



Principi di bioingegneria

Lezione 16

Proprietà ottiche ed elettromagnetiche

Gabriele Maria Fortunato

gabriele.fortunato@unipi.it



ONDE E CORPUSCOLI

- Che cos'è la luce? A partire dal 1600 sono state date due risposte diverse a questa domanda, da cui si sono sviluppati due modelli rivali: il *modello corpuscolare*, proposto da Isaac Newton, e il *modello ondulatorio*, sostenuto da Christiaan Huygens.

Secondo il **modello corpuscolare**, la luce è un flusso di particelle microscopiche (*corpuscoli*) emesse dalle sorgenti luminose.



Secondo il **modello ondulatorio**, la luce è un'onda, simile alle onde che si propagano nell'acqua e alle onde sonore.





Fino all'inizio del 1800 la comunità degli scienziati riteneva valido il modello corpuscolare, perché descriveva in modo efficace la formazione delle ombre nette (dove arrivano i corpuscoli c'è luce, dove non arrivano c'è ombra) e la riflessione della luce (i corpuscoli rimbalzano come palline sulle superfici riflettenti).

Invece, il modello ondulatorio era giudicato poco convincente, perché non era chiaro che tipo di perturbazione fosse la luce né in quale mezzo si propagasse.

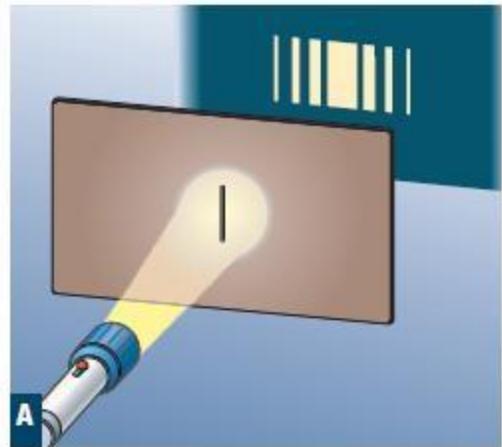
Molti fenomeni luminosi possono essere interpretati mediante i semplici modelli dell'ottica geometrica, secondo la quale la luce è formata da raggi che si propagano in linea retta nei materiali omogenei.

Esistono però fenomeni che non possono essere spiegati nell'ambito dell'ottica geometrica.

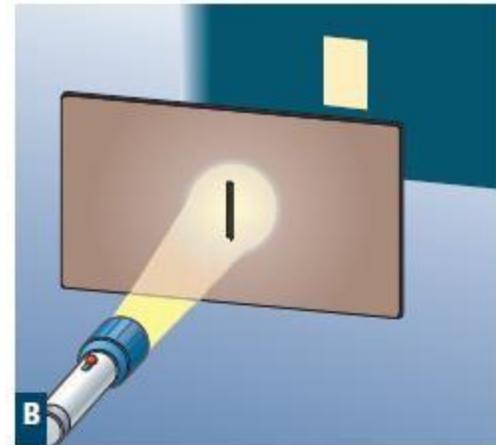
L'affermazione del modello ondulatorio

- Nei primi decenni del 1800 alcuni esperimenti misero in evidenza che la luce non sempre disegna ombre nette. Questo modificò l'opinione di diversi scienziati a favore del modello ondulatorio.

La luce che attraversa una fenditura molto sottile crea su uno schermo una serie di frange luminose alternate a zone scure.



Il modello corpuscolare prevede invece che si formi una sola striscia di luce, circondata da due zone d'ombra.

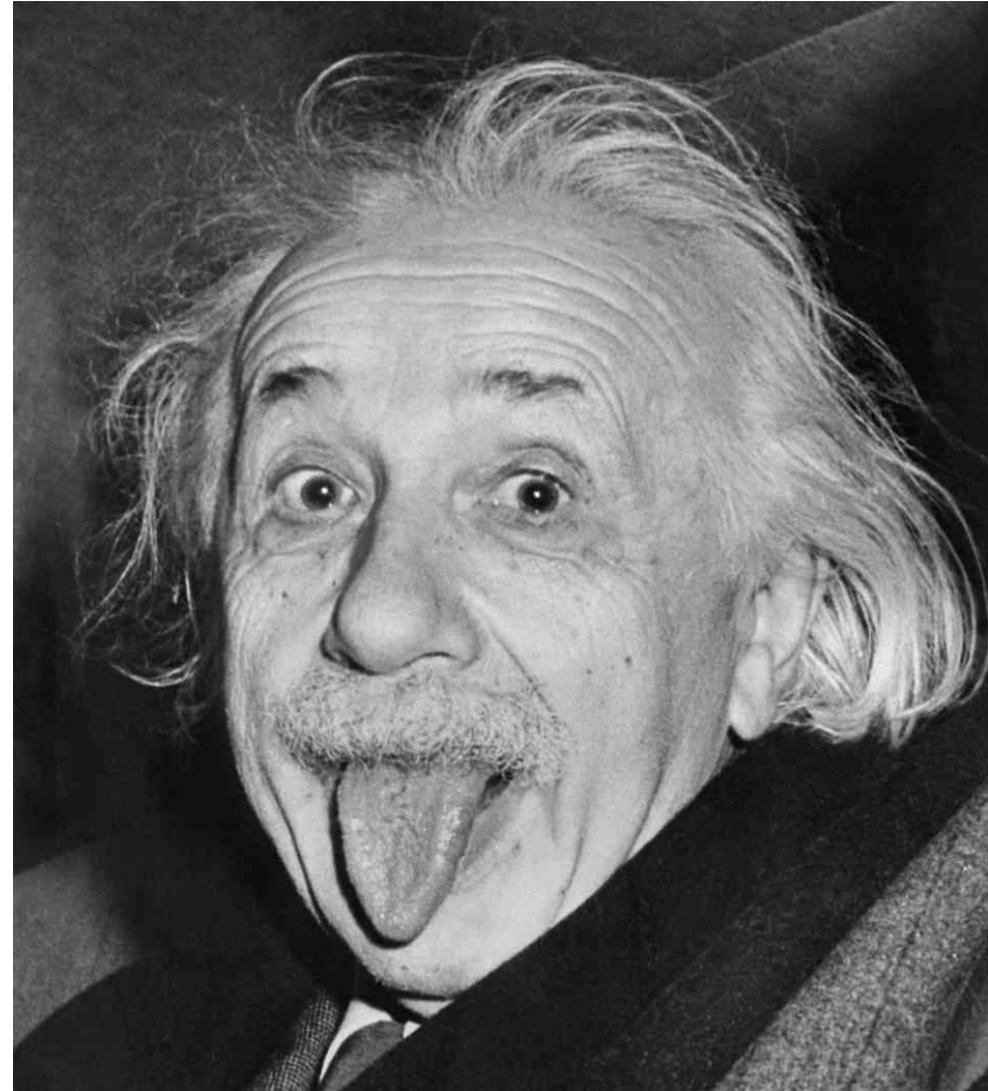


La luce è sia onda sia corpuscolo

La disputa sembrava finita con la vittoria del modello ondulatorio, quando nel 1905 il quadro si complicò di nuovo. Albert Einstein scoprì che la luce, quando incide su un metallo e provoca l'emissione di elettroni (*effetto fotoelettrico*), si comporta come se fosse costituita da una pioggia di particelle, i *fotoni*.

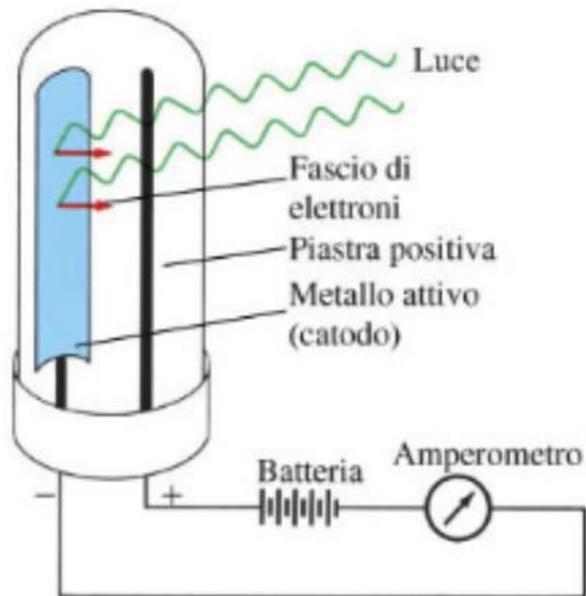
Oggi si ritiene che i modelli siano tutti e due validi, nel senso che descrivono caratteristiche diverse della luce.

In certe situazioni la luce si comporta come un'onda, in altre come un corpuscolo.



Effetto fotoelettrico

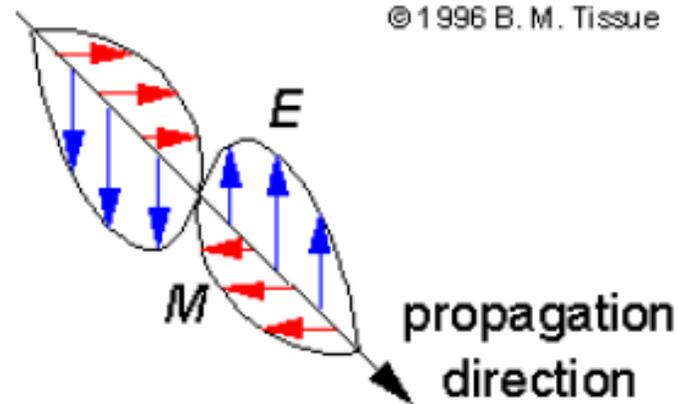
Il fenomeno che non si accorda con la natura ondulatoria della luce è l'**effetto fotoelettrico** (Hertz, 1888). Quando una radiazione elettromagnetica sufficientemente energetica colpisce la superficie di un metallo (elettrodo negativo) posto in un tubo sottovuoto, alcuni elettroni sono emessi dal metallo e creano una corrente elettrica



1. Per ogni metallo esiste una frequenza della luce ν_0 al di sotto della quale non si ha emissione di elettroni (gli elettroni emessi sono chiamati **fotoelettroni**)
2. Usando frequenze ν maggiori di ν_0 l'energia cinetica degli elettroni emessi è proporzionale a $\nu - \nu_0$.
3. Il numero di elettroni emessi è proporzionale all'intensità della luce ma la loro energia cinetica non dipende dall'intensità della luce
4. Gli elettroni sono emessi dalla superficie del metallo quasi istantaneamente, anche quando la luce ha intensità molto bassa.

Caratteristiche della radiazione

- La radiazione può essere rappresentata come
 - i) **onda elettromagnetica** costituita da un campo elettrico ed un campo magnetico periodici

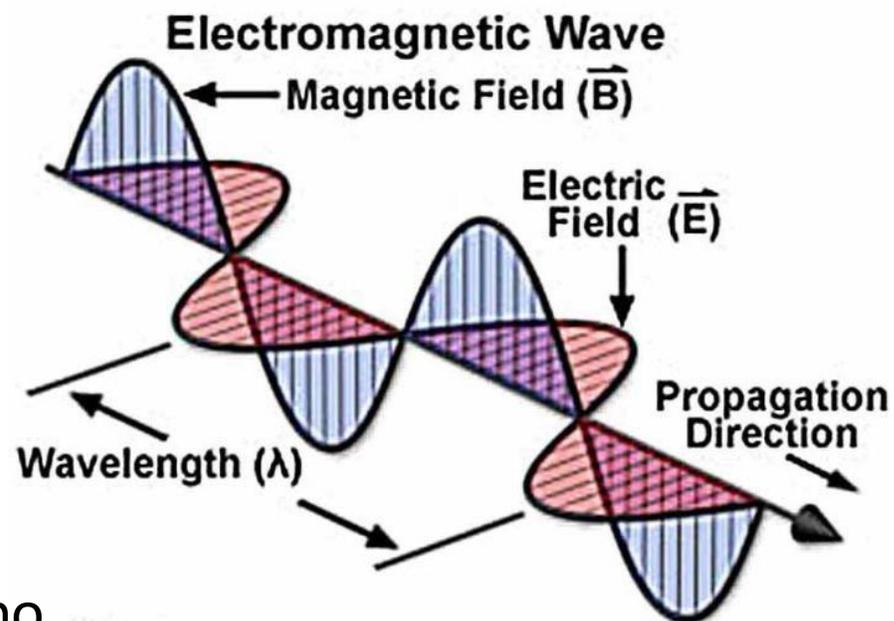


- ii) come **una serie di pacchetti discreti di energia: i fotoni.**

Radiazione elettromagnetica

La luce è un tipo particolare di **ONDA ELETTROMAGNETICA**

Un'onda elettromagnetica è costituita da un campo elettrico \vec{E} e un campo magnetico \vec{B} , che si propagano **oscillando nel tempo e nello spazio** interagendo fra loro.



Il campo elettrico e magnetico sono perpendicolari tra loro ed alla direzione di propagazione dell'onda.

Campo Elettrico

si dice che in una regione di spazio c'è un campo elettrico, quando posizionando una carica q essa subisce un'accelerazione, ovvero che è soggetta ad una forza.

Tanto maggiore è la forza, tanto più intenso è il campo elettrico:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad \vec{E} = \vec{F} / q$$

Il campo elettrico è una quantità vettoriale il cui modulo è pari al rapporto F/q , la direzione e verso sono gli stessi di F .

Campo Magnetico

è definito come quella proprietà che ha una regione di spazio in cui una carica q subisce una forza, purché sia in movimento con una certa velocità v .

La forza dovuta al campo magnetico è:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

In generale:

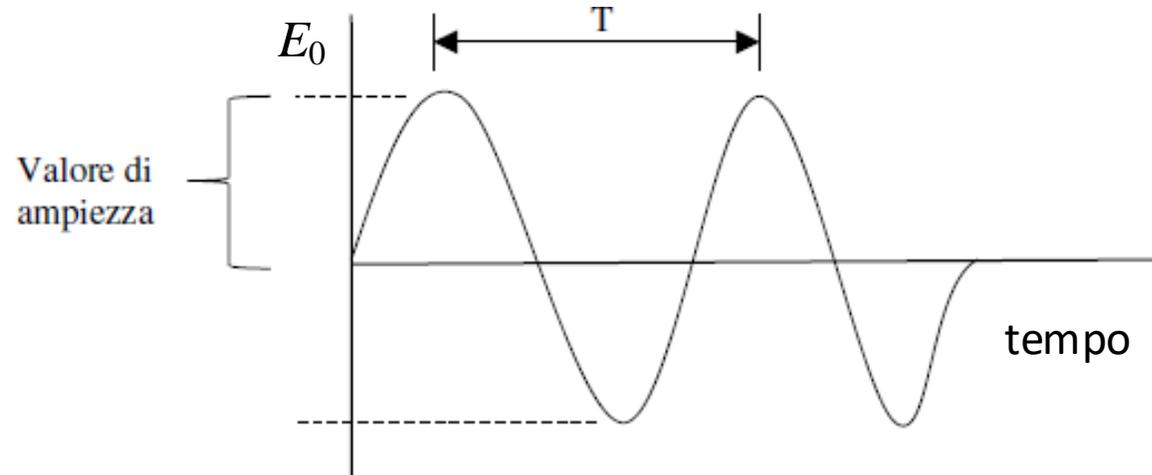
- Su una carica ferma agisce solo il campo elettrico
- Su una carica in movimento agisce sia il campo magnetico, sia quello elettrico

	E	B
CARICA FERMA	si	no
CARICA IN MOTO	si	si

Se la particella è in moto ed è soggetta contemporaneamente ad un campo elettrico e magnetico, i due effetti coesistono e si sommano (vettorialmente), cioè la forza totale è:

$$\vec{\mathbf{F}} = q \vec{\mathbf{E}} + (q \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}})$$

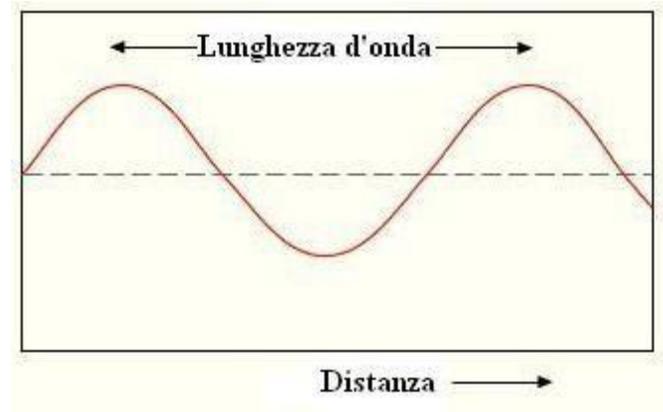
Alcune grandezze che caratterizzano una radiazione elettromagnetica



Questo grafico è una funzione sinusoidale del tempo, caratterizzata da E_0 (**ampiezza**) e T (**periodo**), che è il tempo che impiega l'onda a riassumere lo stesso valore con lo stesso andamento, cioè la stessa fase.

La **frequenza** (ν) è il numero di oscillazioni in un secondo e si ha $\nu = \frac{1}{T}$

Se il periodo è lungo, vuol dire che il processo è lento, cioè i campi variano "lentamente"; viceversa se il periodo è corto la variazione è rapida.



Questo grafico è una
funzione sinusoidale dello
spazio

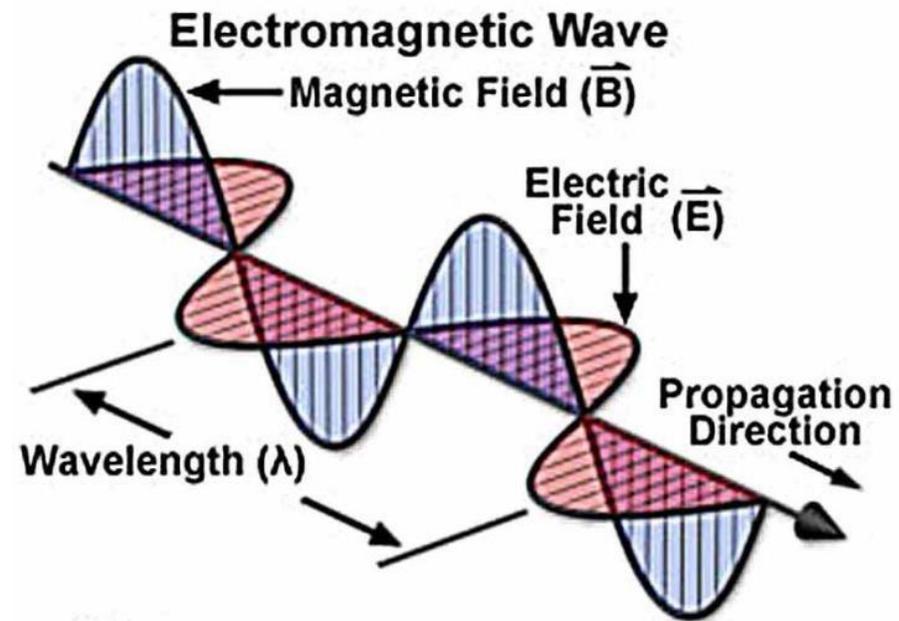
Si dice lunghezza d'onda (λ) la distanza spaziale tra due massimi dell'onda.

λ e ν sono correlate dalla seguente relazione:

$$\lambda \nu = c$$

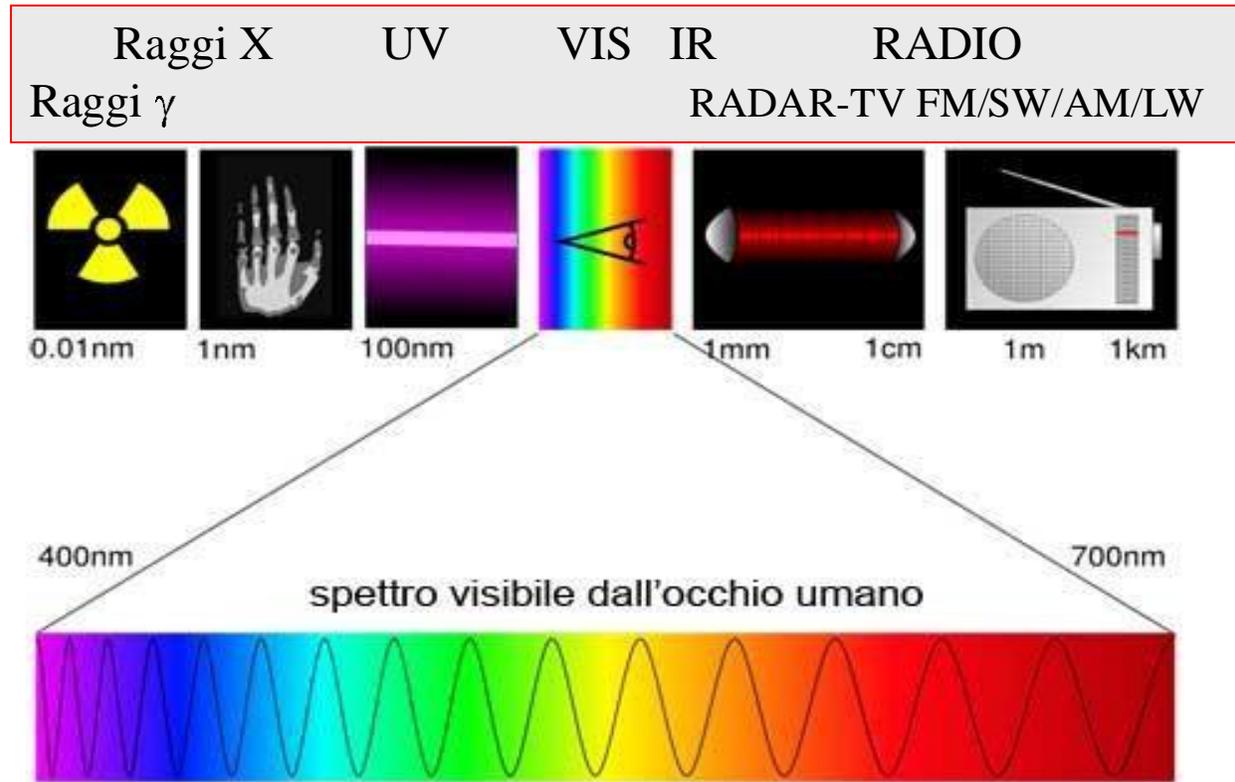
c è la velocità della luce nel vuoto $\simeq 3 \cdot 10^8$ m/s

Le onde elettromagnetiche, pur nella loro univoca natura, assumono varie forme e denominazioni (onde radio, calore, luce, raggi X, raggi gamma...) che differiscono per un parametro fondamentale, la **lunghezza d'onda**, o meglio la **frequenza di oscillazione**.



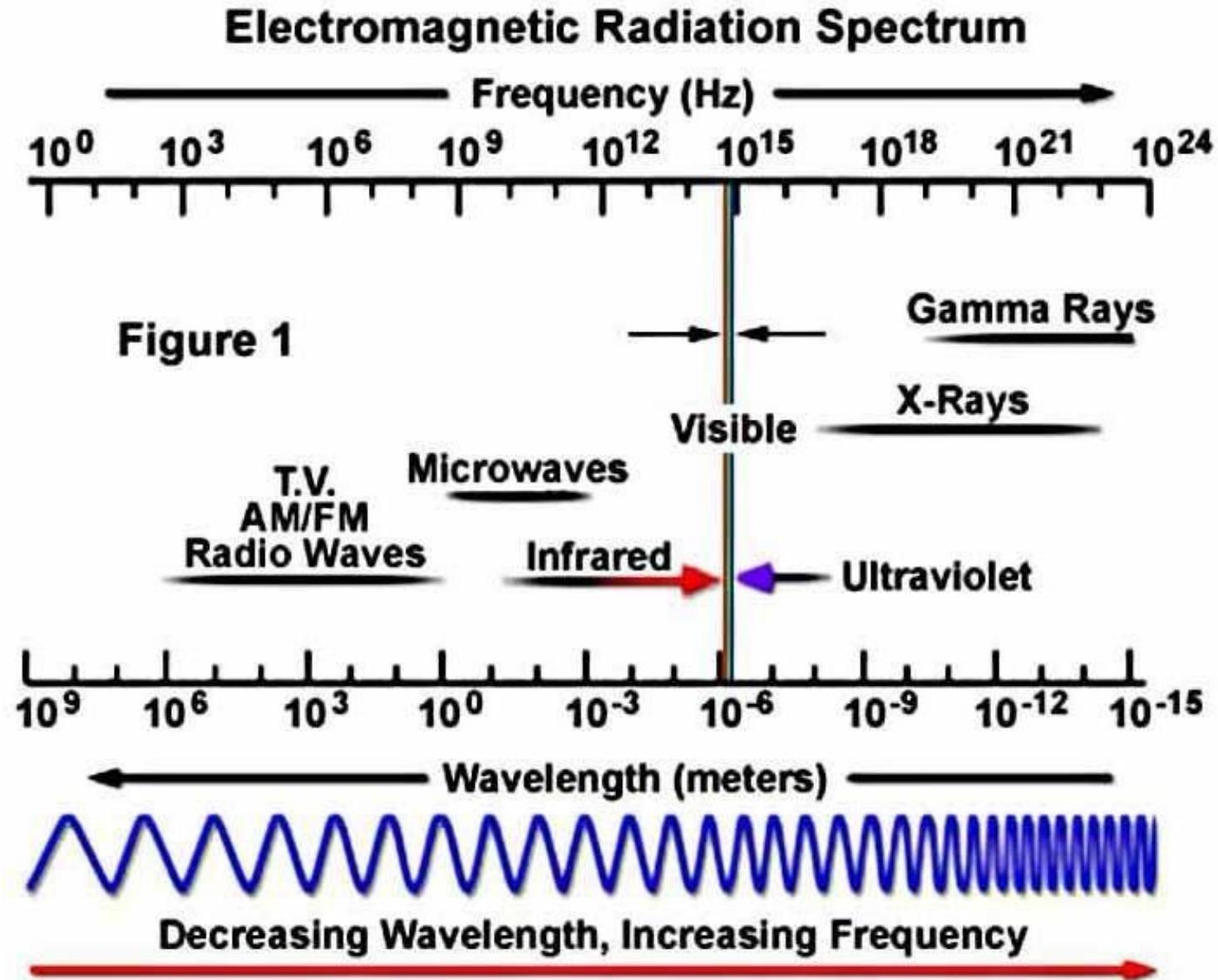
Tutte le onde elettromagnetiche sono classificate in base alle loro frequenze caratteristiche all'interno di quello che è noto come:

SPETTRO ELETTROMAGNETICO



La luce visibile occupa solo una piccola porzione della zona centrale dello spettro.

L'occhio umano è sensibile alle sole radiazioni elettromagnetiche dello spettro comprese tra 380 e 780 nm



Nella pratica comune per “etichettare” un’onda ci si riferisce a volte alla frequenza, a volte alla lunghezza d’onda, a seconda della maggiore o minore comodità di espressione del relativo numero:

-in acustica, considerando che la propagazione si studia in mezzi diversi (in aria o nei solidi o in altri fluidi), si fa riferimento alla frequenza, che varia nell’intervallo da 0,1 a 100000 Hz= 100kHz;

-per le onde radio e TV, che si studiano essenzialmente in aria (che si comporta praticamente come il vuoto) si usa la frequenza, con i multipli dell’Hz (MHz, GHz...);

-per la luce dall’ultravioletto al visibile e al vicino infrarosso si fa invece riferimento alla lunghezza d’onda *nel vuoto*, perché le frequenze tra 10^{14} e 10^{15} Hz si esprimono in modo poco comodo, mentre λ assume valori tra 150 e 2000 nm;

- nel lontano infrarosso è uso comune riferisci al numero d’onda $1/\lambda$ che assume valori dell’ordine dei cm^{-1} .

GRANDEZZE ED UNITA' PIU' COMUNI PER DEFINIRE LA RADIAZIONE

<i>GRANDEZZA</i>	<i>SIMBOLO</i>	<i>UNITA' DI MISURA</i>
Frequenza	ν	Herz (Hz) c.p.s., cicli per secondo (s^{-1})
Lunghezza d'onda	λ	m; cm, micron ($\mu = 10^{-6} m$), nanometro ($nm = m\mu = 10^{-9} m$) Angstrom ($\text{\AA} = 10^{-10} m$)
Numero d'onda	$\tilde{\nu}$	cm^{-1}
Energia	E	Joule, Erg Elettron-volt (eV) dove $1eV = 1.602 \times 10^{-12} \text{ erg}$

Fotoni

Le onde elettromagnetiche trasportano energia e trasferiscono energia in quantità definite (i fotoni). L'energia del fotone non dipende dall'ampiezza dei campi, ma solo dalla frequenza di oscillazione.

Esiste una relazione tra la frequenza di una radiazione elettromagnetica e l'energia dei fotoni associati:

$$E = h \nu = h \frac{c}{\lambda}$$

$$h = \text{costante di Planck} = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

- **Maggiore è la lunghezza d'onda (λ) di una radiazione elettromagnetiche e minore è la sua energia.**

Quindi l'energia e la lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali!!!!

- **Maggiore è la frequenza (ν) di una radiazione elettromagnetica e maggiore è la sua energia.**

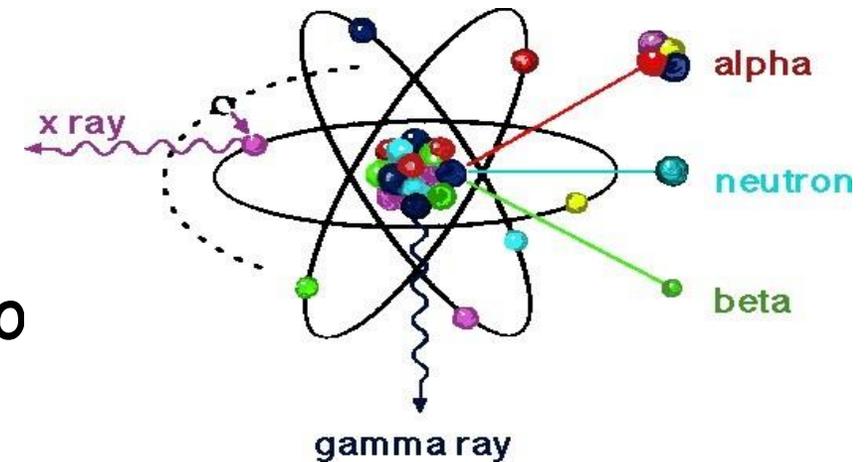
Quindi l'energia e la frequenza sono direttamente proporzionali!

Radiazioni emesse dall'atomo:

- Raggi X di frenamento
- Raggi X caratteristici

Radiazioni emesse dal nucleo

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



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 eseguire indagini metaboliche. Ad esempio, a tale scopo si impiegano *γ camere* 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 (ultravioletto, visibile e infrarosso) ha impieghi specifici. L'**ultravioletto** trova 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 contenuto. L'ultravioletto è inoltre usato per la *sterilizzazione*. Il **visibile** ha 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 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:

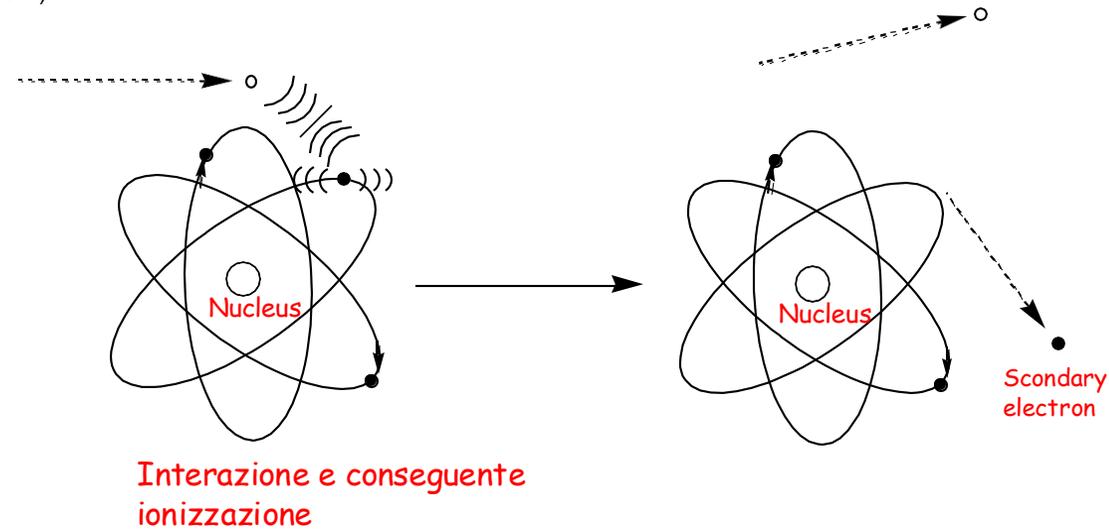


- ionizzanti
- non ionizzanti

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 -)



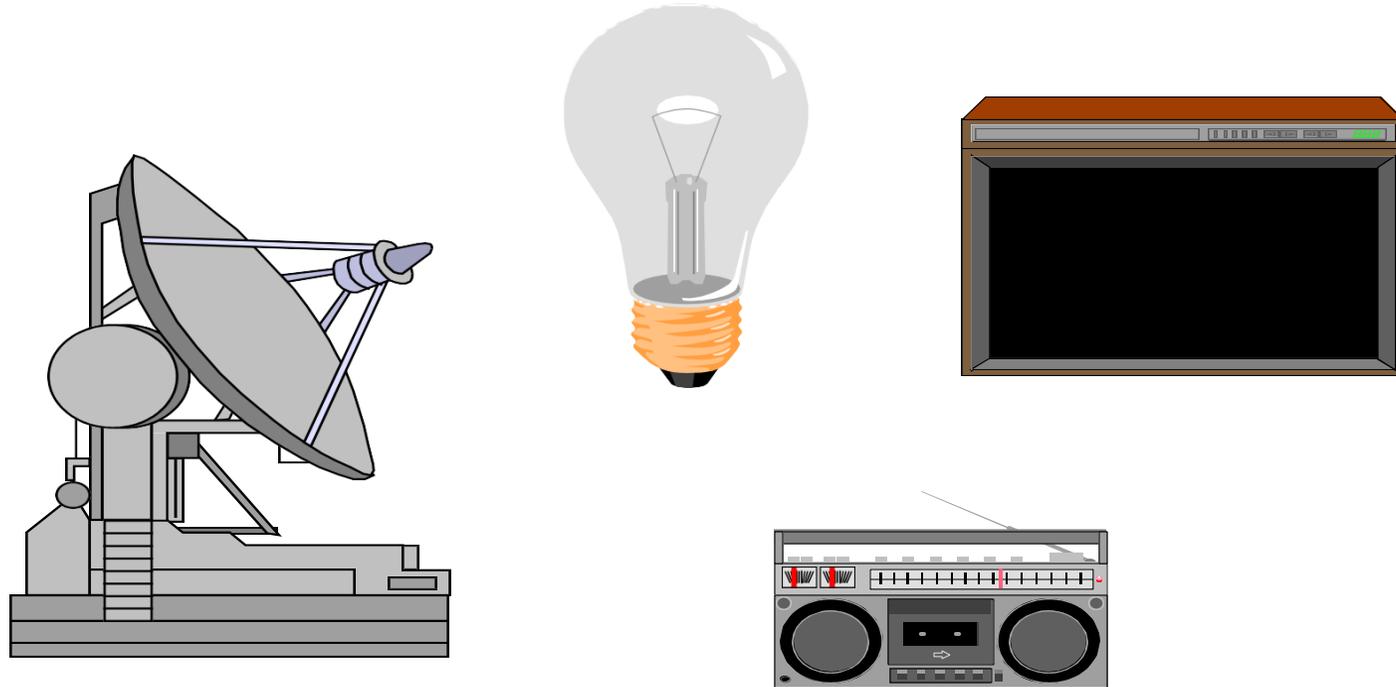
Radiazioni ionizzanti: hanno energia sufficiente ($>12 \text{ eV}$) per ionizzare i tessuti biologici

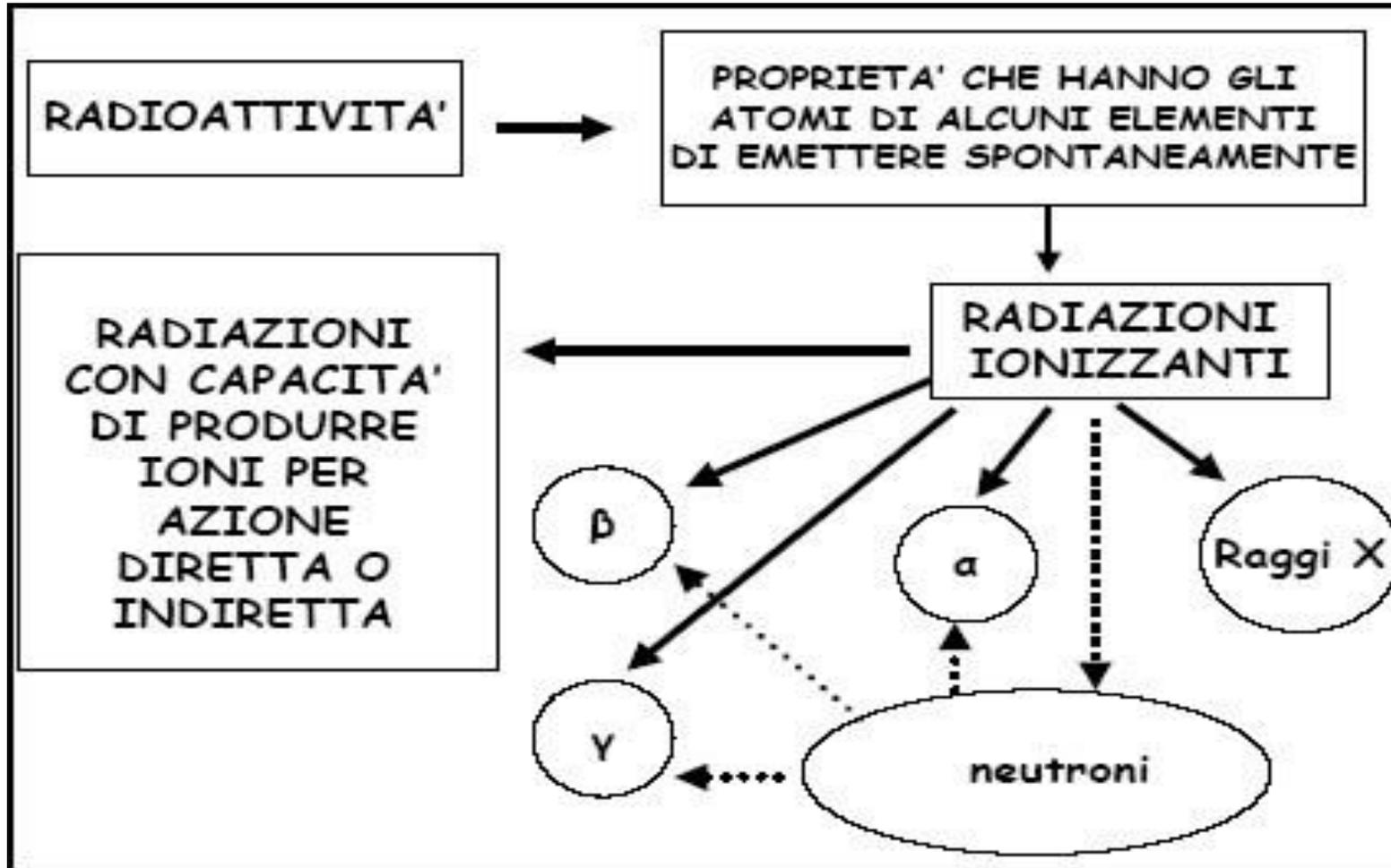
Si usa fare un ulteriore suddivisione:

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





Radioattività

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

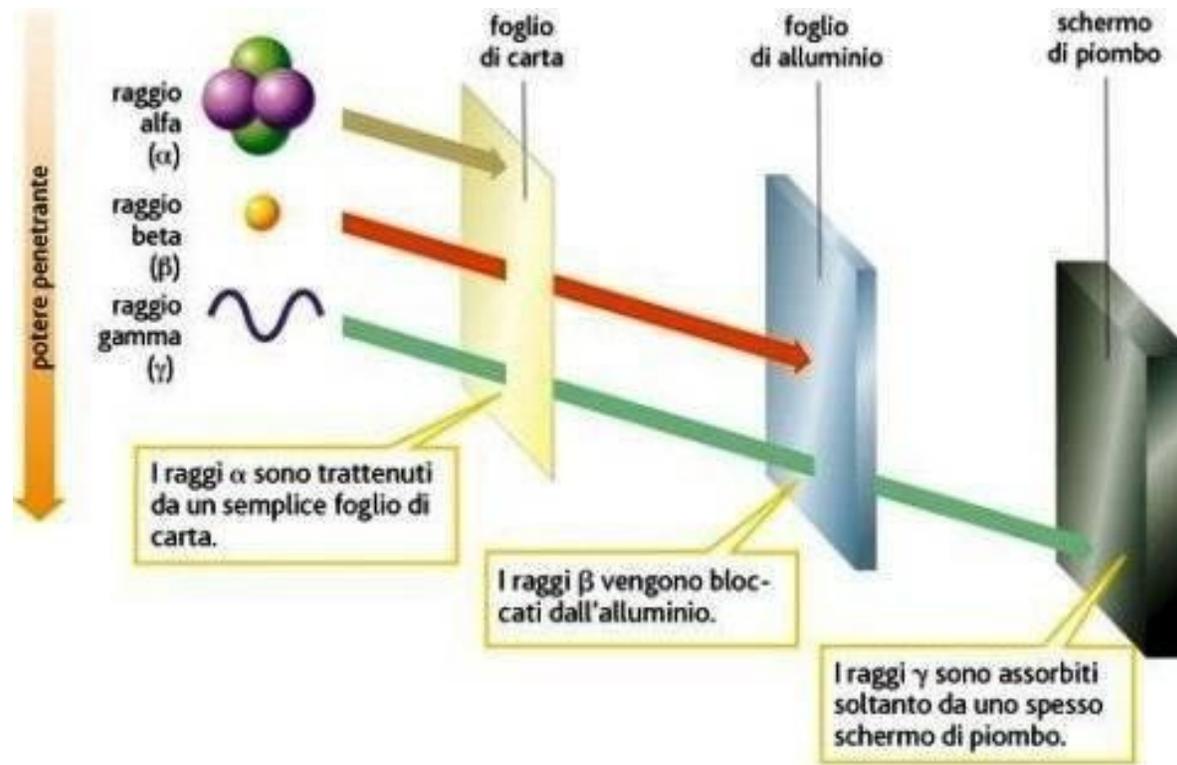
- ✓ Naturale (in quasi tutti i nuclei avente Z compreso tra 81 e 92);
- ✓ Artificiale (bombardamento del nucleo con particelle come protoni o neutroni).

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



Serie radioattiva

Interazione delle radiazioni con la materia



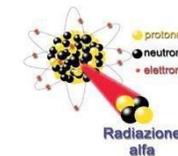
Interazioni delle particelle α con la materia

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

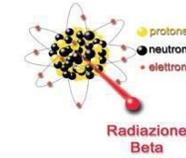
Essendo particelle di grosse dimensioni non subiscono grosse deviazioni quando attraversano la materia per cui la loro traiettoria è pressoché lineare.

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



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.

Caratteristiche elettriche dei tessuti biologici

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.

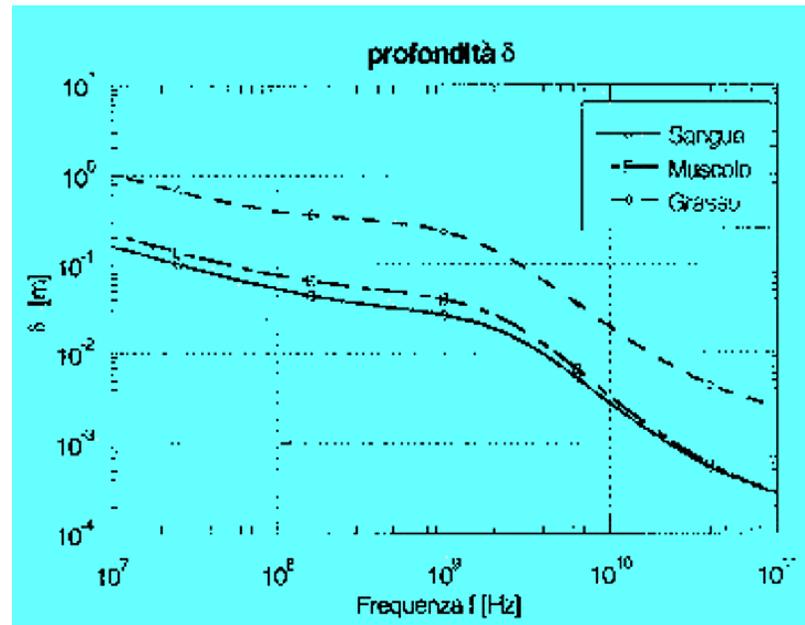
Possiamo classificare i tessuti biologici in:

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.

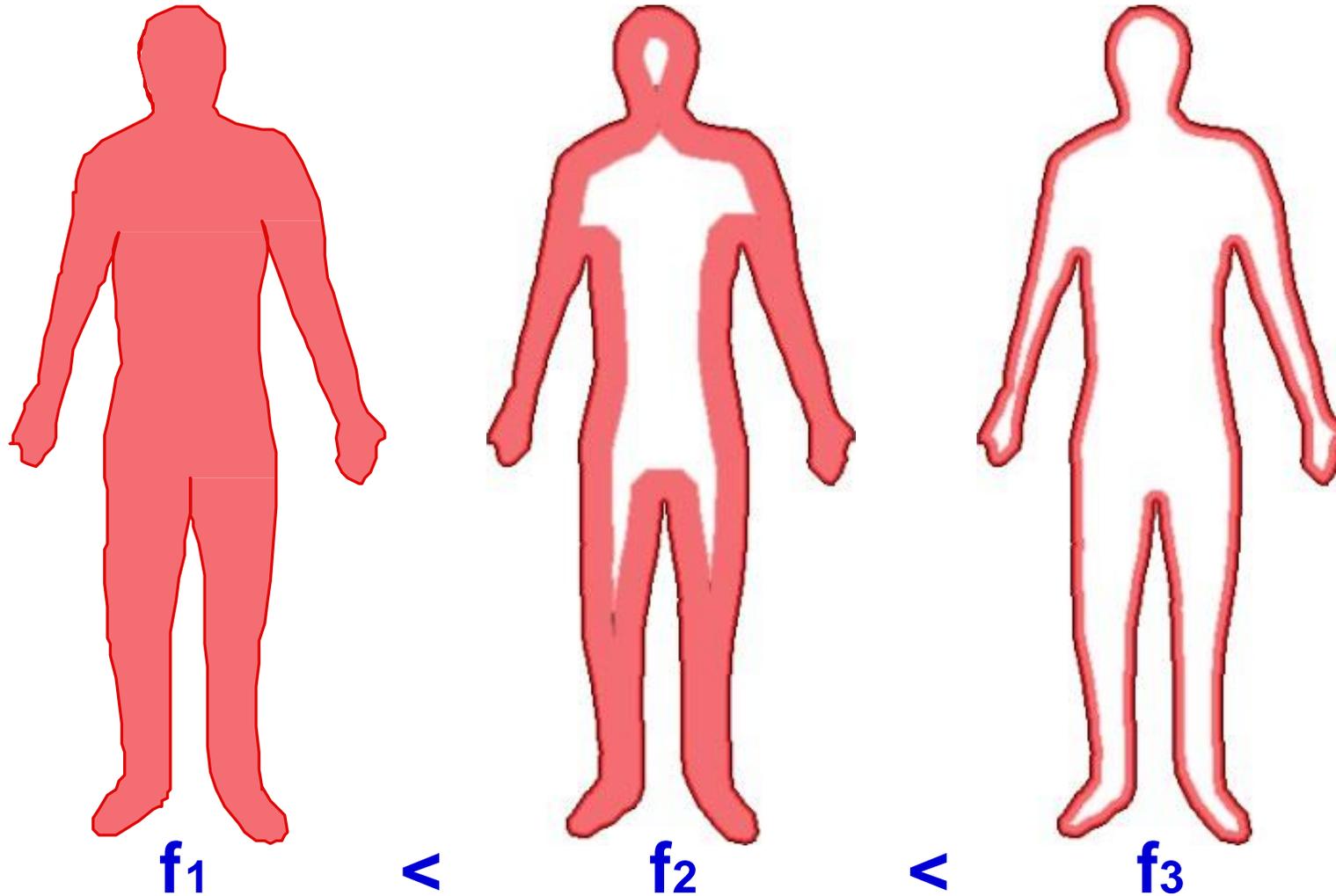
Possiamo classificare i tessuti biologici in:

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.

A parte le altissime frequenze (intorno e sopra i 10GHz), 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.



SPESSORE DI PENETRAZIONE



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:



- 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



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.

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

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

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 verificano 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