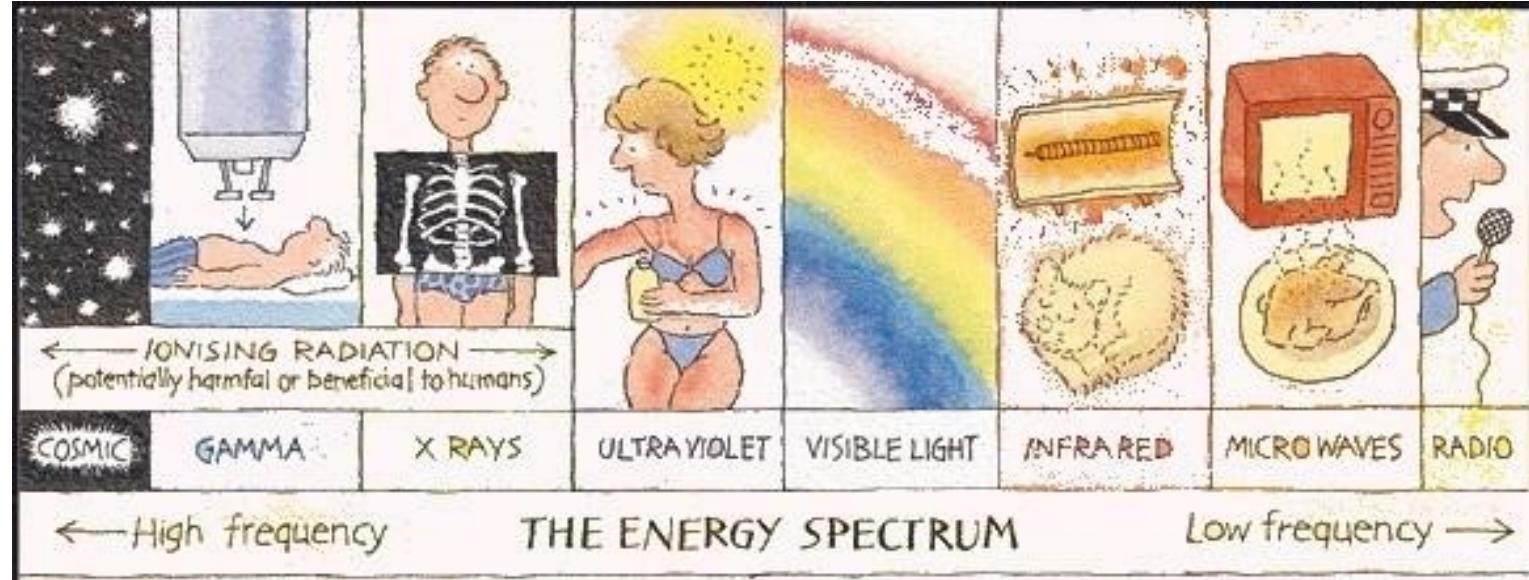
applicazioni *terapeutiche*, ad esempio in *Laser* medici o in *trattamenti di precisione*. Nel secondo caso, si usano molecole fotolabili all'UV per trasportare sostanze chimiche (ad esempio farmaci) su piste metaboliche; una volta giunte a destinazione, le molecole sono irraggiate con UV per liberarne il

costituito una delle fonti principali di informazione per la diagnostica medica fino a pochi decenni fa. Da un'analisi cromatica del corpo umano, ad esempio della pelle (*melanina*), del sangue (*emoglobina*) o dell'*urina*, si possono trarre numerose informazioni.

L'**infrarosso** è ampiamente usato sia per fini *diagnostici*, ad esempio nella *termografia ad infrarosso* o nell'*ossimetria ottica*, sia per fini *terapeutici*, ad esempio per la *fotocoagulazione*.

Radiazione a radiofrequenza: tali radiazioni sono utilizzate per fini *terapeutici*, ad esempio per ablazioni a radiofrequenza.

Le radiazioni ionizzanti



Quando una radiazione è in grado di produrre ionizzazione (rimozione di elettroni da atomi o molecole con la conseguente creazione di ioni) degli atomi e delle molecole del mezzo attraversato.

Perché la radiazione sia ionizzante i quanti della radiazione devono avere energia sufficiente per strappare un elettrone dall'atomo con il quale interagiscono. Energie dell'ordine di qualche decina di eV ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) sono sufficienti per produrre ionizzazione.

Radiazioni non ionizzanti

Per frequenze ≤ 300 GHz l'interazione dei campi EM con i sistemi materiali non può produrre variazioni permanenti di struttura atomica o molecolare perché il valore del salto energetico ΔE_s necessario è di gran lunga superiore all'energia del fotone ($hf = 1.2 \times 10^{-3} \text{ eV}$). Quello che si può ottenere è l'eccitazione degli stati traslazionali, rotazionali e al limite, vibrazionali delle particelle.

Fenomeno	Energia di attivazione (eV)	Frequenza corrispondente (HZ)
Rottura del legame idrogeno	0.08-0.2	23×10^{13} - 4.8×10^{13} IR
Cambio reversibile di conformazione delle proteine	0.4	10^{14} IR
Rottura del legame covalente	5	1.2×10^{15} UV
ionizzazione	10	2.4×10^{15} UV

Proprietà dielettriche dei tessuti umani

La definizione di costante dielettrica relativa complessa può essere fatta discendere dall'equazione di Ampere-Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

dove \vec{J} è la densità di corrente di cariche libere e \vec{D} la densità di flusso elettrico. Sotto le seguenti ipotesi:

1. Il materiale con cui si ha a che fare deve essere un dielettrico (eventualmente) con perdite, condizione verificata da tutti i tessuti biologici.
2. Non devono essere presenti correnti elettriche impresse
3. Si deve essere in regime armonico sinusoidale

L'equazione precedente può essere scritta nella forma

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\epsilon_0\hat{\epsilon}\vec{E}$$

Materiali dielettrici senza perdite

$$\sigma = 0 \quad \vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} \quad \widehat{\varepsilon} = \varepsilon (= \varepsilon - j0)$$

Materiali dielettrici con perdite ohmiche

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} \quad \widehat{\varepsilon} = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$$

Materiali con perdite dielettriche

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi e^{-j\psi} \vec{E} = \varepsilon_0 \chi (\cos \psi - j \sin \psi) \vec{E}$$

$$\varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 [1 + \chi (\cos \psi - j \sin \psi)] \vec{E} = \varepsilon_0 (\varepsilon - j \varepsilon^*) \vec{E}$$

$$\varepsilon = 1 + \chi \cos \psi \quad \varepsilon^* = \chi \sin \psi$$

$$\widehat{\varepsilon} = \varepsilon - j \varepsilon^*$$

Materiali con perdite dielettriche e ohmiche

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega\epsilon_0(\epsilon - j\epsilon^*)\vec{E}$$

$$\hat{\epsilon} = \epsilon - j\left(\epsilon^* + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right)$$

Proprietà dielettriche primarie

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\frac{\varepsilon}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma_1^2}{\omega^2 \varepsilon^2 \varepsilon_0 \varepsilon^2}} \right]}}$$

Andamento della
lunghezza d'onda
della radiazione EM
nel mezzo materiale

$$\delta = \frac{c}{\omega \sqrt{\frac{\varepsilon}{2} \left[1 + \frac{\sigma_1^2}{\omega^2 \varepsilon^2 \varepsilon_0 \varepsilon^2} - 1 \right]}}$$

Profondità di
penetrazione

Caratteristiche elettriche dei tessuti biologici

Al posto della conducibilità elettrica vengono usate due quantità ad essa proporzionali

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$$

fattore di
perdita

$$\tan \alpha = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon_r} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}$$

tangente di
perdita

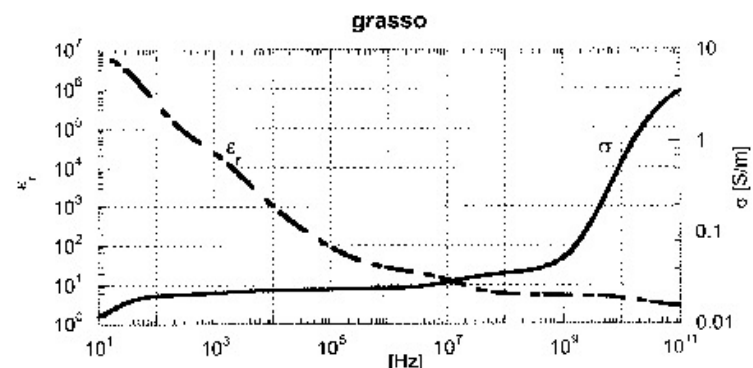
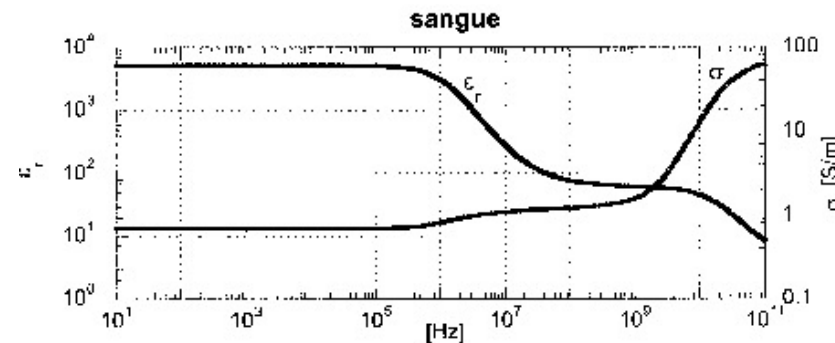
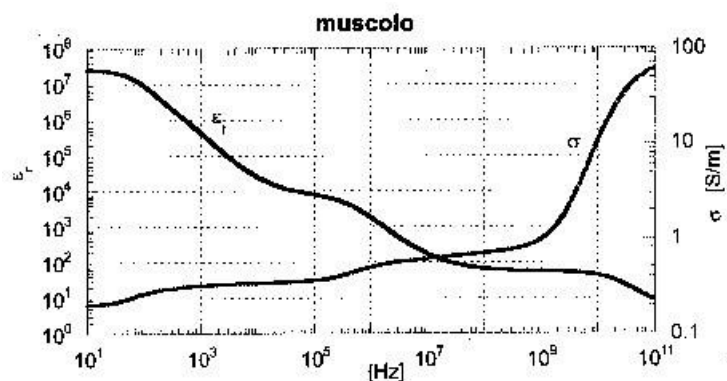
Nei tessuti biologici, l'elemento di maggior significato per le loro proprietà elettriche è l'acqua che costituisce il 70% del peso del corpo umano. È logico quindi che le caratteristiche elettriche dei vari tessuti biologici siano perfettamente correlate con la percentuale di acqua in essi contenuta.



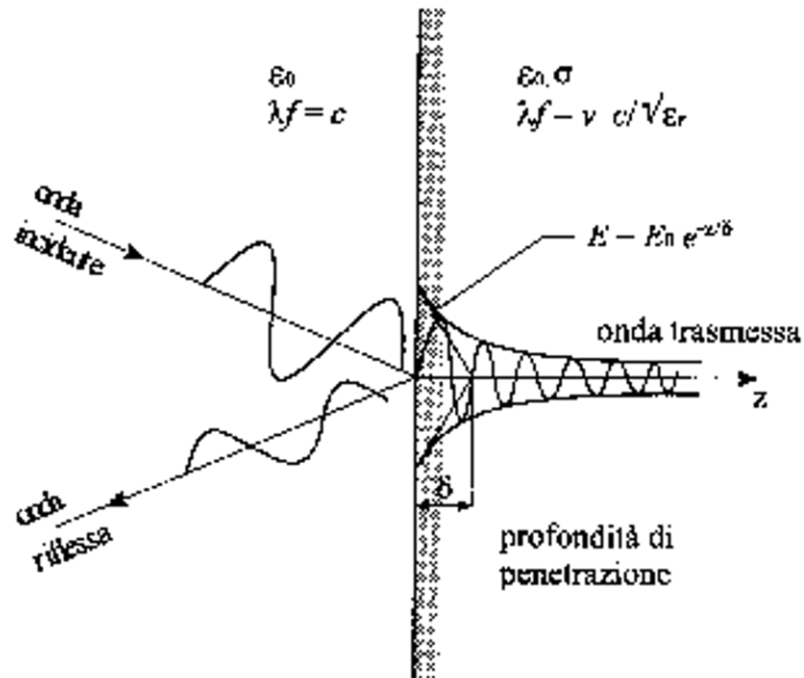
Possiamo classificare i tessuti biologici in:

1. Tessuti ad altissimo contenuto di acqua (**90% o più di acqua**): sangue , liquido cerebrospinale e altri liquidi organici.
2. Tessuti ad alto contenuto di acqua (**circa l'80% di acqua**) : pelle, muscolo, cervello, e organi interni, quali reni fegato milza ecc.
3. Tessuti a basso contenuto di acqua (**acqua circa 50% e meno**): grasso, tendini e ossa.

L'andamento di ϵ_r e di σ del tessuto muscolare sono, a pari frequenza, più elevate di circa un ordine di grandezza rispetto a quelle del tessuto adiposo.



Questo comportamento è conseguenza del fatto che, i fenomeni di polarizzazione e di conduzione sono fortemente determinati dal contenuto di acqua e che il tessuto muscolare ha una percentuale di acqua molto maggiore di quella presente nel tessuto adiposo.



Quando un'onda EM incide sull'interfaccia fra due mezzi materiali di caratteristiche elettromagnetiche diverse, una parte dell'energia viene riflessa mentre l'altra trasmessa. Se il mezzo è un materiale con perdite, l'onda, mentre si propaga, cede una parte della sua energia e si attenua.

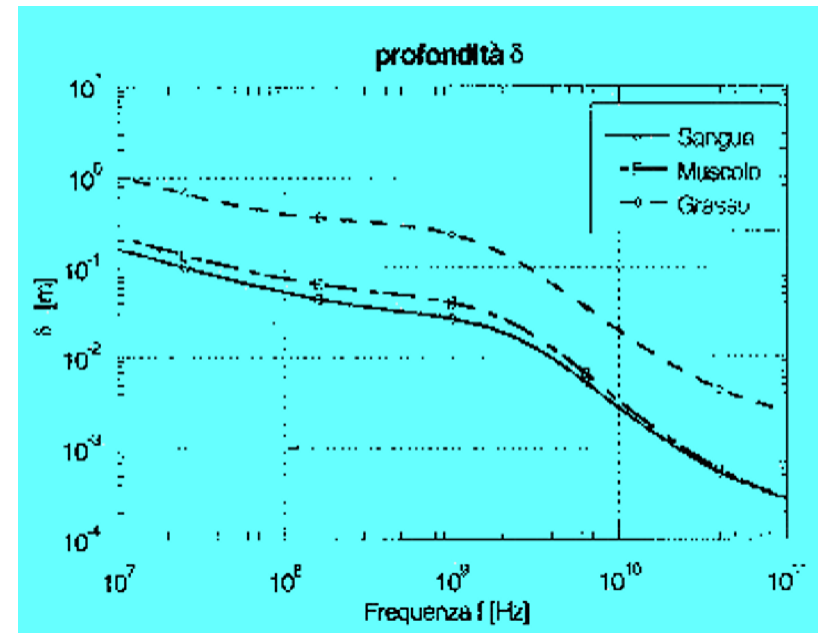
La potenza trasportata dall'onda decresce esponenzialmente secondo la legge:


$$S(z) = S_0 e^{-\left(2\frac{z}{\delta}\right)}$$

in cui S_0 rappresenta la densità di potenza iniziale (cioè, alla coordinata 0) dell'onda che penetra nel mezzo materiale

A parte le altissime frequenze (intorno e sopra i 10 GHz), per le quali la penetrazione è scarsissima, l'onda propagandosi nel mezzo materiale, può arrivare alla superficie di separazione fra i tessuti di natura diversa e venire riflessa. Arrivando dall'esterno l'onda incontra vari tipi di tessuto, tipicamente si ha: pelle, grasso, muscolo ed eventualmente tessuto osseo. Possono verificarsi variazioni di intensità alle varie interfacce. Le onde incidente e riflessa, sovrapponendosi possono dar luogo a fenomeni complessi di interferenza ai quali possono accompagnarsi assorbimenti concentrati in corrispondenza ad alcune interfacce. Alcuni strati possono risultare di spessore tale da provocare fenomeni di risonanza a frequenze particolari.

$$\delta = \frac{c}{\omega \sqrt{\frac{\epsilon}{2} \left[1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2 \epsilon_0^2} - 1 \right]}}$$





La dosimetria quantifica l'interazione tra un campo elettromagnetico e un corpo biologico ad esso esposto.

Il problema della dosimetria dei campi EM non ionizzanti consiste nella:

quantificazione della potenza assorbita da un organismo biologico immerso in un campo EM;


determinazione della distribuzione di tale potenza nell'organismo esposto.

Il problema della dosimetria può essere ricondotto al calcolo di un parametro riassuntivo denominato SAR (specific absorption rate), che esprime la potenza per unità di massa ed è dato dalla seguente espressione:

$$SAR = \frac{1}{2\rho} \sigma E^2 \quad \frac{W}{Kg}$$

SAR

$$SAR_m = \frac{1}{V} \int \frac{\sigma(x, y, z)}{2\rho(x, y, z)} E^2(x, y, z) dV$$



IL SAR medio è un parametro di particolare importanza, in quanto è ciò che viene misurato sperimentalmente. Esso fornisce la quantità di calore rilasciata dal corpo e dà quindi un'idea della sollecitazione termica a cui l'organismo è sottoposto.

La crescita della temperatura risultante da un dato termico non è legata soltanto alla potenza assorbita: essa dipende dai meccanismi fisiologici di termoregolazione e dalle condizioni psicometriche (temperatura ambiente ecc.) e quindi non è semplicemente proporzionale al SAR medio

non esiste un legame semplice tra densità di potenza incidente e potenza assorbita : la conoscenza dell'intensità e della polarizzazione del campo esterno non danno informazione diretta sugli stessi parametri relativi al campo interno.

I risultati della sperimentazione animale non sono direttamente utilizzabili per l'uomo in quanto, la configurazione di campo interno dipende fortemente dalla forma e dalle dimensioni dell'oggetto assorbitore.

In tal caso sono stati sviluppati materiali sintetici che simulano i tessuti biologici per quanto concerne l'assorbimento di energia EM.

Appare evidente quindi, la necessità di realizzare modelli teorici che consentano di legare il campo generato all'interno di un oggetto biologico al campo EM incidente e alle caratteristiche fisico-geometriche dell'oggetto stesso, così da poter effettuare previsioni di assorbimento ed estrapolazioni di dati raccolti nella sperimentazione sugli animali.

Effetti biologici e effetti sanitari

i campi elettromagnetici possono indurre **effetti biologici** che in alcuni casi possono portare ad **effetti di danno alla salute**

è importante comprendere la differenza tra i due effetti

- un **effetto biologico** si verifica quando l'esposizione provoca qualche variazione fisiologica notevole o apprezzabile in un sistema o organo
- un **effetto di danno alla salute** si verifica quando l'effetto biologico è al di fuori dell'intervallo in cui l'organismo può normalmente compensarlo, e ciò porta a qualche condizione di detrimento della salute

Organizzazione Mondiale della Sanità - Progetto Internazionale CEM
Promemoria n. 182 - Proprietà fisiche e effetti sui sistemi biologici
www.who.int/peh-emf

Linee guida

- **ICNIRP** (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection)
- riconoscimento ufficiale dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), dell'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (International Agency for Research on Cancer, IARC), e dell'Unione Europea
- vengono presi in considerazione tutti gli effetti per i quali la letteratura scientifica fornisca basi razionali per la definizione un sistema di protezione


Effetti biologici dei campi elettromagnetici

Rispetto al campo elettrico i tessuti biologici possono comportarsi come conduttori o come dielettrici, a seconda della frequenza dei campi, della conducibilità e della costante dielettrica che li caratterizza;

fino a 100KHz i tessuti possono essere considerati come buoni conduttori;

fino a tali frequenze il campo elettrico non penetra significativamente all'interno dei tessuti e l'organismo esposto si comporta come un oggetto omogeneo perfettamente conduttore sulla superficie del quale viene indotta una distribuzione di carica elettrica;


La variazione nel tempo di tale distribuzione genera la presenza di correnti elettriche all'interno del corpo umano la cui densità è proporzionale alla frequenza e all'ampiezza del campo elettrico



La quantità e la distribuzione di energia elettromagnetica assorbita da un organismo dipendono da numerosi fattori quali:

1. Caratteristiche del campo di radiazioni (intensità, potenza, polarizzazione);
2. Orientamento e dimensioni geometriche del corpo;
3. Proprietà dei tessuti investiti dall'onda.

Per quanto riguarda l'interazione dei campi RF e MF, i materiali biologici possono essere considerati come materiali dielettrici omogenei con perdite



Sotto l'azione del campo EM le molecole dotate di un momento di dipolo elettrico tendono ad orientarsi nella direzione del campo elettrico, mentre quelle dotate di un momento magnetico tendono ad orientarsi come il campo magnetico

Essendo il campo EM oscillante i dipoli elettrici e magnetici sono sottoposti a vibrazioni forzate.

Il massimo assorbimento di energia nel tessuto si ha quando il campo oscilla con la stessa frequenza naturale dei dipoli.

L'energia di rotazione e vibrazione acquistata dalle molecole si converte in energia termica riscaldando il tessuto irradiato.

Campi elettromagnetici ad alta frequenza

Per quanto riguarda l'interazione del corpo umano dei campi $1\text{MHz} < f < 10\text{GHz}$ essa consiste nell'assorbimento dell'energia elettromagnetica. Tale energia viene dissipata sotto forma di calore. Questo riscaldamento indotto nei tessuti può provocare effetti legati alla termoregolazione:

Riduzione delle capacità mentali o fisiche

Influenzare lo sviluppo fetale e la fertilità maschile

Indurre cataratta

Per campi $f > 10\text{GHz}$ i campi EM vengono assorbiti dalla superficie della pelle; perché si verifichino danni occorre una densità di potenza $> 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ valori presenti nelle immediate vicinanze dei radar dove però è vietata la presenza di persone

I principali fattori che influiscono sull'assorbimento dell'energia e sulle risposte biologiche sono per quanto riguardano i parametri della sorgente elettromagnetica :

Frequenza

Polarizzazione

Densità di potenza

Situazione di campo (vicino o lontano)

Potenza

Per quanto riguarda i
parametri biologici:

Età e sesso

Condizioni di salute

Proprietà dielettriche del tessuto
dimensioni

Per quanto riguarda i
parametri ambientali:

Durata di esposizione

Esposizione parziale o a
corpo intero

Superfici riflettenti
circostanti

Le principali sorgenti di campi EM ad alta frequenza sono:

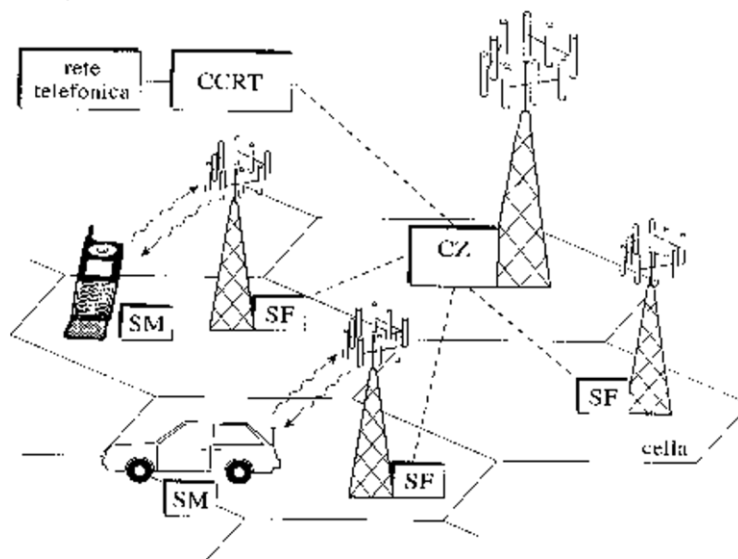
Macchine per riscaldamento industriale (trasformazione in calore dell'energia elettrica)

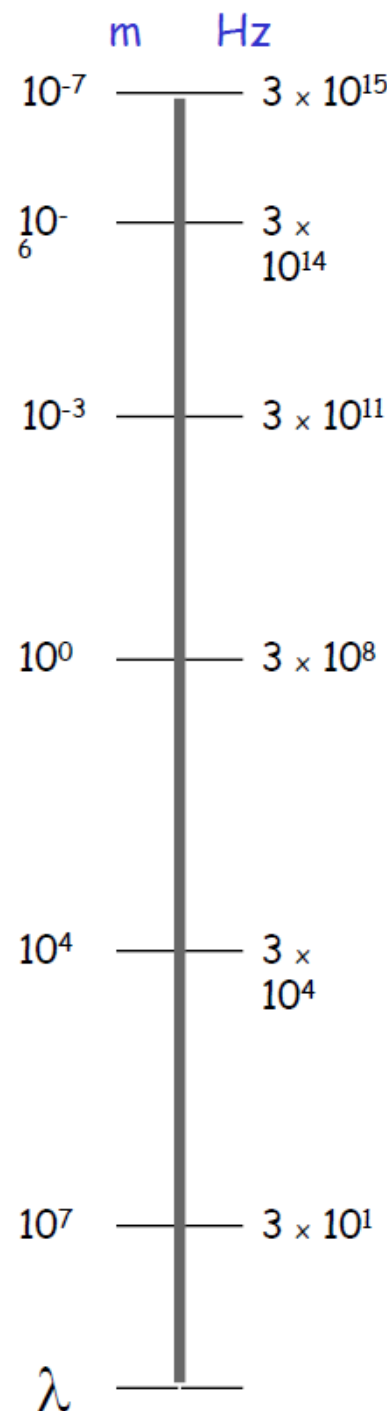
Apparati per telecomunicazioni (ponti radio, radio, televisione)

Sistemi radiomobili: ricetrasmittenti veicolari ,telefoni cellulari

Sorgenti domestiche: forni a microonde, televisori, telefoni mobili (cordless), sistemi di allarme;

applicazioni biomedicali (diagnostiche ,terapeutiche)





RADIAZIONI IONIZZANTI			Diagnostica a raggi X	
Radioisotopi				
RADIAZIONI NON IONIZZANTI	FREQUENZE OTTICHE	UV	Sterilizzazione	
			Laser	
		Vis	Lampade	
		Radiazione infrarossa	Sorgenti termiche	
			Telecomandi	
	FREQUENZE NON OTTICHE	Radiofrequenze	Microonde	Impianti radar
				Radarterapia
				Telefonia cellulare
				Forni a microonde
				Ponti radio
				Emissioni radiotelevisive
				Marconiterapia
			Radioamatori	
			Saldatura e incollaggio	
			Riscaldamento a induzione	
	Basse frequenze		Metal detector	
		Videoterminali		
		Magnetoterapia		
		Elettrodomestici		
		Linee elettriche		
		Linee telefoniche		
CAMPI STATICI			RMN	
			Elettrolisi	



CAMPI STATICI (0-1 Hz)

CAMPI MAGNETICI STATICI NELLA RICERCA

- reattori nucleari
 - acceleratori di particelle
 - NMR
 - camere a bolle
- i livelli tipici di esposizione al campo magnetico statico non sono correlati a effetti diretti nei confronti dell'organismo, ma possono comportare interferenze con gli stimolatori cardiaci, e problemi per i portatori di protesi metalliche

CAMPO MAGNETICO STATICO

EFFETTI SANITARI

- assenza di effetti significativi su parametri fisiologici, connessi allo sviluppo e al comportamento per valori d'induzione magnetica fino a 2 T
- esposizioni a lungo termine a campi d'induzione magnetica minori di 200 mT non sembrano avere conseguenze sullo stato di salute
- se il campo d'induzione magnetica supera qualche millitesla, possono sussistere potenziali rischi sanitari in portatori di pacemaker, impianti ferromagnetici e altri dispositivi elettronici

Limiti d'esposizione ICNIRP per i campi magnetici statici

TIPO D'ESPOSIZIONE	INDUZIONE MAGNETICA
Lavoratori <ul style="list-style-type: none">- Media pesata sull'intera giornata lavorativa (TWA)- Valore massimo- Esposizione solo degli arti	200 mT 2 T 5 T
Popolazione <ul style="list-style-type: none">- Esposizione continua	40 mT

Campi magnetici e dispositivi elettronici impiantati

- potenziali rischi dovuti all'interferenza di campi magnetici con dispositivi elettronici:
 - si dovrebbe evitare che persone con pacemaker impiantati possano risultare esposti a induzioni magnetiche superiori a 0.5 mT
 - segnali di avvertimento nei luoghi con induzione magnetica superiore a 0.5 mT

Campi magnetici e materiali ferromagnetici

- rischi dovuti al movimento o allo spostamento di dispositivi o materiali ferromagnetici impiantati
- rischi per schegge metalliche
 - le aree caratterizzate da livelli d'induzione magnetica al di sopra di 3 mT devono essere indicate da specifici segnali di avvertimento
- persone con stimolatori cardiaci, impianti ferromagnetici e dispositivi medicali impiantati potrebbero non essere protette dai limiti raccomandati.
- persone con pinze per aneurismi non amagnetiche non dovrebbero essere esposte a campi superiori a pochi millitesla

Tomografi a risonanza magnetica nucleare (RMN)

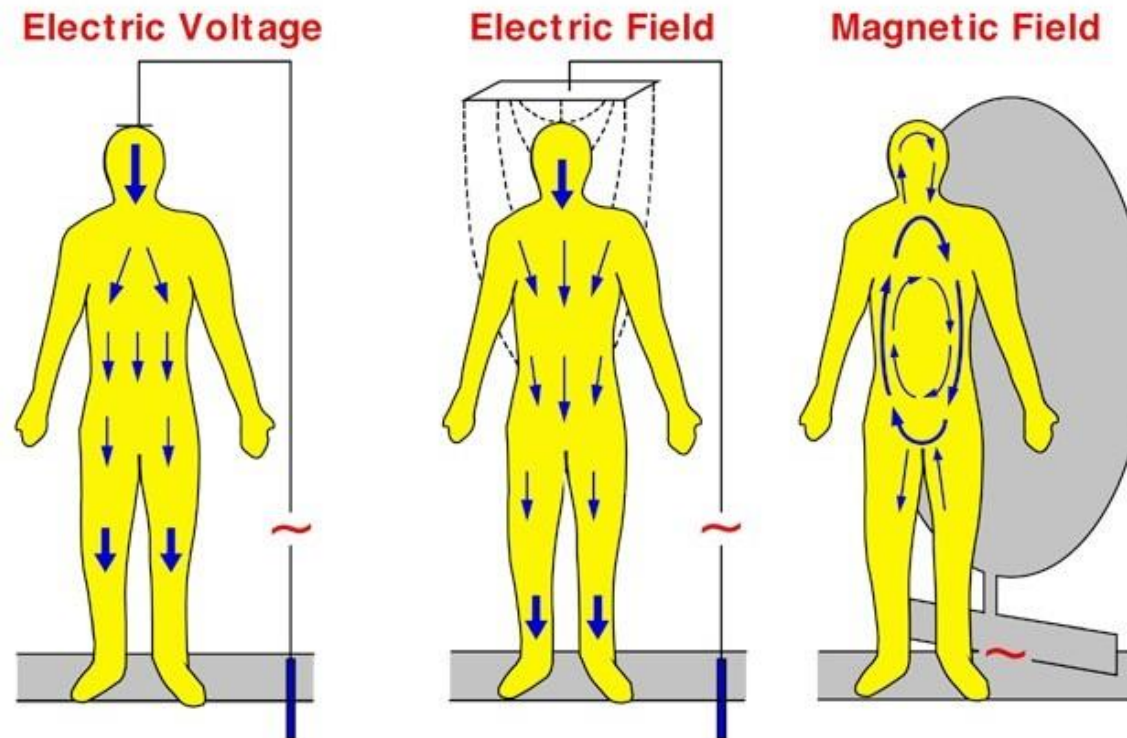
- campo magnetico statico molto intenso, fino a 2 Tesla per gli apparati di uso diagnostico
- campo elettromagnetico in radiofrequenza oscillante nell'intervallo circa tra 1 e 100 MHz
- gradiente di campo magnetico variabile nel tempo (picchi fino a 20 Tesla/s)



CAMPI VARIABILI NEL TEMPO **(fino a 300 GHz)**

Meccanismi di interazione

- fino alla frequenza di circa 1 MHz prevale l'induzione di correnti elettriche nei tessuti elettricamente stimolabili (nervi e muscoli)



Principali effetti biologici in relazione all'induzione di corrente nell'intervallo di frequenza 1- 300 Hz

Densità di corrente (mA/m ²)	EFFETTI
> 1000	Extrasistole e fibrillazione ventricolare: rischi per la salute ben determinati
100 – 1000	Stimolazione dei tessuti eccitabili: possibili rischi per la salute
10 – 100	Possibili effetti sul sistema nervoso
1 – 10	Effetti biologici minori



Stimolazione dei tessuti muscolari e nervosi elettricamente eccitabili

- si tratta di effetti a soglia: perché si verifichi la stimolazione la densità di corrente elettrica deve essere maggiore di un determinato valore.
- questa circostanza permette di fissare limiti di esposizione finalizzati alla totale prevenzione di questi effetti

Campi a 50 Hz e pacemaker

- L'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) raccomanda i seguenti livelli di sicurezza allo scopo di prevenire interferenze dei campi elettrici e magnetici a 50 Hz con dispositivi cardiaci impiantati (valori efficaci rms):

$$E = 1 \text{ kV/m}$$

$$B = 100 \text{ } \mu\text{T}$$

Meccanismi di interazione

- con l'aumentare della frequenza diventa prevalente l'assorbimento di energia nei tessuti attraverso il rapido movimento oscillatorio di ioni e molecole di acqua:

SAR (W/kg)



- a frequenze superiori a circa 10 MHz questo effetto è l'unico a permanere
- al di sopra di 10 GHz l'assorbimento è esclusivamente superficiale

SAR mediato sul corpo intero (medio) o circoscritto a specifici distretti corporei
in relazione all'induzione di effetti biologici nocivi nell'animale

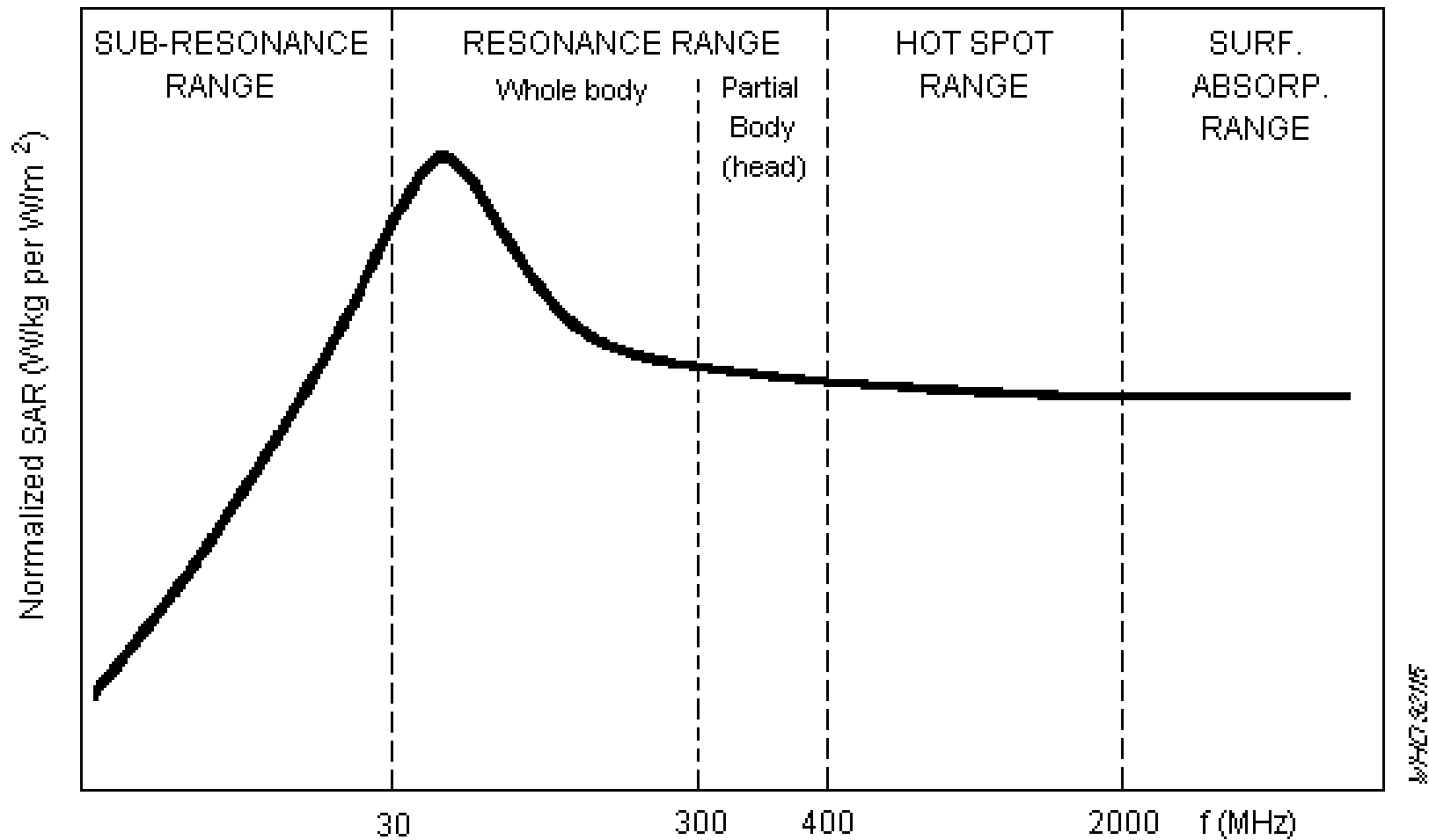
100 W/kg (medio) Ipertermia generalizzata, insufficienza dei
meccanismi termoregolatori

100 W/kg (locale) Rapida induzione di cataratta nell'animale

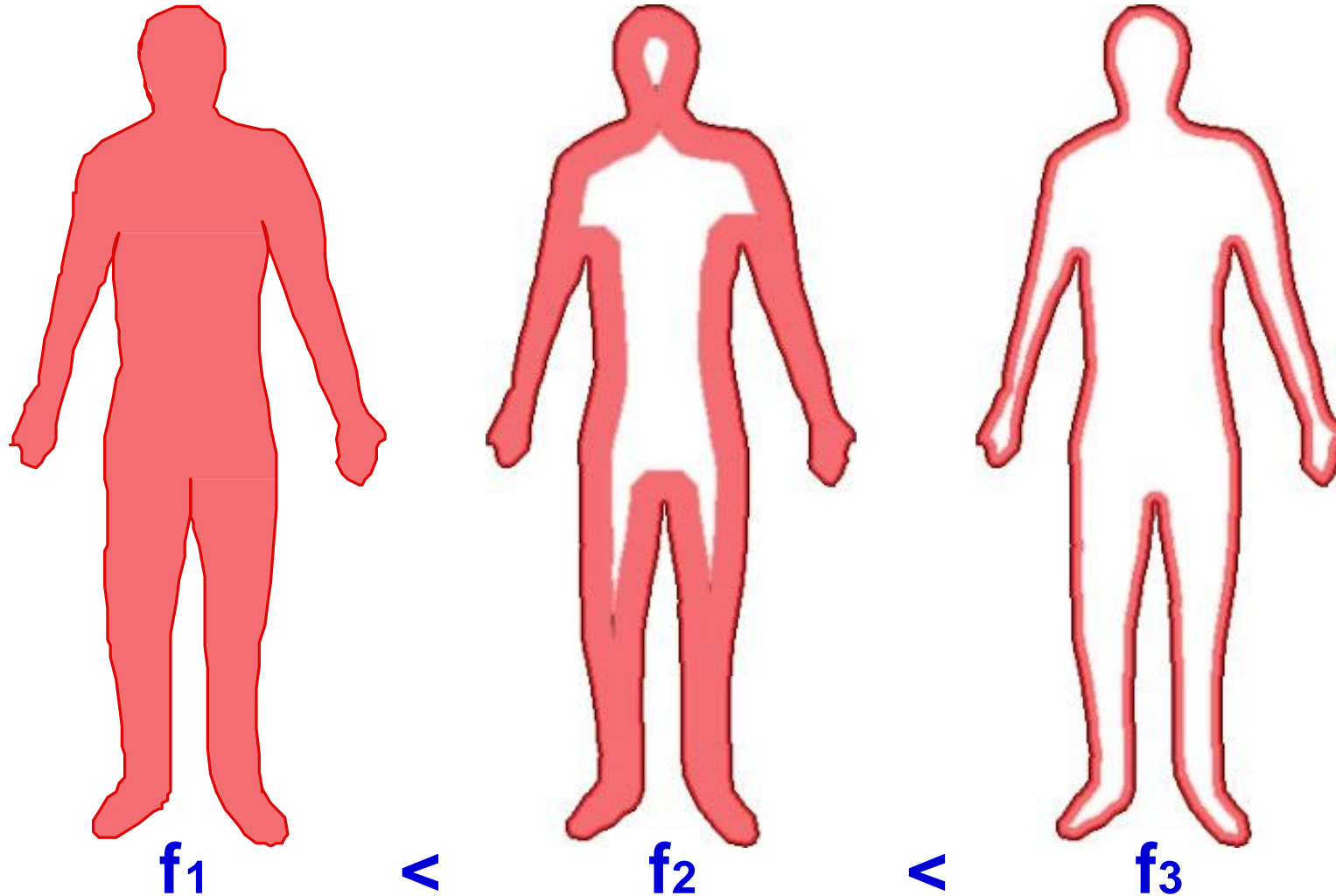
10 - 100 W/kg (medio) Ipertermia generalizzata o localizzata, risposta
termoregolatoria di grado variabile;
Inibizione temporanea o permanente della
spermatogenesi;
Induzione di aborto e malformazioni fetali;
Risposte neuroendocrine ed immunologiche
collegate allo stress termico

1 - 4 W/kg (medio) Soglia di induzione di effetti comportamentali e di
risposte fisiologiche collegate a stress nell'animale

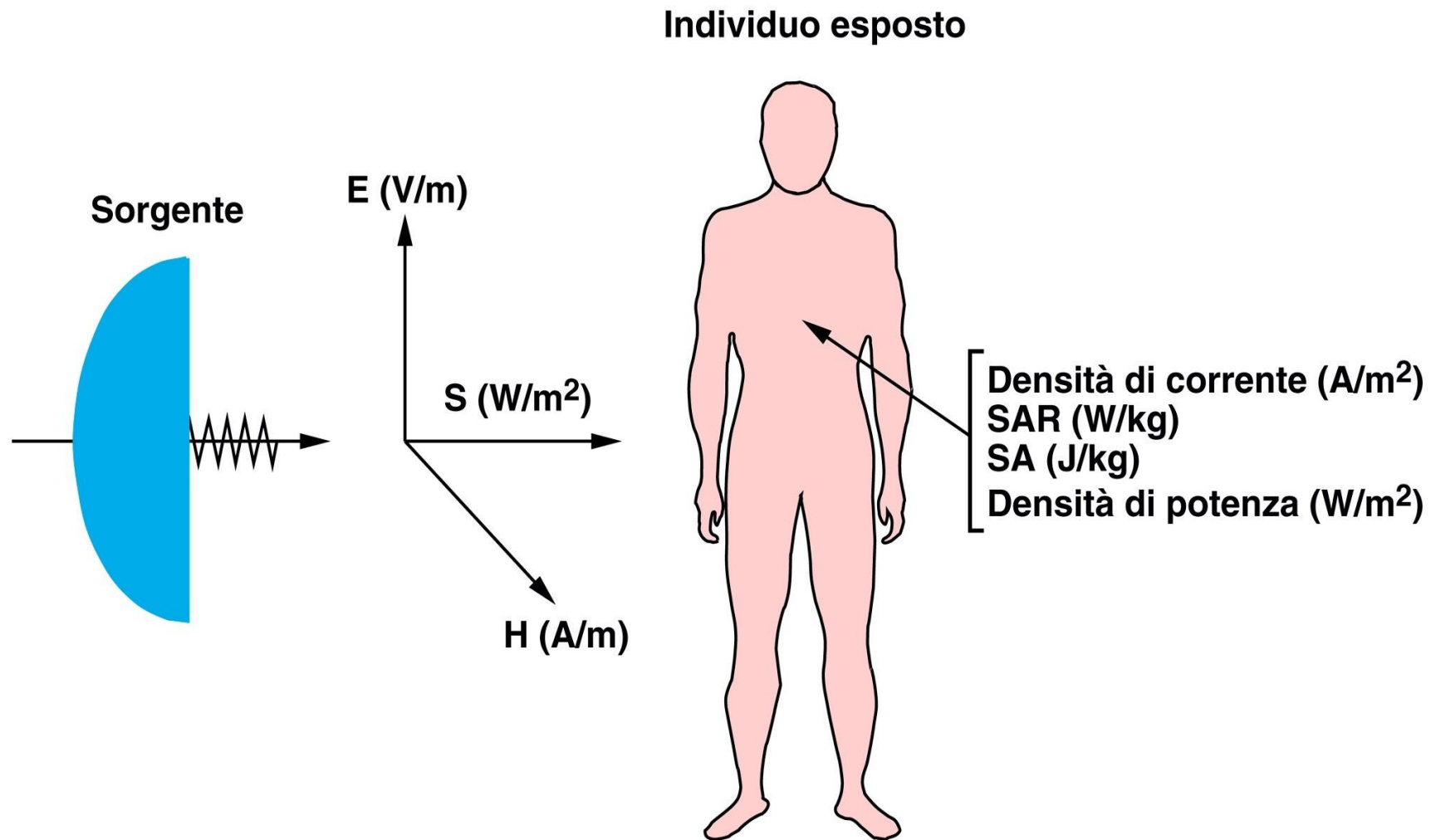
ANDAMENTO DEL SAR IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA



SPESSORE DI PENETRAZIONE



RADIOMETRIA E DOSIMETRIA



Le radiazioni vengono classificate in base alla capacità di provocare danni agli organismi viventi.

L'azione lesiva delle radiazioni sull'organismo è legata ai processi fisici di ionizzazione degli atomi e delle molecole dei tessuti biologici

Da questo punto di vista, le radiazioni sono classificate in:



- ionizzanti
- non ionizzanti

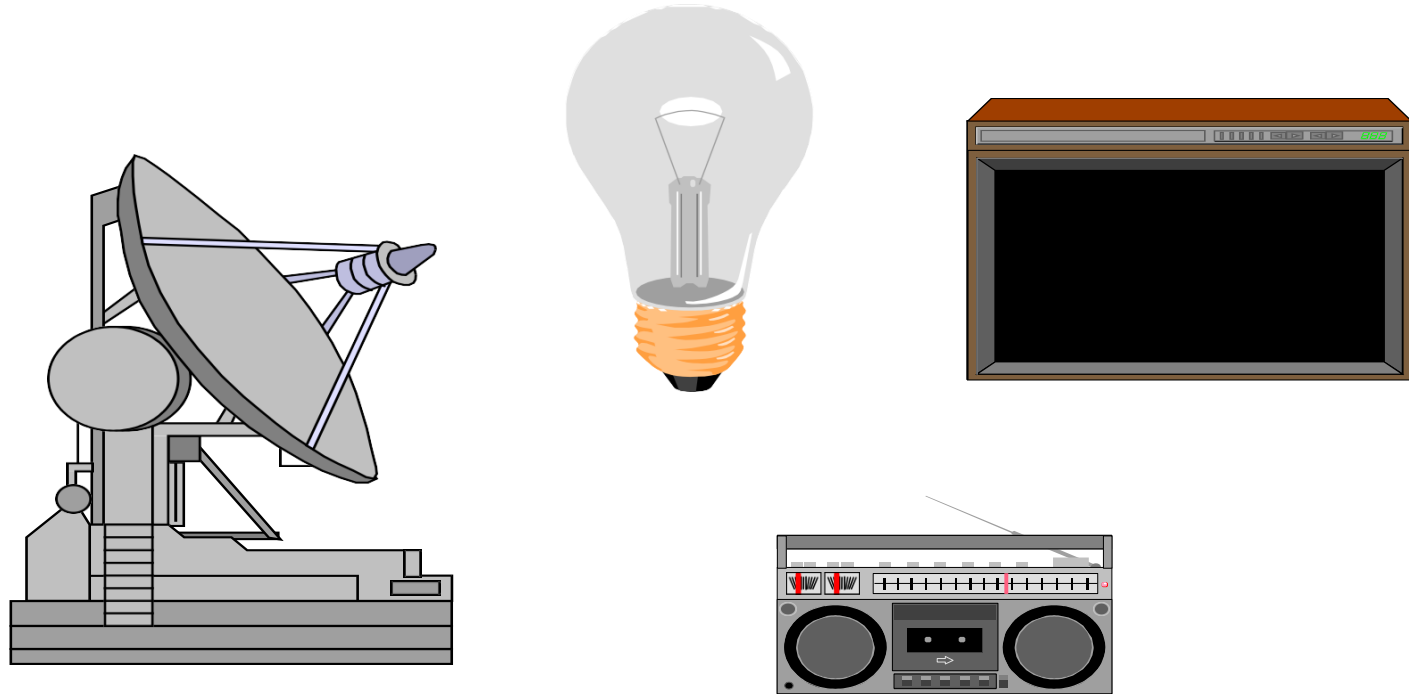
Radiazioni ionizzanti: hanno energia sufficiente ($>12 \text{ eV}$) per ionizzare i tessuti biologici

Si usa fare un ulteriore suddivisione:

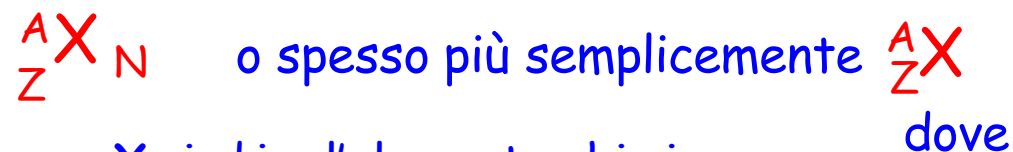
Direttamente ionizzanti: particelle cariche (elettroni, protoni, particelle α , etc.) la cui energia cinetica è sufficiente per produrre ionizzazione per collisione;

✓ Indirettamente ionizzanti: raggi X, raggi γ e neutroni che, interagendo con la materia, possono mettere in moto particelle direttamente ionizzanti o dar luogo a reazioni nucleari

Radiazioni NON ionizzanti:
NON hanno energia sufficiente ($< 12 \text{ eV}$) per
ionizzare i tessuti biologici



Nuclide: ben definito nucleo costituito da un determinato numero di protoni e di neutroni. Esso viene indicato come:



- **X** indica l'elemento chimico;
- **Z** : numero atomico dell'elemento = numero di protoni nel nucleo (\equiv numero di elettroni atomici);
- **A** : numero di massa del nucleo, cioè il numero totale di protoni (Z) e neutroni (N) $\rightarrow A=Z+N$.

I protoni ed i neutroni sono chiamati genericamente nucleoni. Ne risulta ovviamente che $N=A-Z$



Radioattività

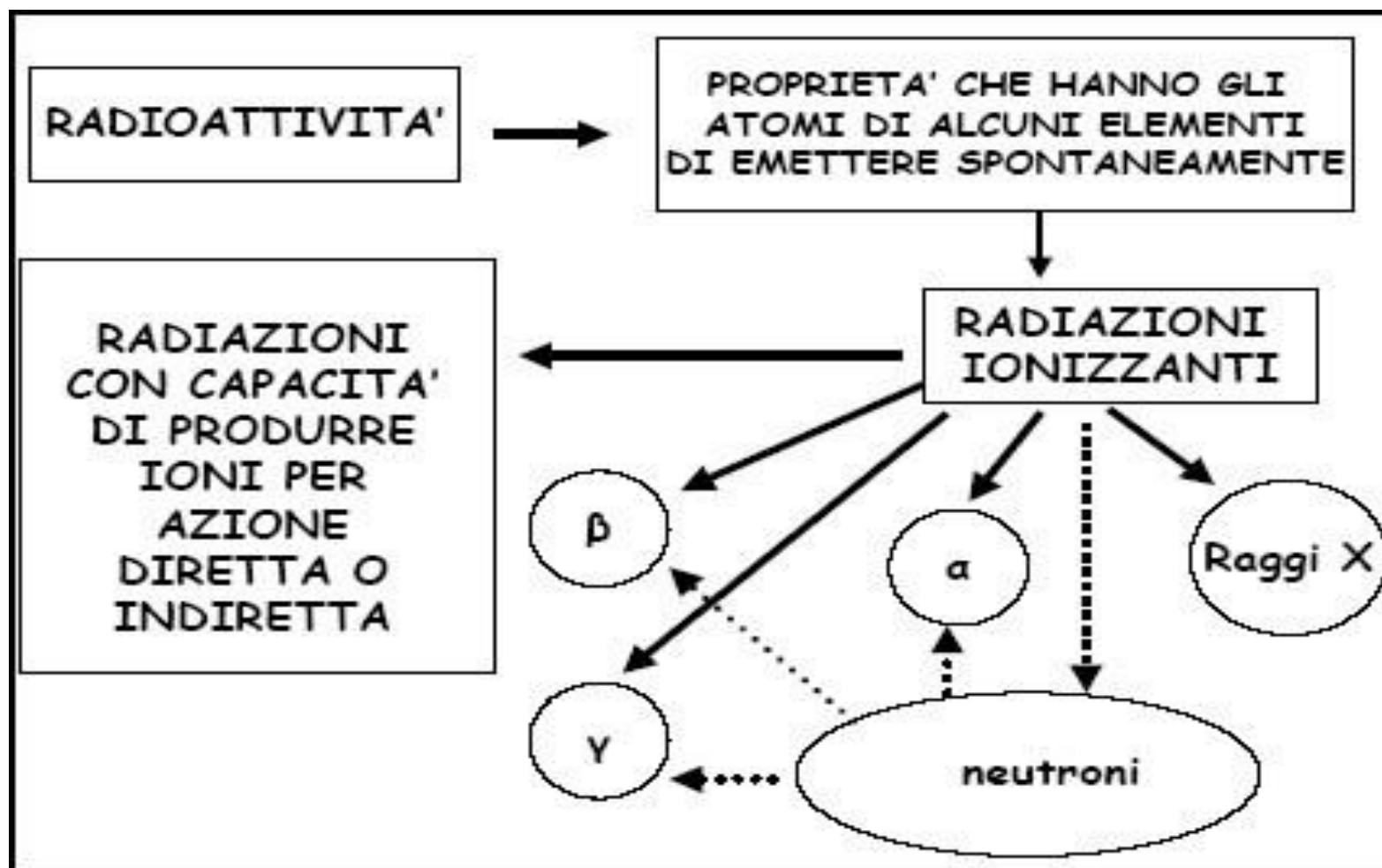
Emissione spontanea di particelle e di onde elettromagnetiche da parte di nuclei instabili

- ✓ Naturale (in quasi tutti i nuclei avente Z compreso tra 81 e 92);
- ✓ Artificiale (bombardamento del nucleo con particelle come protoni o neutroni).

Si può avere un processo in cascata finché non si giunge ad un nucleo stabile



Serie
radioattiva

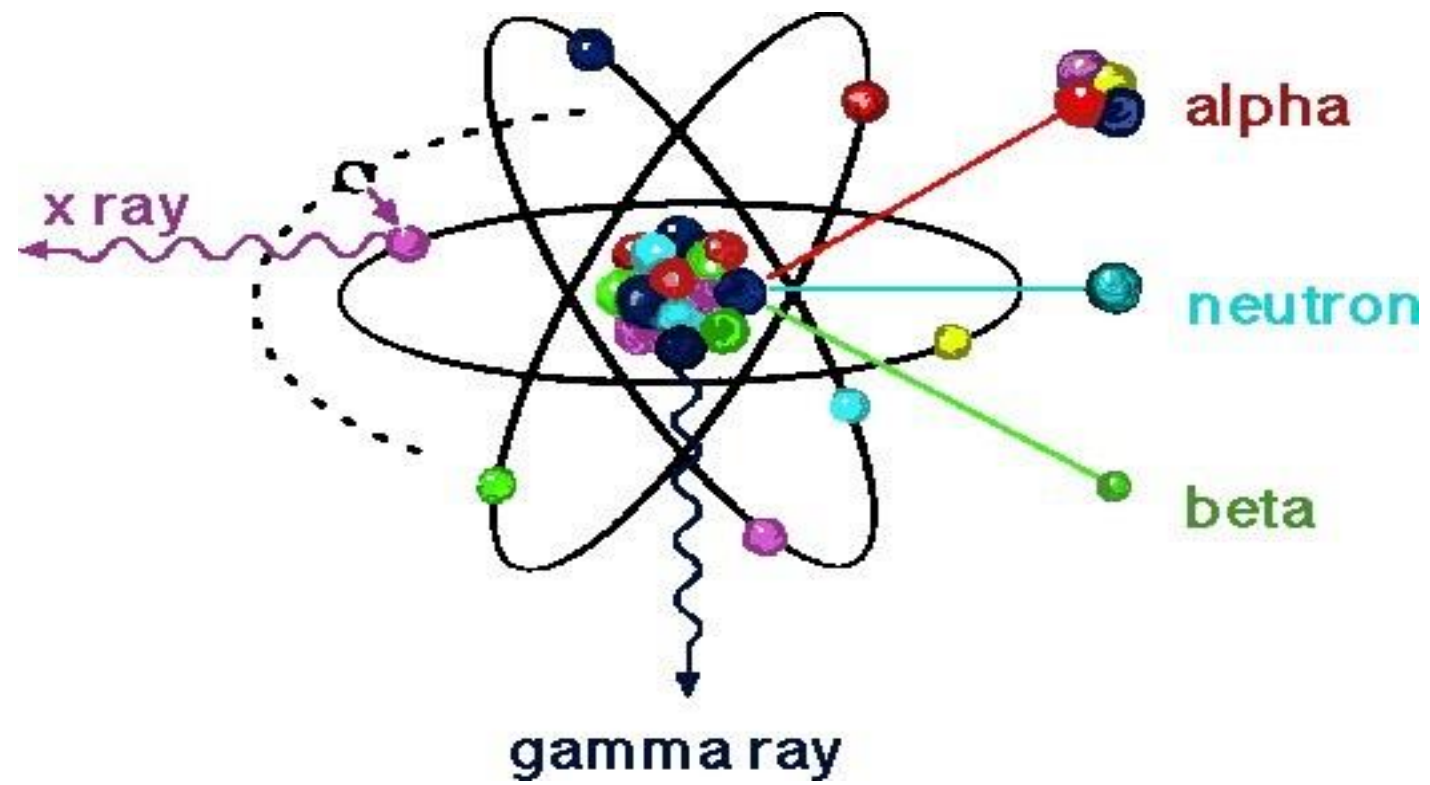


Radiazioni emesse dall'atomo:

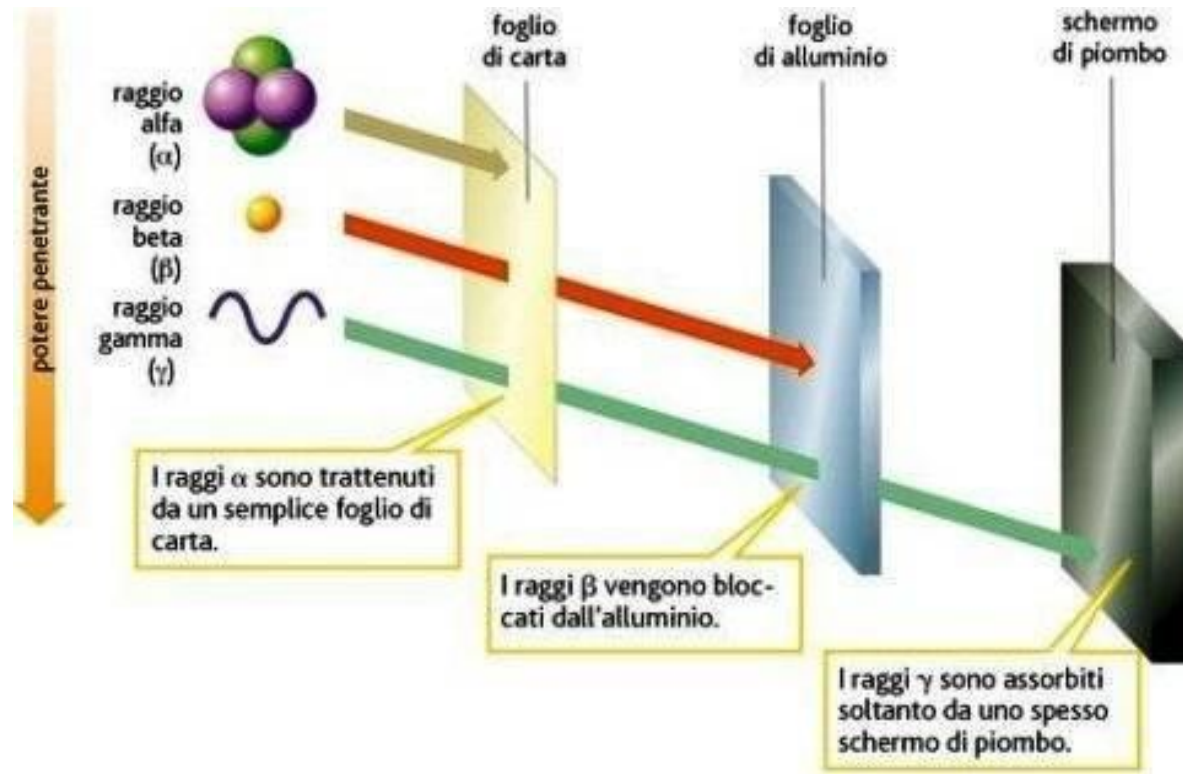
- Raggi X di frenamento
- Raggi X caratteristici

Radiazioni emesse dal nucleo:

- Particelle alfa(α)
- Particelle beta(β)
- Raggi gamma(γ)



Interazione delle radiazioni con la materia



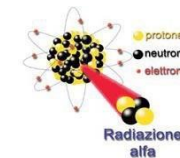
Interazioni delle particelle α con la materia

Le particelle alfa in quanto particelle cariche interagiscono tramite collisioni Coulombiane con gli atomi del mezzo che attraversano.

Essendo particelle di grosse dimensioni non subiscono grosse deviazioni quando attraversano la materia per cui la loro traiettoria è pressoché lineare.

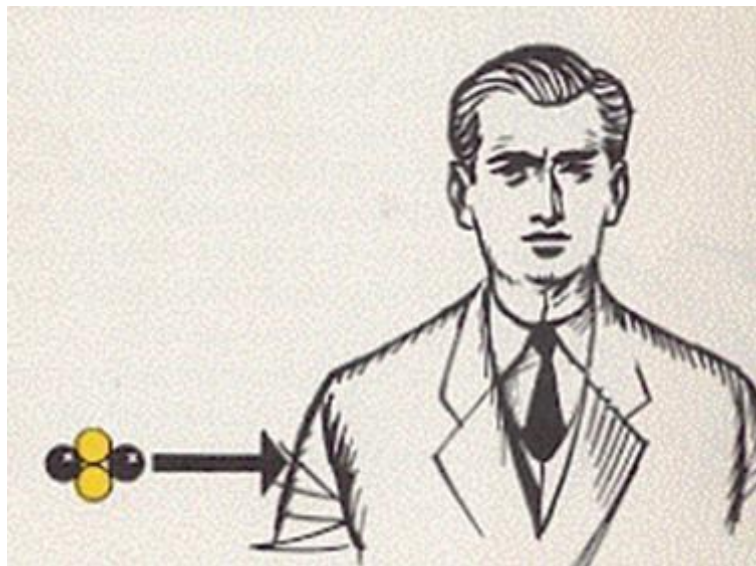
Nella parte iniziale del loro percorso la quantità di energia persa (e quindi il numero di ioni prodotti) è praticamente costante e solo verso la fine del loro percorso trasferiscono più energia al mezzo.

Per particelle alfa di una determinata energia, in un determinato materiale la distanza massima percorsa (Range) è una quantità ben definita



Particelle α da ~ 5 MeV hanno un range di ~ 3.5 cm in aria a STP, equivalente a 35μ di tessuto (lo strato protettivo delle cellule morte della pelle è di $\sim 70\mu$)

Sorgenti di particelle α esterne non costituiscono un pericolo biologico; il discorso cambia radicalmente nel caso di sorgenti α -emittenti all'interno del corpo umano.



Interazione delle particelle β -con la materia



La loro massa è pari a $\sim 1/7300$ della massa della particella α .

A causa della piccola massa, la velocità degli elettroni è grande anche a basse energie ed è confrontabile con quelle della luce;

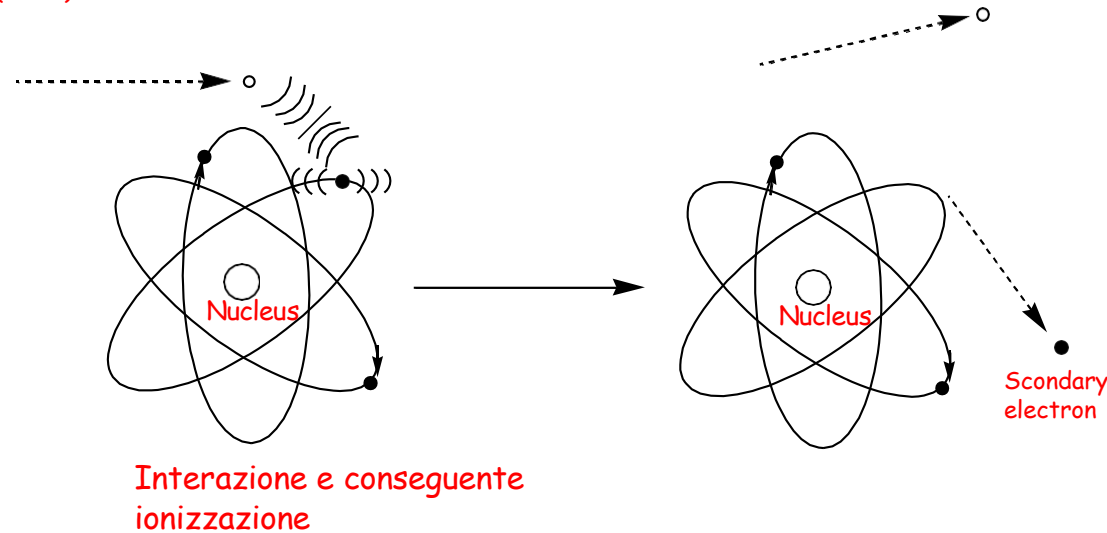
Le interazioni degli elettroni con la materia avvengono per cessioni di piccole quantità di energia in conseguenza alla ridotta carica elettrica.

Non hanno un tragitto lineare, ma tortuoso nel loro cammino del mezzo assorbente. Di conseguenza il range è molto diverso dalla traiettoria e a parità di E iniziale è diverso da particella a particella.

Ionizzazione. Se l'intensità dell'interazione è sufficiente, l'elettrone "colpito" si separa dall'atomo e si ha la ionizzazione.

Le interazioni avvengono prevalentemente con gli elettroni dell'assorbitore. Il meccanismo dell'interazione è basato sulla perdita di energia che subisce la particella incidente quando il campo elettrico ad essa associato interagisce con quello di un elettrone orbitale di un atomo.

Incident particle (+ or -)

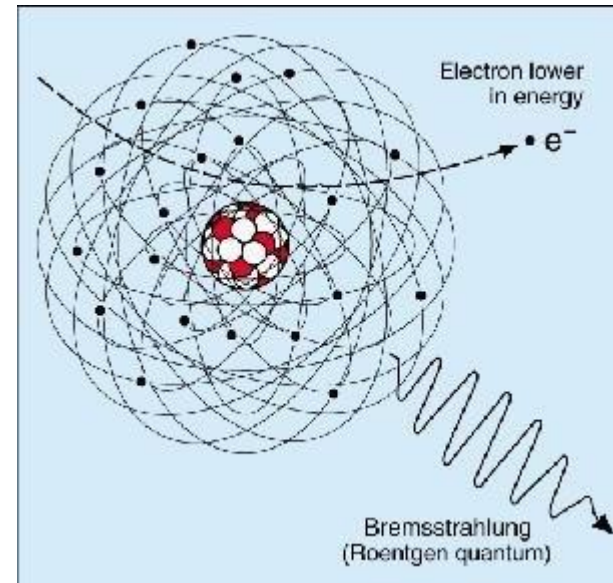
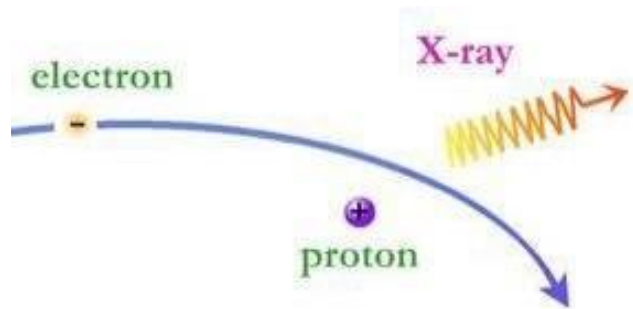


Bremsstrahlung

Quando un elettrone veloce si avvicina ad un nucleo è attratto dal campo positivo del nucleo, la sua traiettoria viene deviata, con emissione di radiazioni X (radiazioni di frenamento o di bremsstrahlung, con uno spettro continuo).

Radiazione di frenamento: collisione anelastica.

Modello schematico di bremsstrahlung



Questo modo di interagire con la materia riguarda solo le particelle cariche leggere (elettroni). Infatti, l'entità del bremsstrahlung è inversamente proporzionale al quadrato della massa della particella incidente.

Tipi di radiazioni

Le radiazioni si distinguono in corpuscolari ed elettromagnetiche sulla base del loro comportamento prevalente:

le radiazioni corpuscolari sono costituite da particelle sub-atomiche che si spostano con velocità assai elevate, spesso prossime alla velocità della luce. A seconda della massa e della carica possono essere classificate in tre gruppi:

particelle leggere elettricamente cariche: le più importanti sono elettroni e positroni;

particelle pesanti elettricamente cariche: nuclei di atomi di basso numero atomico (protoni, deutoni, nuclei di elio, etc.);

particelle elettricamente neutre: neutroni.

Le radiazioni elettromagnetiche si propagano con la velocità della luce e sono classificate in base alla loro energia e lunghezza d'onda; l'energia dei fotoni (E) e la lunghezza d'onda (λ) del campo elettromagnetico associato sono legate dalla relazione: $E \text{ (keV)} = 12.4/\lambda \text{ (Å)}$.

$$E = h\nu$$

Meccanismi di interazione- PREMESSA

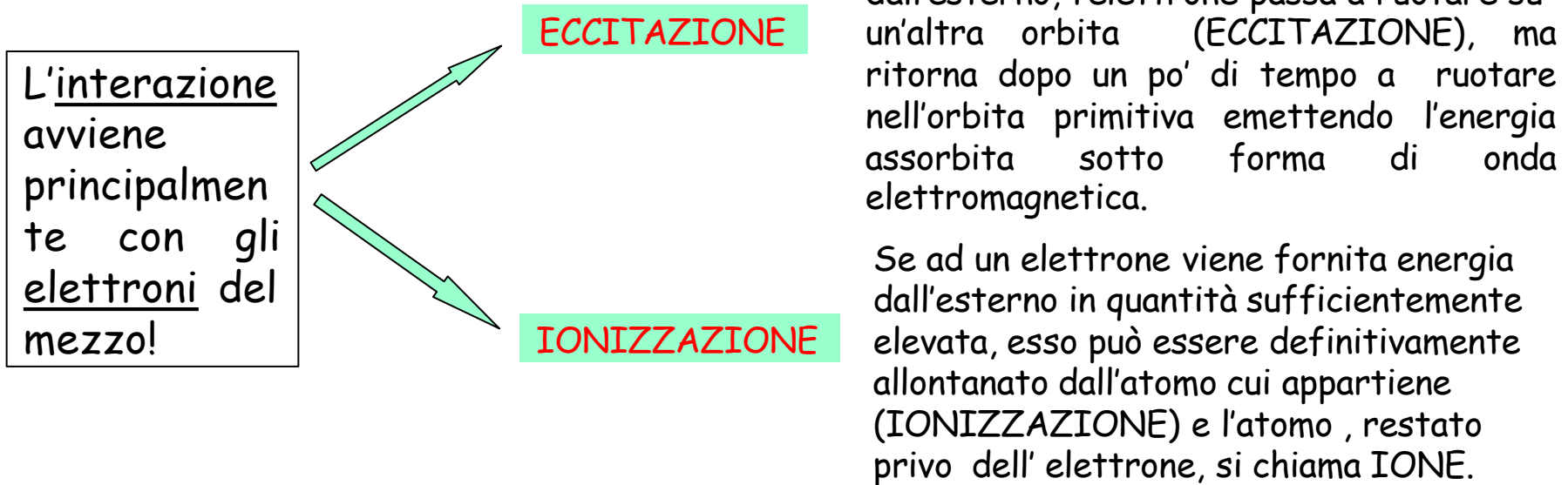
L' assorbimento delle radiazioni nella materia è dovuto alla loro interazione, di tipo probabilistico, con gli elettroni e i nuclei degli atomi e delle molecole dell'assorbitore.

Nella materia, anche allo stato solido, il volume vuoto è fortemente prevalente su quello occupato, cosicché una radiazione incidente può percorrere distanze diverse tra un nucleo e l'altro.

Le interazioni sono, quindi, regolate da valori di probabilità dipendenti dai parametri della radiazione incidente e del bersaglio quali: energia, carica, massa e dimensioni.

Per interazione tra una particella carica e un elettrone non si deve necessariamente intendere un "urto materiale", ossia si ha interazione anche quando il parametro d'urto è superiore alla somma dei raggi delle particelle interagenti. La misura di questa probabilità si ha tramite il concetto di "sezione d'urto" (σ); Unità di misura: barn = 10^{-24} cm².

Interazione delle particelle cariche pesanti



Le particelle interagenti sono poco deviate dalla loro traiettoria iniziale.

In prima approssimazione la traiettoria può essere considerata rettilinea.

Indichiamo con dE/dx la quantità di energia persa per unità di percorso

$$-\left(\frac{d\bar{E}}{dx}\right) = 4\pi \frac{e^4}{m_e c^2} z^2 \frac{N_A Z \rho}{A} \frac{1}{\beta^2} \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I}\right) \left(\frac{MeV}{cm}\right)$$

forma semplificata della
formula di Bethe,

valida per $\left(\beta = \frac{v}{c} \ll 1\right)$

Dove:	<p>e, è la carica elementare $m_e c^2$ rappresenta l'energia a riposo dell'elettrone, z è il numero di cariche elementari della particella incidente, ρ rappresenta la densità del materiale nel quale l'interazione a luogo, A e Z sono rispettivamente la massa atomica ed in numero atomico del mezzo, N_A è il numero di Avogadro</p>
medio	<p>I è una costante caratteristica del mezzo che rappresenta il potenziale d'eccitazione degli elettroni.</p>

La quantità $-dE/dx$ è chiamata **perdita d'energia per collisione** e rappresenta il potere di rallentamento del mezzo per una particella data.

Interazione delle particelle cariche leggere

Col termine particelle cariche leggere intendiamo gli elettroni (e^- ed β^-) ed i positroni (e^+ ed β^+).

Per le particelle cariche leggere, gli effetti relativistici non possono essere trascurati, avendo queste una massa a riposo molto più piccola delle rispettive particelle cariche pesanti.

Le particelle cariche leggere sono soggette non solo alla collisione con gli elettroni atomici del mezzo in cui interagiscono, ma subiscono anche un secondo tipo di meccanismo di perdita di energia dovuto alla interazione coi nuclei atomici. Questo secondo tipo di interazione, importante per energie elevate dell'elettrone incidente, è detta

perdita di energia per irraggiamento.

Perdita di energia per ionizzazione

La perdita di energia per unità di percorso è più fluttuante che nel caso delle particelle pesanti; la lunghezza della traiettoria subisce quindi una dispersione statistica più importante.

La formula Bethe e Bloch è data per due domini di energia dell'elettrone incidente:

$$-\left(\frac{d\bar{E}}{dx}\right) = 0.306 \frac{N_A Z \rho}{A} \frac{1}{\beta^2} \ln\left(\frac{1.16 m_e c^2 \beta^2}{2 I}\right) \left(\frac{\text{MeV}}{\text{cm}}\right) \quad (\text{per } \beta < 0.5)$$

$$-\left(\frac{d\bar{E}}{dx}\right) \cong 0.153 \frac{N_A Z \rho}{A} \frac{1}{\beta^2} \ln\left(\frac{E(E + m_e c^2)^2 \beta^2}{2 I^2 m_e c^2}\right) \left(\frac{\text{MeV}}{\text{cm}}\right) \quad (\text{per } \beta \approx 1)$$

← Nel caso **non relativistico** il potere di rallentamento decresce in funzione dell'energia E dell'elettrone come avveniva per le particelle cariche pesanti, mentre **nel caso relativistico** il potere di rallentamento cresce lentamente con $\ln E$.

Perdita di energia per irraggiamento

Per energie ancora più elevate, l'assorbimento degli elettroni cresce ancora più rapidamente

La teoria di Maxwell prevede che una particella carica soggetta ad una accelerazione irraggi dell'energia sotto forma elettromagnetica. L'emissione di fotoni attraverso questo processo è chiamato **irraggiamento da frenamento** o **bremsstrahlung**.

$$-\left(\frac{d\bar{E}}{dx}\right) \cong \frac{1}{137} \frac{N_A Z^2 \rho}{A} r_e^2 (E + m_e c^2) \left(4 \ln \frac{2(E + m_e c^2)}{m_e c^2} - \frac{4}{3} \right) \left(\frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \right)$$

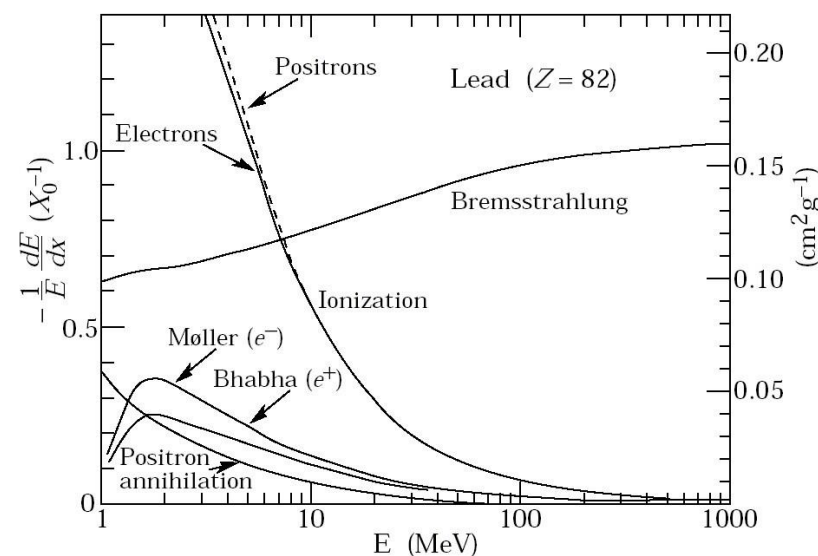
$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$$

è il raggio classico dell'elettrone che vale $r_e = 2.817 \text{ fm}$

Confronto tra i due diversi processi di perdita di energia per gli elettroni:

Energia critica

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{irraggiamento}} \approx \frac{E(\text{MeV}) \cdot Z}{800} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ionizzazione}}$$



Interazione della radiazione elettromagnetica

I fotoni nell'attraversare un mezzo assorbente possono interagire sia con gli elettroni degli atomi sia con il nucleo atomico:

Interazione con gli elettroni:

- Diffusione Compton
- Effetto fotoelettrico

Interazione col nucleo:

- Produzione di coppie

A differenza delle particelle cariche i fotoni interagiscono con la materia in modo discontinuo e la loro intensità non viene mai ridotta a zero.

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

dove μ è detto **coefficiente di attenuazione** (o di assorbimento) e dipende sia dall'energia del fotone sia dalle caratteristiche del mezzo attraversato.

$$\left[\frac{1}{cm} \right]$$

La **lunghezza di attenuazione** λ è definita come l'inverso del coefficiente di attenuazione μ :

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad [cm]$$

Indichiamo con σ la **sezione d'urto** che esprimeremo in $cm^2/atomi$: $\sigma = \mu \frac{A}{N_A} \left[\frac{cm^2}{atomi} \right]$

rappresenta la probabilità che una data collisione tra due particelle avvenga. Essa ha le dimensioni di una superficie e spesso viene misurata in barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

Effetto fotoelettrico

Interazione di un fotone con un elettrone atomico.

Durante l'interazione il fotone cede tutta la sua energia all'elettrone.

$$E_e = h\nu - E_b$$

L'effetto fotoelettrico è un effetto a soglia, potendosi verificare solo quando l'energia del fotone incidente è superiore all'energia di legame dell'elettrone.

La sezione d'urto per effetto fotoelettrico, che indicheremo con σ_{foto} risulta:

$$\sigma_{foto} \cong Z^5 \alpha \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right)^n \quad \begin{array}{l} n = 3.5 \text{ per } E_\gamma < m_e c^2 \\ n = 1 \text{ per } E_\gamma \gg m_e c^2 \end{array} \quad \text{costante di struttura fine}$$
$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

Ricordando che

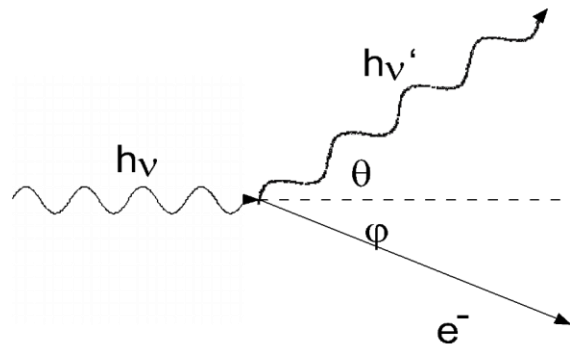
$$\sigma = \mu \frac{A}{N_A} \quad \longrightarrow$$

$$\mu_{foto} \approx \rho \frac{Z^5}{A}$$

Effetto Compton

Interazione di un fotone con un elettrone "libero"

La differenza di energia tra fotone incidente e fotone diffuso sarà impartita all'elettrone sotto forma di energia cinetica.



A differenza dell'effetto fotoelettrico il fotone non cede tutta la sua energia in una sola interazione, ma rilascia solo una frazione della propria energia deviando rispetto alla direzione incidente.

La sezione d'urto per l'effetto Compton (nella trattazione non relativistica) risulta:

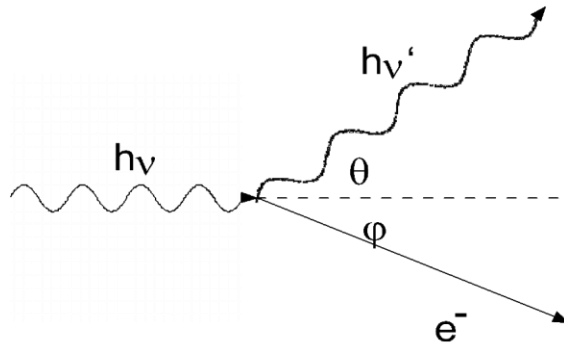
$$\sigma_{Compton} \cong \frac{8\pi}{3} r_e^2$$

Raggio classico dell' e^-

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.8 \cdot 10^{-15} m$$

$$\mu_{Compton} \approx \rho \frac{Z}{A}$$

Calcoliamo la perdita di energia del fotone incidente in funzione dell'angolo di diffusione.



Sia γ il fotone (di frequenza ν) incidente su un elettrone a riposo

Sia γ' il fotone diffuso (di frequenza ν')

Sia e' l'elettrone dopo l'urto

Indichiamo θ l'angolo di diffusione

Per la conservazione della quantità di moto abbiamo: $p_\gamma = p_{\gamma'} + p_{e'}$

ma $p_\gamma = \frac{E_\gamma}{c} = \frac{h\nu}{c}$ $p_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma'}}{c} = \frac{h\nu'}{c}$ $p_{e'}^2 = (p_\gamma - p_{\gamma'})^2 = p_\gamma^2 + p_{\gamma'}^2 - 2p_\gamma p_{\gamma'} \cos\theta$

Quindi $p_{e'}^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h\nu}{c}\frac{h\nu'}{c}\cos\theta$

Per la conservazione dell'energia abbiamo: $E_\gamma + E_e = E_{\gamma'} + E_{e'}$

ora $E_\gamma = h\nu$

$$E_e = \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2} = m_e c^2$$

$$E_{e'} = \sqrt{m_e^2 c^4 + p_{e'}^2 c^2}$$

$$E_{\gamma'} = h\nu'$$

Quindi $h\nu + m_e c^2 = h\nu' + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_{e'}^2 c^2}$

esplicitando rispetto a $p_{e'}^2$:

$$p_{e'}^2 = \frac{(h\nu + m_e c^2 - h\nu')^2 - m_e^2 c^4}{c^2}$$

Combinando le 2 equazioni si ottiene:

$$\frac{(h\nu + m_e c^2 - h\nu')^2 - m_e^2 c^4}{c^2} = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2 \frac{h\nu}{c} \frac{h\nu'}{c} \cos\theta$$

Sviluppando e ricordando che $\nu = \frac{c}{\lambda}$

si ottiene $h \frac{c}{\lambda} \frac{c}{\lambda'} (1 - \cos\theta) = m_e c^2 \left(\frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda'} \right)$

e quindi $\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$ $\lambda_c = \frac{h}{m_e c}$ è detta lunghezza d'onda Compton dell'elettrone e vale $2.426 \cdot 10^{-12}$ m.

La conoscenza della lunghezza d'onda λ del fotone incidente (e quindi la sua energia $E=h\nu$) e l'angolo di diffusione θ permettono di calcolare il valore dell'energia cinetica impressa all'elettrone:

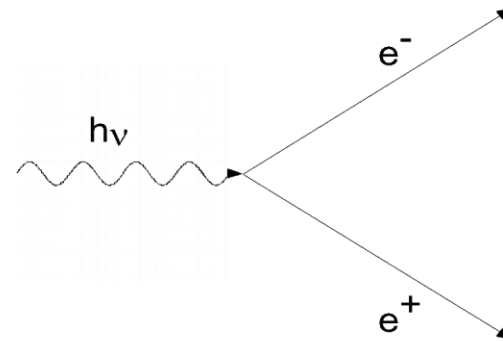
$$E_{\text{cinetica}} = h\nu - h\nu' = \frac{(h\nu)^2 (1 - \cos\theta)}{m_e c^2 + h\nu (1 - \cos\theta)}$$

- Per $\theta=0^\circ$ l'energia trasferita è nulla, e quindi l'energia del fotone è conservata.
- Per $\theta=180^\circ$ il fotone è rimbalzato all'indietro ed l'energia trasferita è massima e vale .

$$\frac{2 (h\nu)^2}{m_e c^2 + 2 (h\nu)}$$

Produzione di coppie

Un fotone si materializza creando una coppia elettrone-positrone:



Tale processo può verificarsi solo se il fotone possiede un'energia maggiore della somma delle masse delle due particelle prodotte; ossia deve avere un'energia $E_\gamma \geq 1.022 \text{ MeV}$

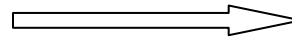
L'eccesso di energia del fotone incidente verrà trasformato in energia cinetica del positrone e dell'elettrone:

$$E_{\text{cinetica}} = \frac{E_\gamma (\text{MeV}) - 1.022}{2}$$

annichilazione del positrone: $e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma$ (due fotoni, di energia pari a 511 keV)

La sezione d'urto per produzione di coppie vale:

$$\sigma_{pp} \cong \frac{Z^2 \alpha^3}{(m_e c^2)^2}$$



$$\mu_{pp} \approx \rho \frac{Z^2}{A}$$

Attenuazione dei fotoni

Il **coefficiente di attenuazione totale** μ_{tot} , è la somma dei coefficienti dei tre processi considerati, e cioè:

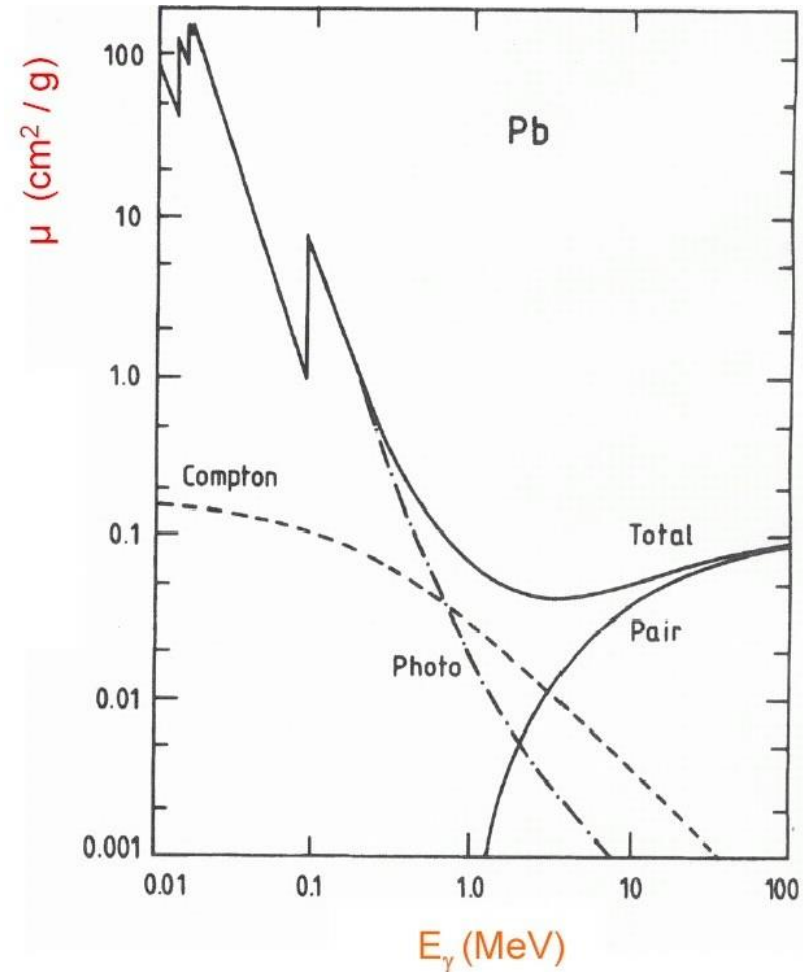
$$\mu_{tot} = \mu_{foto} + \mu_{Compton} + \mu_{pp}$$

Il numero di fotoni diffusi o assorbiti in uno spessore dx è proporzionale al flusso di fotoni incidenti $\Phi(x)$ e alla probabilità totale d'interazione μ_{tot} :

$$-d\phi(x) = \phi(x) \cdot \mu_{tot} \cdot dx$$

Dopo aver attraversato uno spessore x , l'intensità del fascio è:

$$\phi(x) = \phi(0) \cdot e^{-\mu_{tot} \cdot x}$$



Esempio: γ del ^{208}Tl (2.61 MeV).

Nel piombo $\mu_{tot} = 0.477 \text{ 1/cm}$ quindi $\lambda = 2.1 \text{ cm}$