

Radiazioni (non) ionizzanti e applicazioni in medicina

Prof. Tommaso MAGGIPINTO

Esperto di Radioprotezione

Prof. Associato in Fisica Applicata, Dipartimento di Fisica

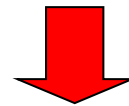
Con il termine **radiazione** si intende l'emissione e la propagazione attraverso lo spazio e la materia di **energia** a livello microscopico

CLASSIFICAZIONE DELLE RADIAZIONI

Le radiazioni possono essere 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:

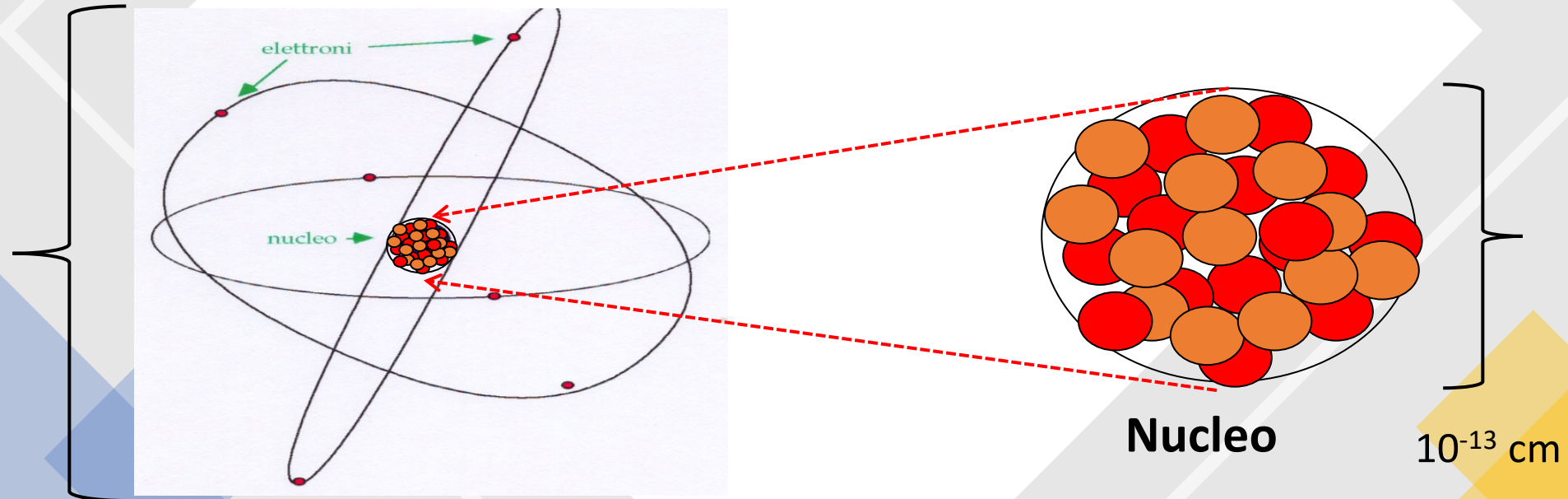


- **ionizzanti**
- **non ionizzanti**

STRUTTURA ATOMICA

Prima di introdurre le nozioni generali sulle radiazioni è utile richiamare alcuni concetti relativi alla struttura atomica della materia

L'atomo è la più piccola parte di un elemento che mantiene le caratteristiche fisiche dell'elemento stesso.



STRUTTURA ATOMICA

Il nucleo e' composto da Protoni e Neutroni interagenti tramite le **forze nucleari**

L'atomo è neutro:

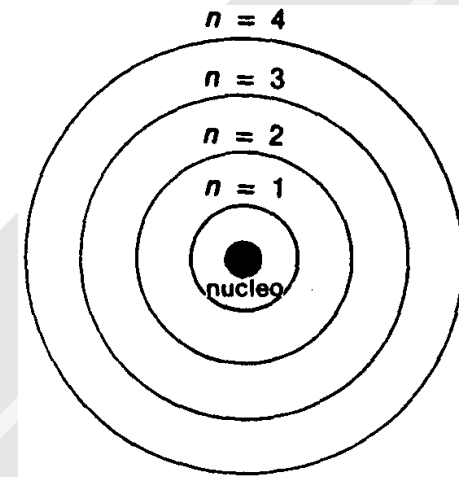
numero protoni = numero elettroni

Massa protone ~ massa neutrone ~ 2000 massa elettrone $\rightarrow M_{\text{atomo}} \approx M_{\text{nucleo}}$

$$R_{\text{atomo}} = 100.000 \cdot R_{\text{nucleo}}$$

Se l'atomo avesse le dimensioni di un pallone da basket, il nucleo avrebbe le dimensioni inferiori ad un granello di sabbia !!!

- Gli elettroni di un atomo possono muoversi su un numero discreto di orbite "quantizzate", dette orbitali atomici, ciascuna corrispondente a determinati livelli di energia.
- Ogni orbitale atomico può essere occupato da un numero massimo di elettroni, dipendente dal tipo di orbitale.
- Un' atomo è **stabile** (livello fondamentale) se gli elettroni occupano gli orbitali corrispondenti ai livelli energetici più bassi.



STRUTTURA ATOMICA

Eccitazione

Se ad un elettrone viene fornita energia dall'esterno, l'elettrone passa a ruotare su un'altra orbita (ECCITAZIONE), ma ritorna dopo un po' di tempo a ruotare nell'orbita primitiva emettendo l'energia assorbita sotto forma di onda elettromagnetica.

STRUTTURA ATOMICA

Ionizzazione

Se ad un elettrone viene fornita energia dall'esterno in quantità sufficientemente elevata, esso può essere definitivamente allontanato dall'atomo cui appartiene (IONIZZAZIONE) e l'atomo, restato privo dell'elettrone, si chiama IONE.

UNITA' DI MISURA DELL'ENERGIA

A livello atomico, l'unità di misura dell'energia non è quella abitualmente usata nella fisica del mondo macroscopico, cioè il Joule.

L'unità usata è l'elettronvolt (eV) ed i suoi multipli:

1 eV = energia acquistata da un elettrone accelerato dalla differenza di potenziale di 1 Volt

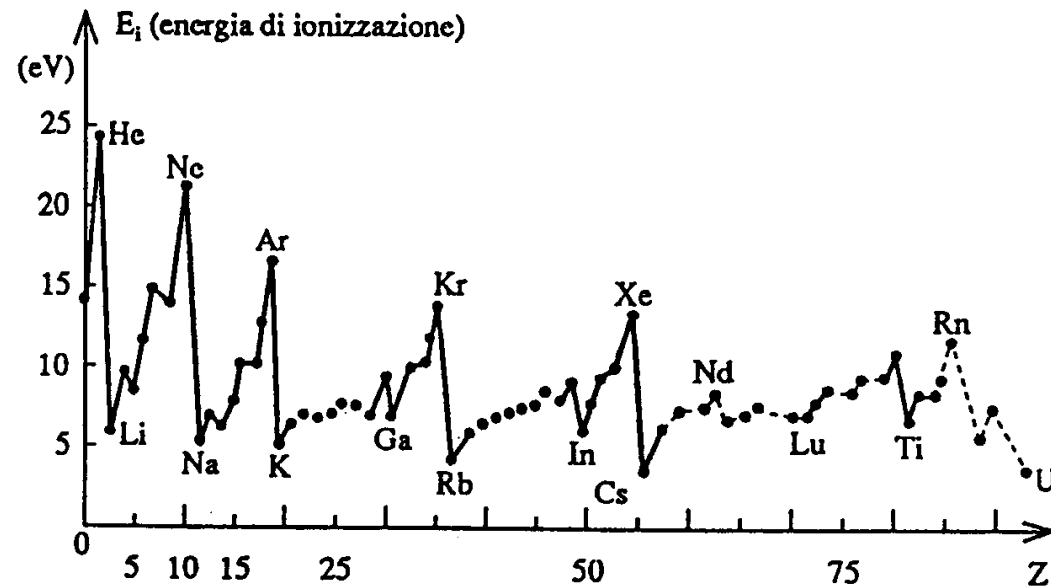
$$1 \text{ eV} = 1.6 * 10^{-19} \text{ J}$$

CLASSIFICAZIONE DELLE RADIAZIONI

Radiazioni ionizzanti:
hanno energia sufficiente (**>12 eV**)
per ionizzare i tessuti biologici.

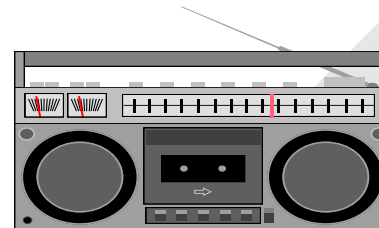
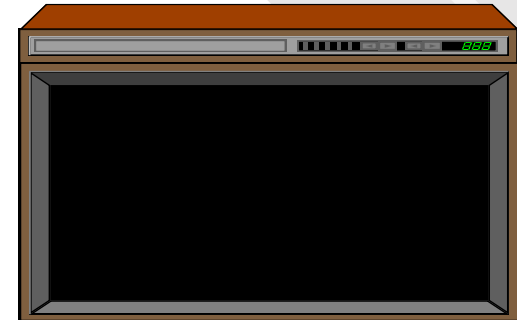
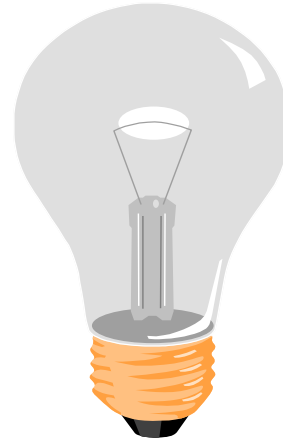
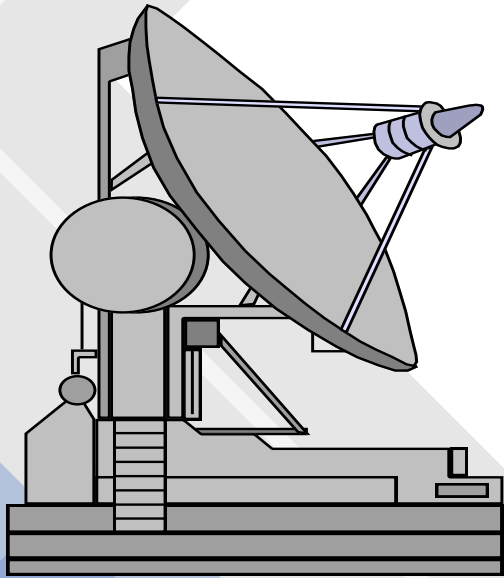
PERCHE' E'
~ 12 eV??

è il risultato di una media pesata delle energie di ionizzazione degli elementi che costituiscono i tessuti umani



CLASSIFICAZIONE DELLE RADIAZIONI

**Radiazioni NON ionizzanti:
NON hanno energia sufficiente (< 12 eV)
per ionizzare i tessuti biologici.**



TIPI DI RADIAZIONI

radiazioni elettromagnetiche ($m = 0$)

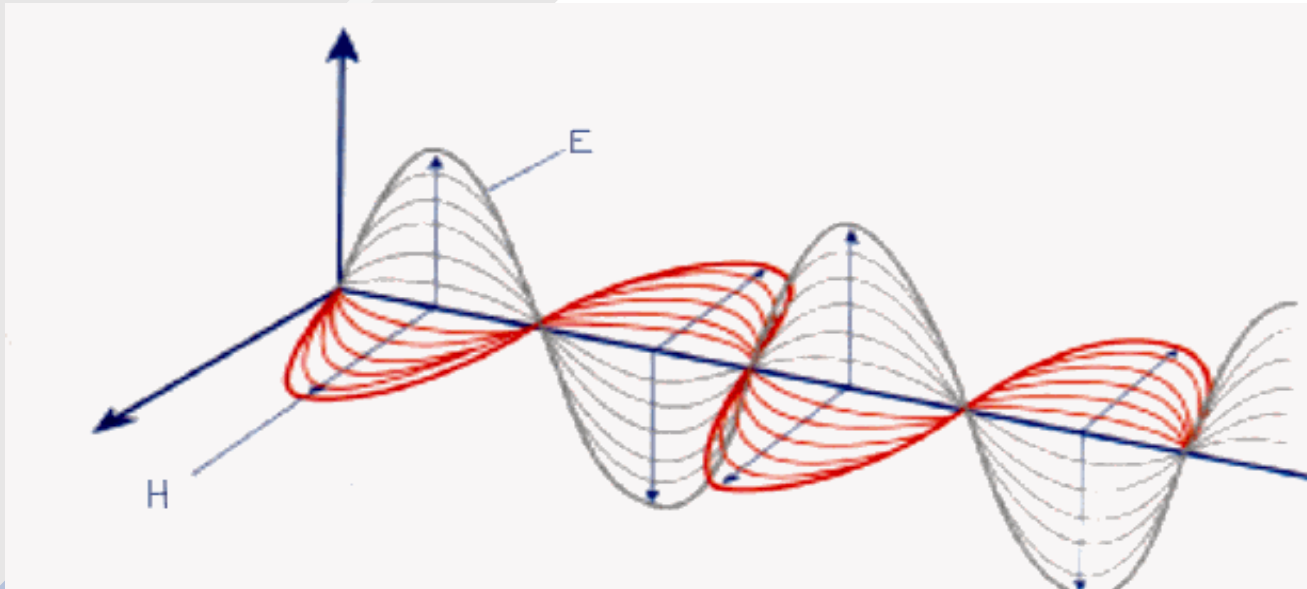
radiazioni corpuscolari ($m > 0$)

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

RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

La **radiazione elettromagnetica** è rappresentata da un campo elettrico e un campo magnetico perpendicolari tra loro.



La velocità di propagazione nel vuoto è 3×10^8 m/sec

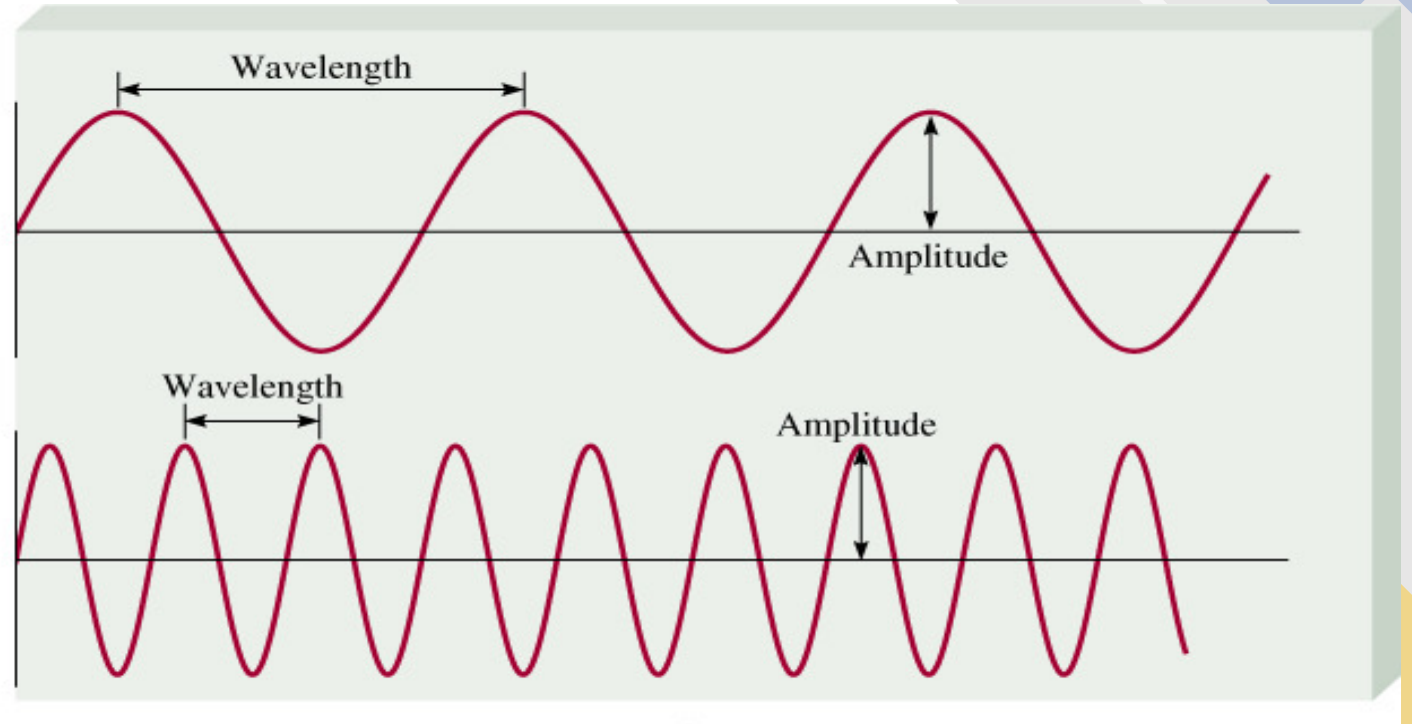
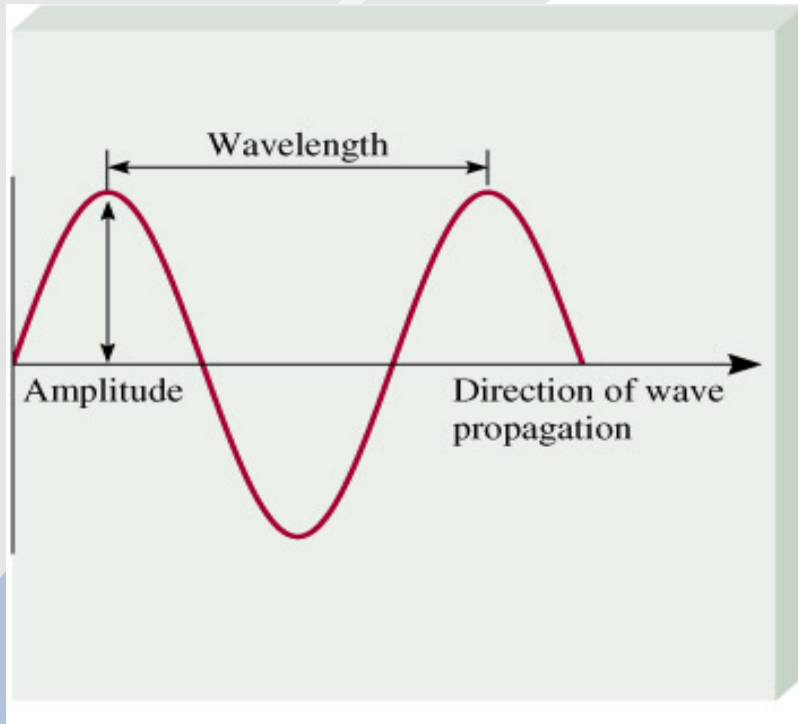
Questa è la velocità della luce !

RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

Lunghezza d'onda (λ): distanza lineare tra due massimi successivi di un'onda

Ampiezza: distanza verticale tra un massimo e l'asse delle x

Frequenza (ν): numero di oscillazioni del campo in 1 secondo (Hz = 1 ciclo/s)



RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

Modello corpuscolare

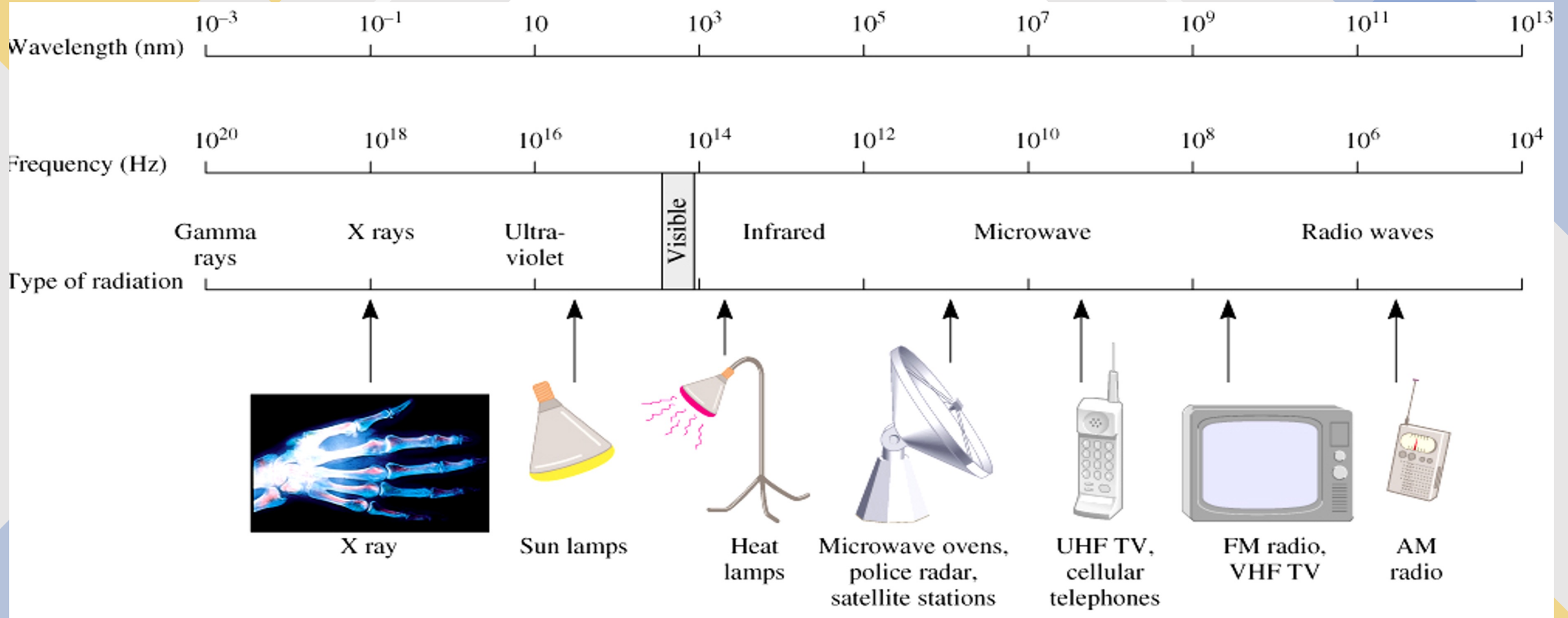
- ◆ Nei processi di trasferimento di energia, la radiazione elettromagnetica si comporta come una particella priva di massa, ma dotata di energia, il FOTONE.
- ◆ L'energia di un fotone dipende dalla frequenza (ν) della radiazione

$$E_{\text{fotone}} = h\nu$$

$$h \text{ (costante di Planck)} = \underline{6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}}$$

RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

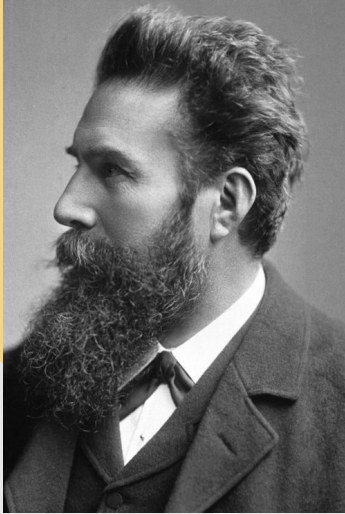
Spettro elettromagnetico



RADIAZIONE CORPUSCOLARE

- ✓ **Particelle cariche leggere:** elettroni e positroni;
- ✓ **Particelle cariche pesanti:** Protoni, ioni pesanti, particelle alfa (nucleo di He-4)
- ✓ **Particelle neutre:** Neutroni

BREVISSIMI CENNI STORICI



1895

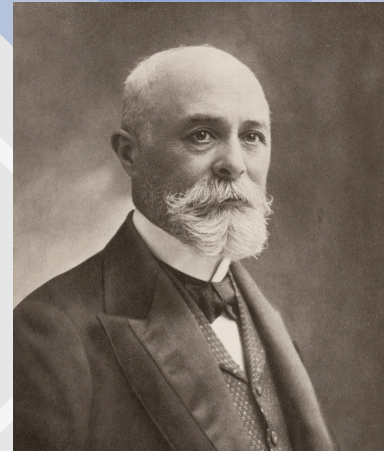
Konrad Röntgen

SCOPERTA DEI RAGGI X

1896

Henry Becquerel

**SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITÀ
NATURALE DELL'URANIO**



1898

Coniugi Curie

**SCOPERTA DELLE PROPRIETÀ
RADIOATTIVE DEL POLONIO E DEL RADIO**

SORGENTI DI RADIAZIONI IONIZZANTI

Fonti NATURALI di Radiazioni Ionizzanti:

raggi cosmici primari e secondari

(protoni, particelle α , mesoni, elettroni, fotoni, neutroni)

decadimento radioattivo di nuclidi naturali presenti nella crosta terrestre

(particelle α e β , raggi γ)

SORGENTI DI RADIAZIONI IONIZZANTI

Fonti ARTIFICIALI di Radiazioni Ionizzanti:

**strumenti di
uso quotidiano**

(rilevatori di incendio, rilevatori di umidità,
insegne luminose, quadranti d'orologio...)

**strumenti di
uso industriale**

(rilevatori di difetti nelle saldature,
apparecchi per la sterilizzazione...)

**strumenti di
uso medico**

(radiologia, uso di radioisotopi sia per
diagnosi che per terapia...)

**ricerca
scientifica**

(uso di traccianti radioattivi,
diffrazione, analisi per fluorescenza ...)



DECADIMENTO RADIOATTIVO

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

${}^A_Z X_N$ o spesso più semplicemente ${}^A_Z X$ dove:

- 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 $N=A-Z$



isotopi

DECADIMENTO RADIOATTIVO

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

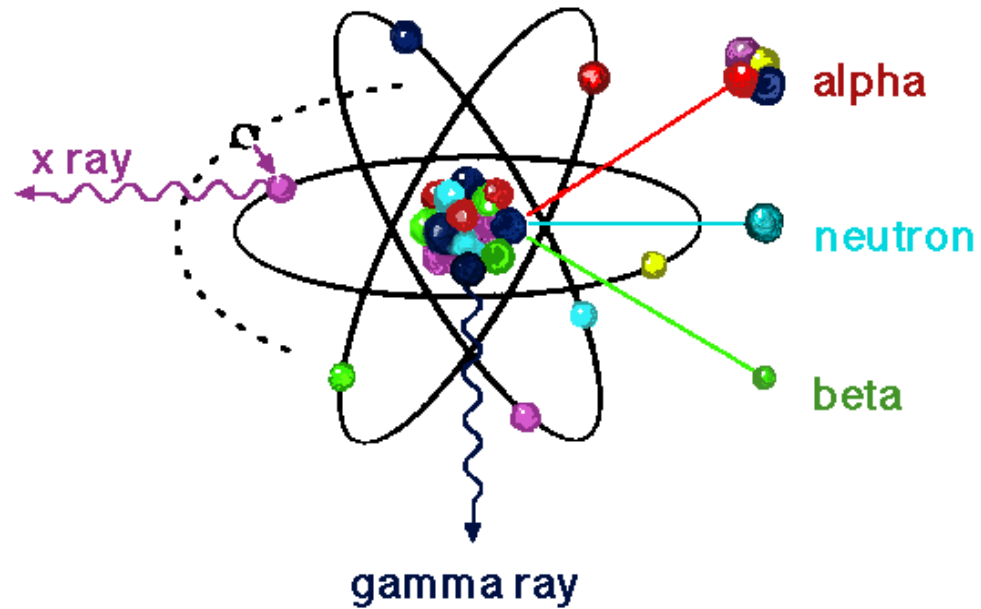
DECADIMENTO RADIOATTIVO

Radiazioni emesse dall'atomo:

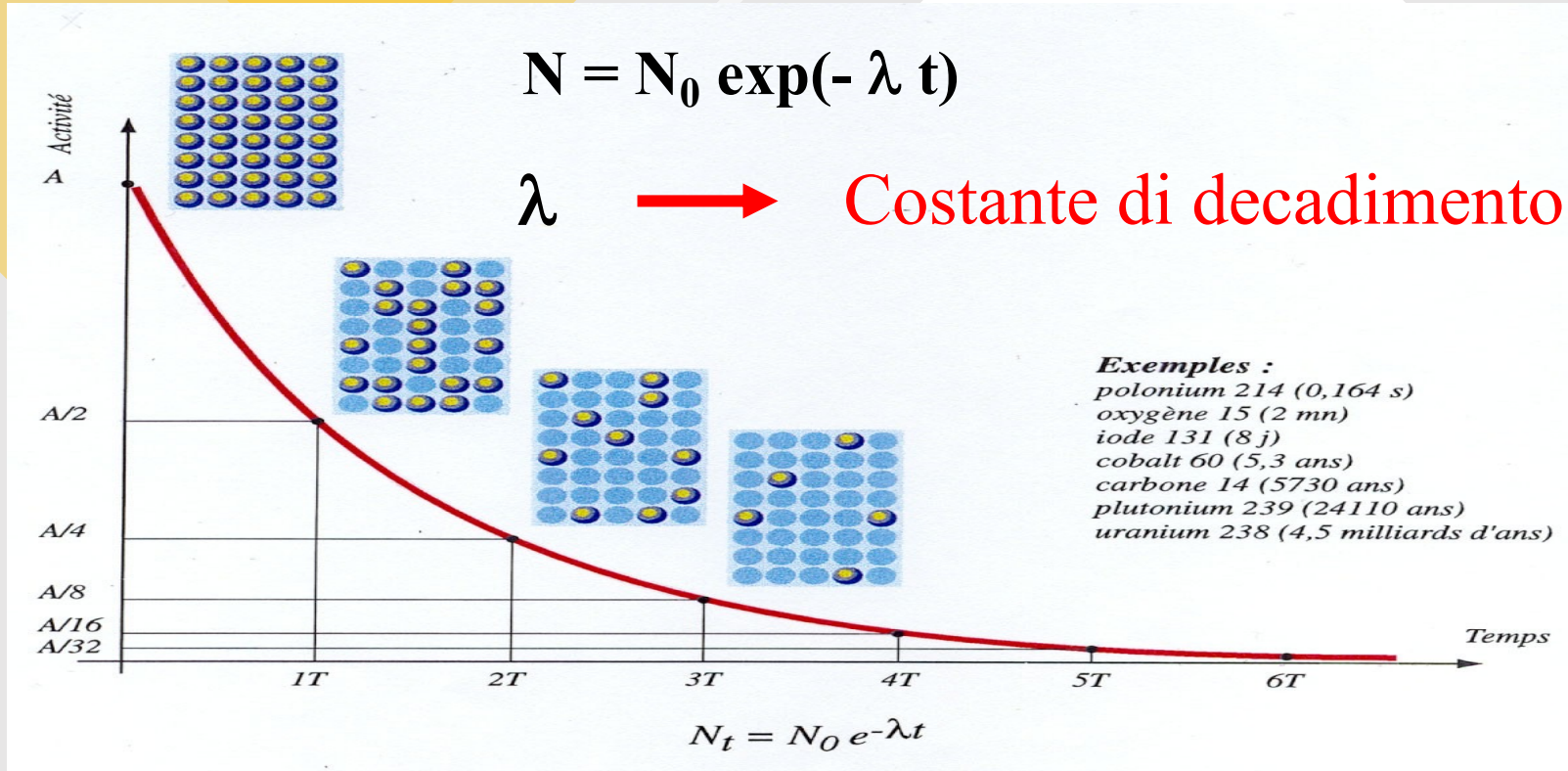
- Raggi X caratteristici

Radiazioni emesse dal nucleo

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



LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO



La velocità di decadimento è detta **Attività (A)**

Essa si misura in Bequerel (**Bq**)
1 Bq = 1 dps (una disintegrazione al sec.)

In passato si usava il Curie (Ci), 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ dps = 37 GBq

TEMPO DI DIMEZZAMENTO

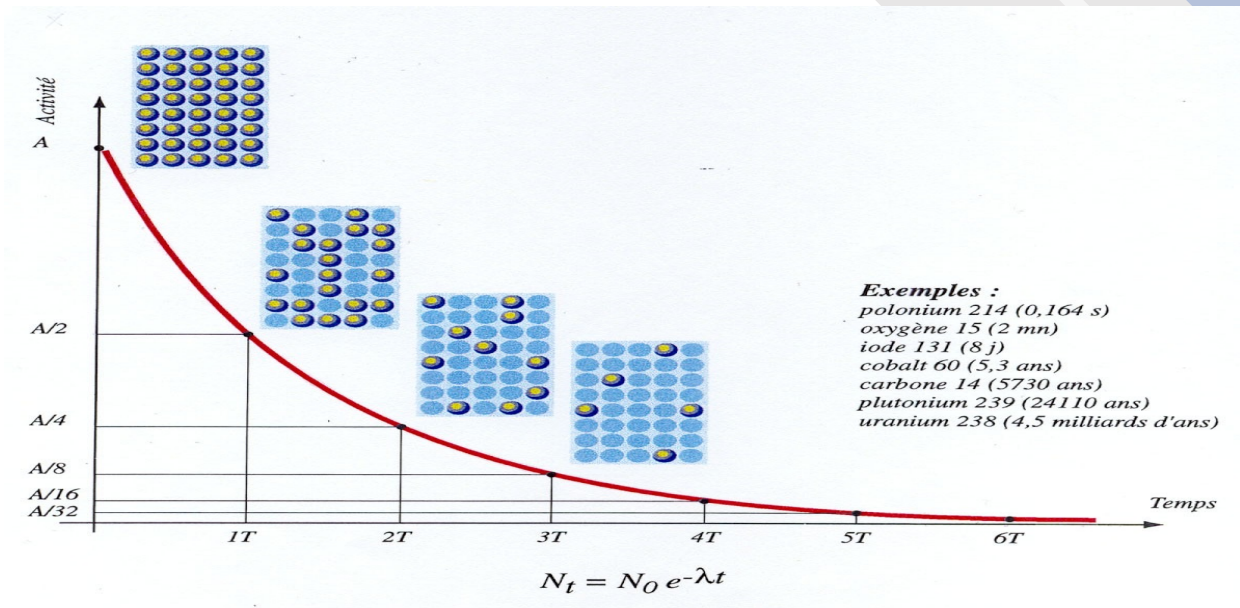
Il decadimento può avvenire in tempi assai brevi o molto lunghi. La misura di tale tempo è data dal TEMPO DI DIMEZZAMENTO o TEMPO DI VITA MEDIA cioè il tempo alla fine del quale la metà degli atomi radioattivi inizialmente presenti ha subito una trasformazione spontanea

Radioisotopo artificiale
Iodio-131: 8 giorni

Radioisotopo naturale
Potassio-40:
1,3 miliardi di anni

Radioisotopo artificiale
Tecnezio-99: 6 ore

Dopo 10 tempi di dimezzamento la radioattività di un isotopo è circa 1000 volte minore di quella iniziale



MACCHINE RADIOGENE

Sono sostanzialmente i tubi a raggi X e gli acceleratori di particelle

Tre informazioni essenziali:

1. Quando sono “spente” non emettono radiazioni (SALVO ATTIVAZIONE DEI MATERIALI)
2. Quando sono “accese” producono flussi di radiazioni molto intensi e in direzioni ben precise: non basta stare distanti ... bisogna evitare di sostare nella direzione del flusso.
3. Possono dare solo irradiazione esterna

Rappresentazione realistica di un tubo a raggi X

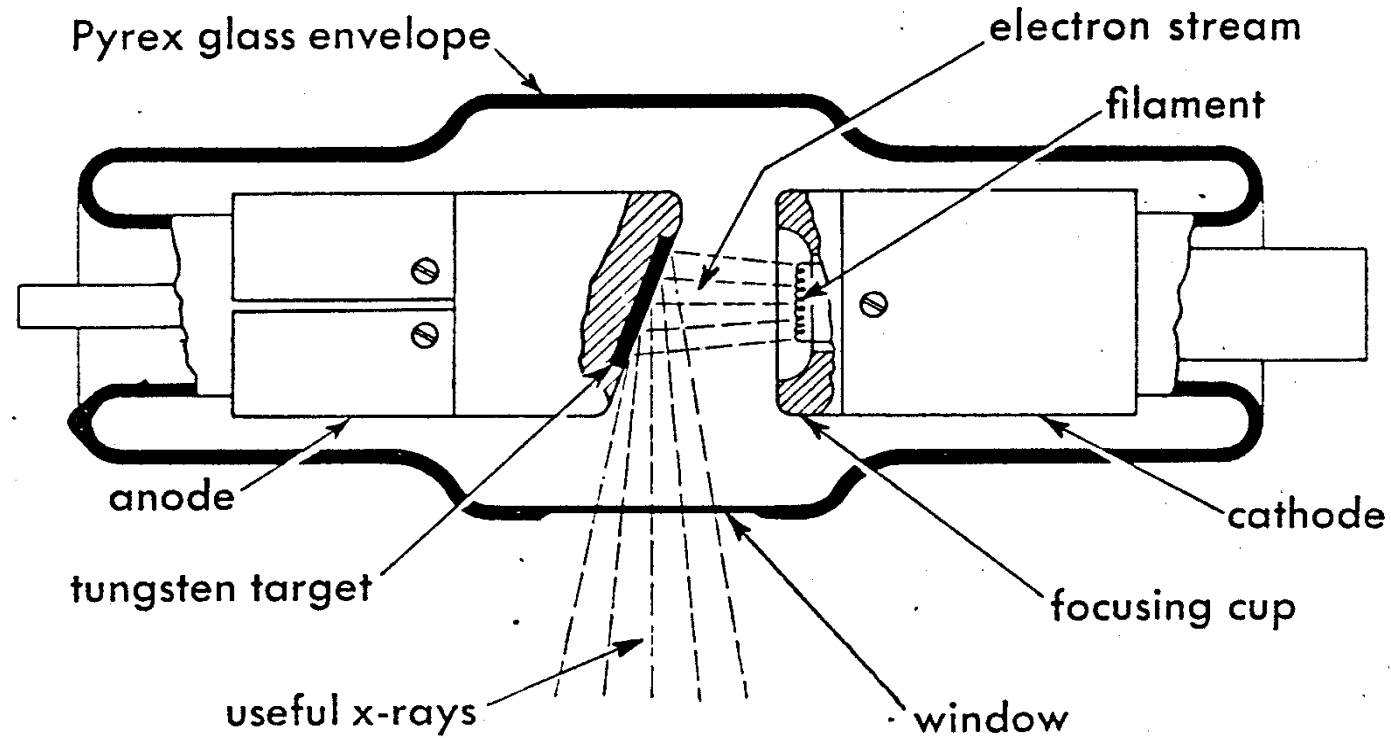


Fig. . 2. A modern Coolidge type of x-ray tube. (Courtesy of the General Electric X-ray Corp.)

SORGENTI di RADIAZIONI IONIZZANTI

Macchine
radiogene

Apparecchi
a raggi X

Acceleratori
di particelle

Macchine radiogene: apparecchi che emettono radiazioni ionizzanti solo quando sono in funzione.

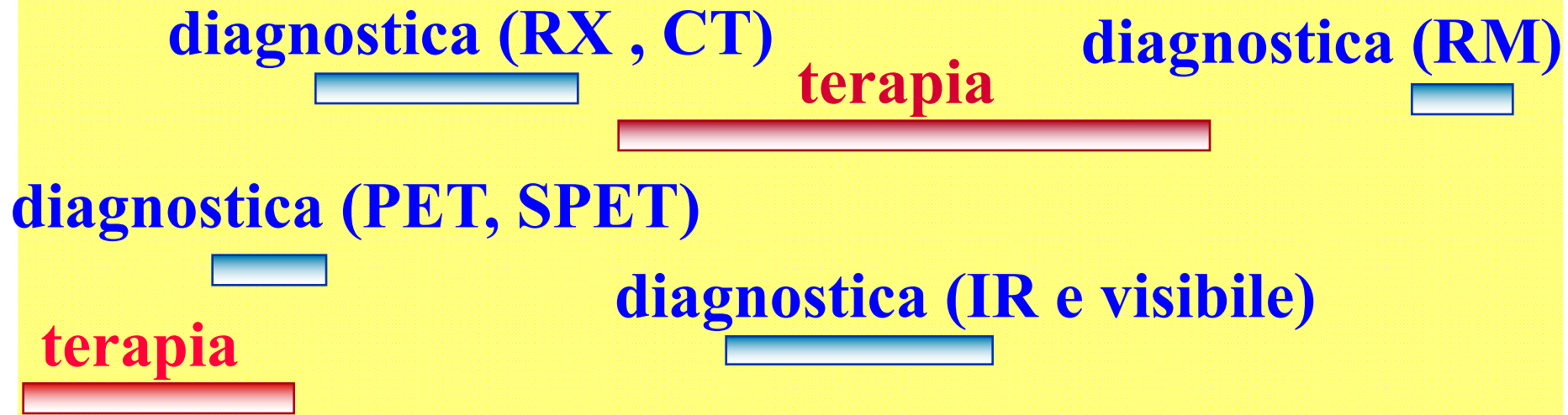
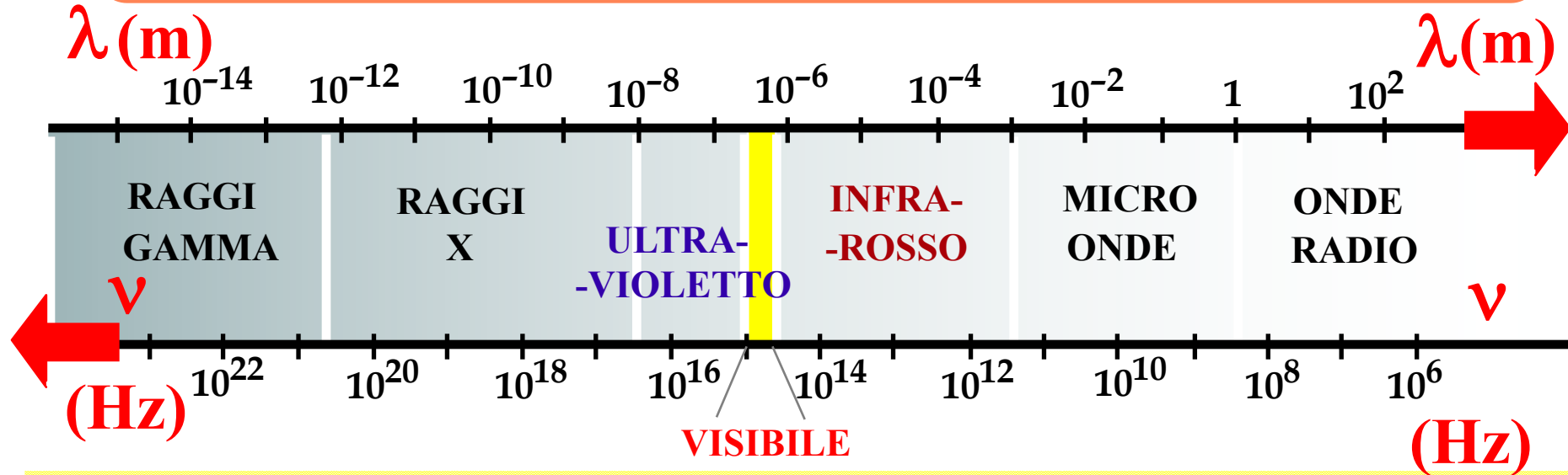
Sostanze
radioattive

Sorgente
sigillata

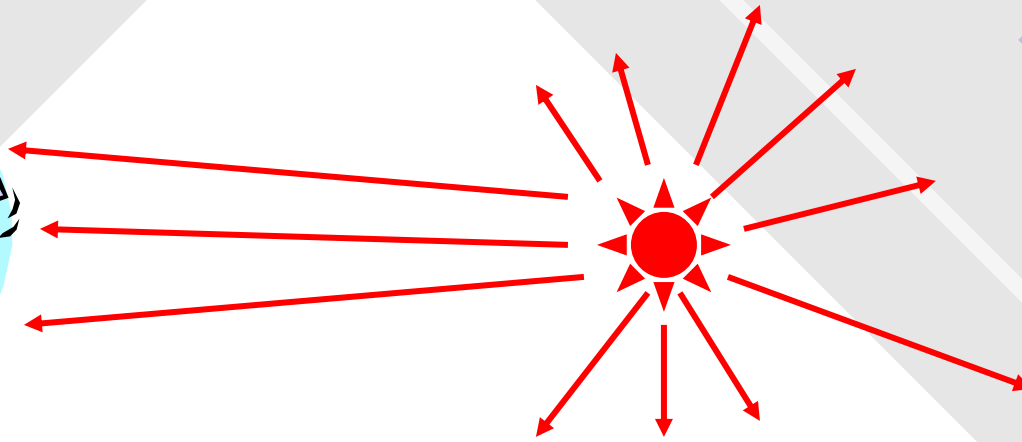
Sorgente
NON Sigillata

Sorgenti radioattive: composti solidi, liquidi o gassosi contenenti isotopi radioattivi che emettono continuamente radiazioni ionizzanti.

SPETTRO ELETTROMAGNETICO : impiego



INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI CON LA MATERIA

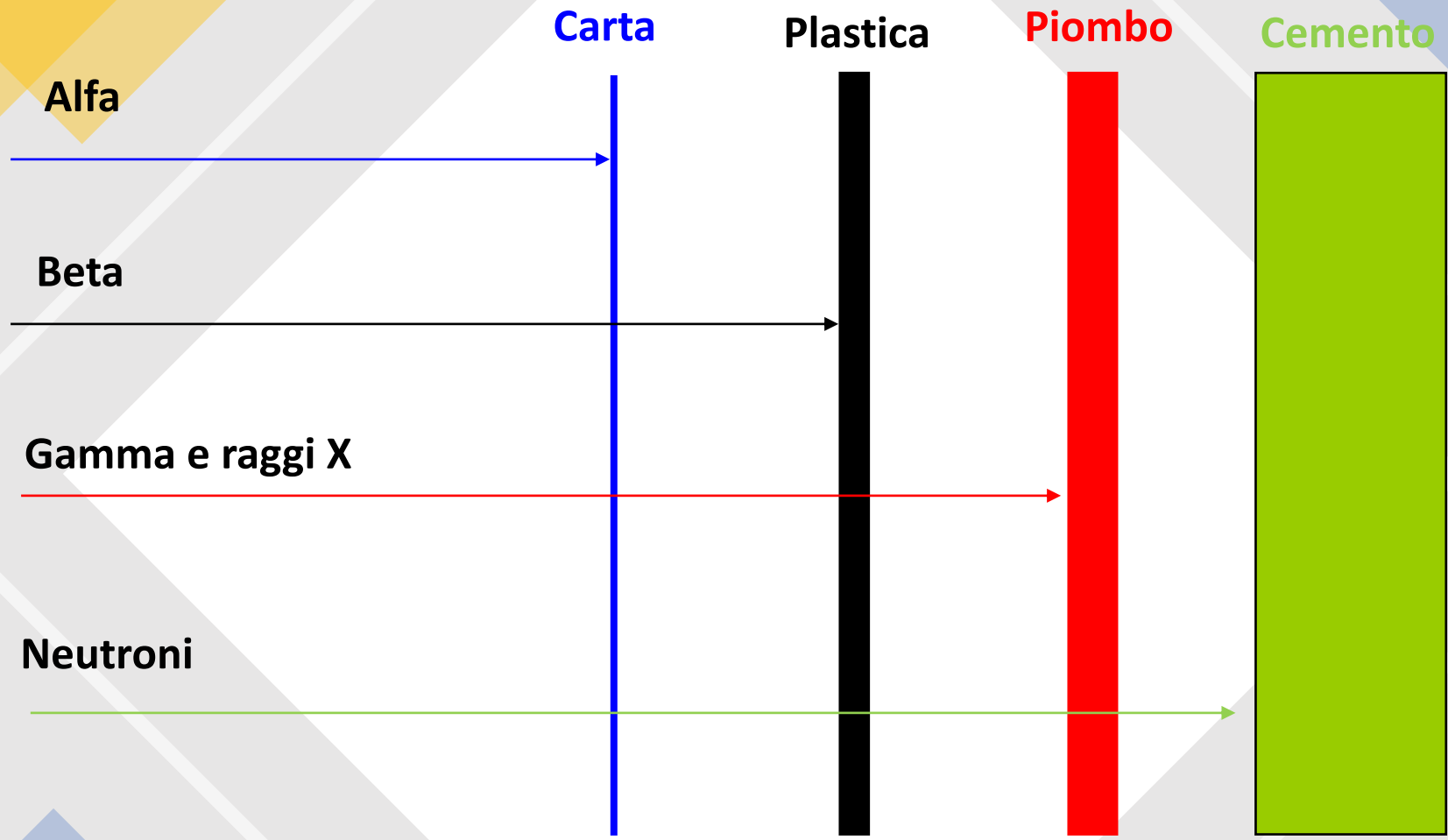


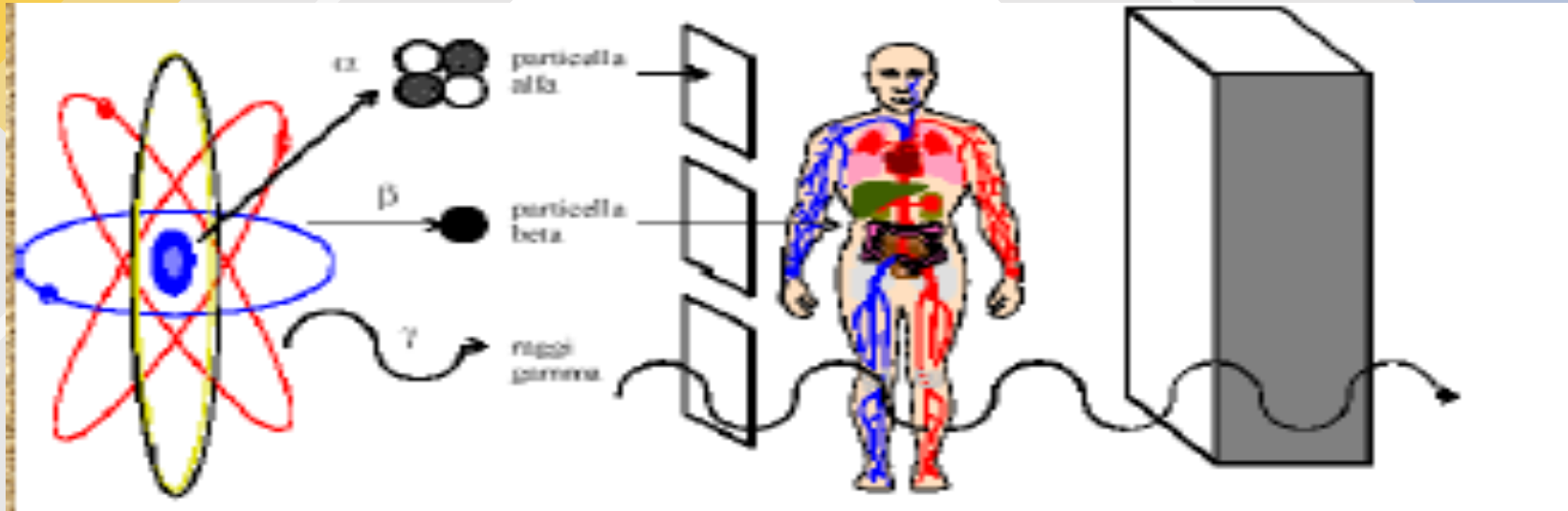
Le radiazioni ionizzanti interagiscono con la materia circostante **depositando in essa la loro energia.**

L'energia depositata nei tessuti organici provoca un **danno biologico.**

Scopo della radioprotezione e' appunto quello di valutare ed impedire (o quanto meno limitare) il danno biologico sia ai lavoratori professionalmente esposti che al pubblico.

TIPI DI RADIAZIONE A CONFRONTO



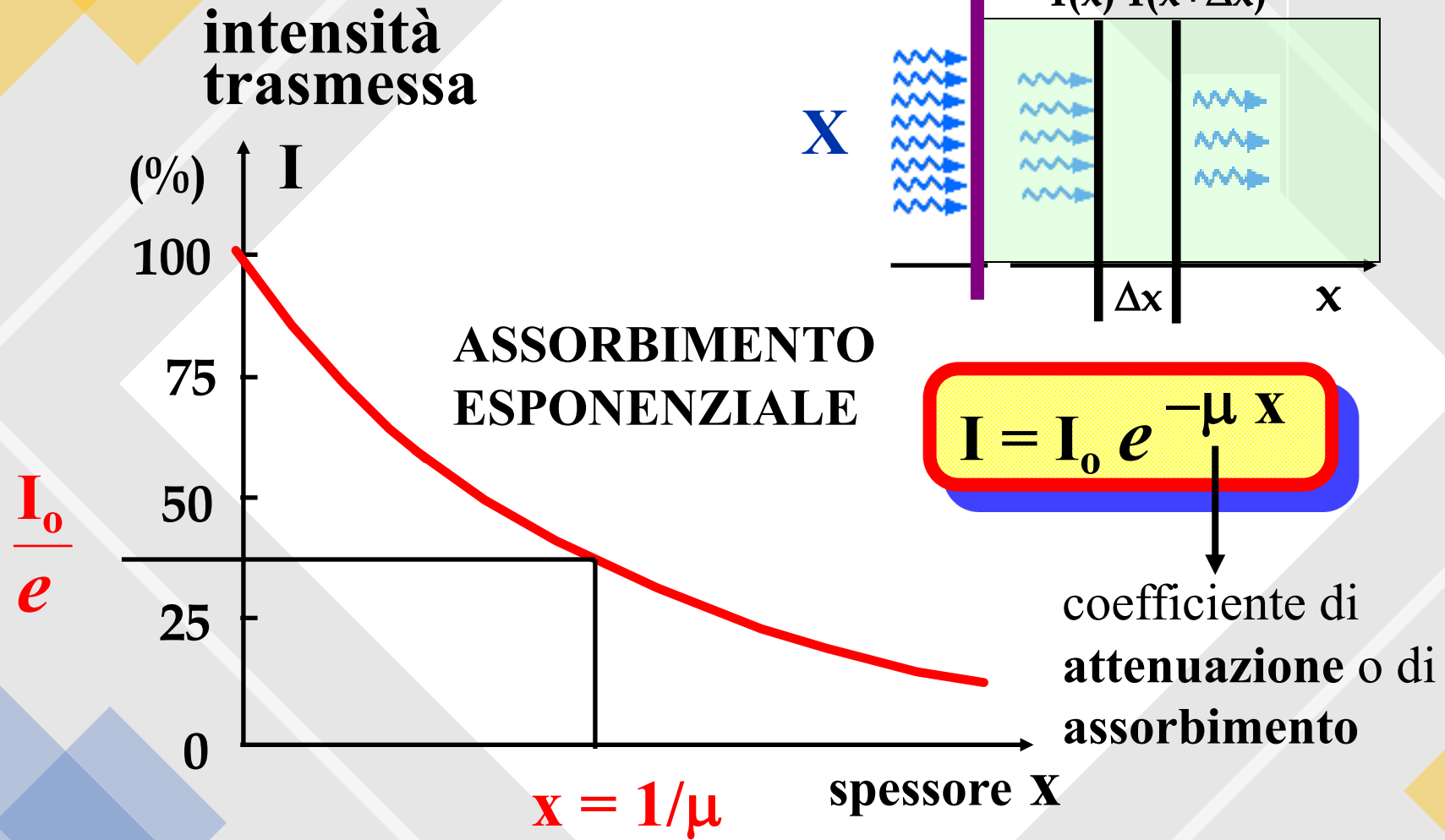


Particelle alfa: penetrazione molto limitata nell'aria. Un foglio di carta è sufficiente per fermarle

Particelle beta: percorrono qualche metro nell'aria. Un foglio di alluminio di alcuni mm è sufficiente ad arrestarle

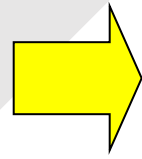
Raggi X o gamma: penetrazione molto elevata. In funzione dell'energia possono arrivare a centinaia di metri nell'aria. Alcuni mm/cm di piombo permettono di schermarle

ASSORBIMENTO DEI RAGGI X

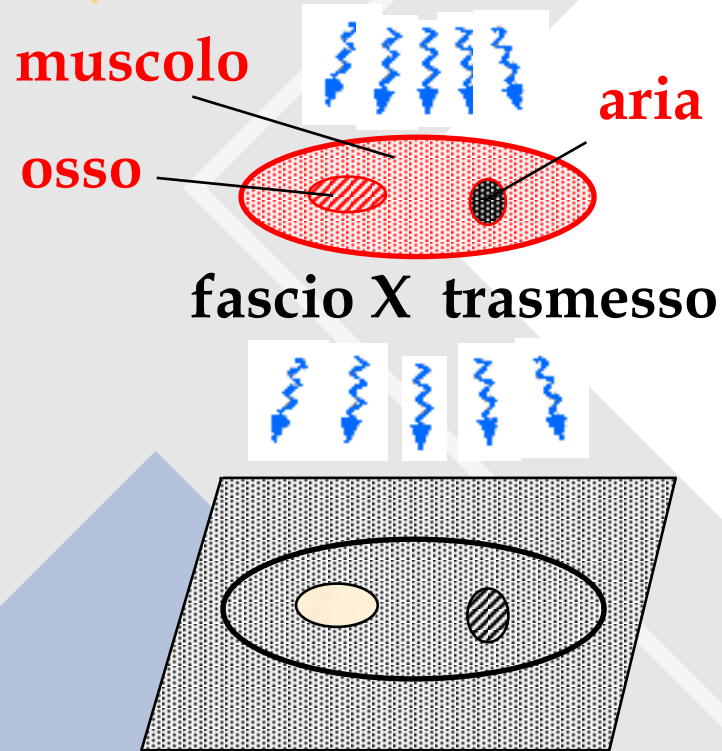


L'IMMAGINE RADIOLOGICA

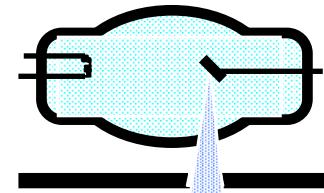
Tessuti e organi di differente densità e differente numero atomico hanno diversi μ



ASSORBIMENTO DIFFERENZIATO del fascio di fotoni X quando esso attraversa strati di materiale disomogeneo



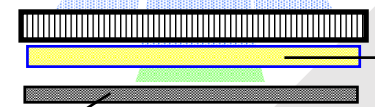
tubo a raggi X



struttura biologica



diaframmi



pellicola radiografica

- immagine **negativa**
- sviluppo della pellicola
- **radiografia digitale**

L'IMMAGINE RADIOLOGICA

contrasto radiologico

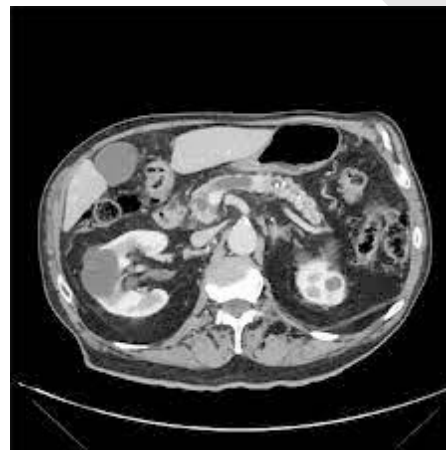
parametri :  potenziale elettrico
 intensità di corrente
 tempo di esposizione

$\Delta V \longrightarrow 45 \text{ kV} \div 130 \text{ kV}$

$i \longrightarrow 3 \text{ mA} \div 50 \text{ mA}$

$\Delta t \longrightarrow 1/60'' \div 1/120''$

Tomografia Assiale Computerizzata



In MEDICINA NUCLEARE

Radiofarmaci

in sorgente *non sigillata* sono somministrati a scopo

```
graph TD; A[Radiofarmaci] --> B[DIAGNOSTICO]; A --> C[TERAPEUTICO];
```

DIAGNOSTICO

scintigrafia
SPECT, PET

TERAPEUTICO

terapia radiometabolica

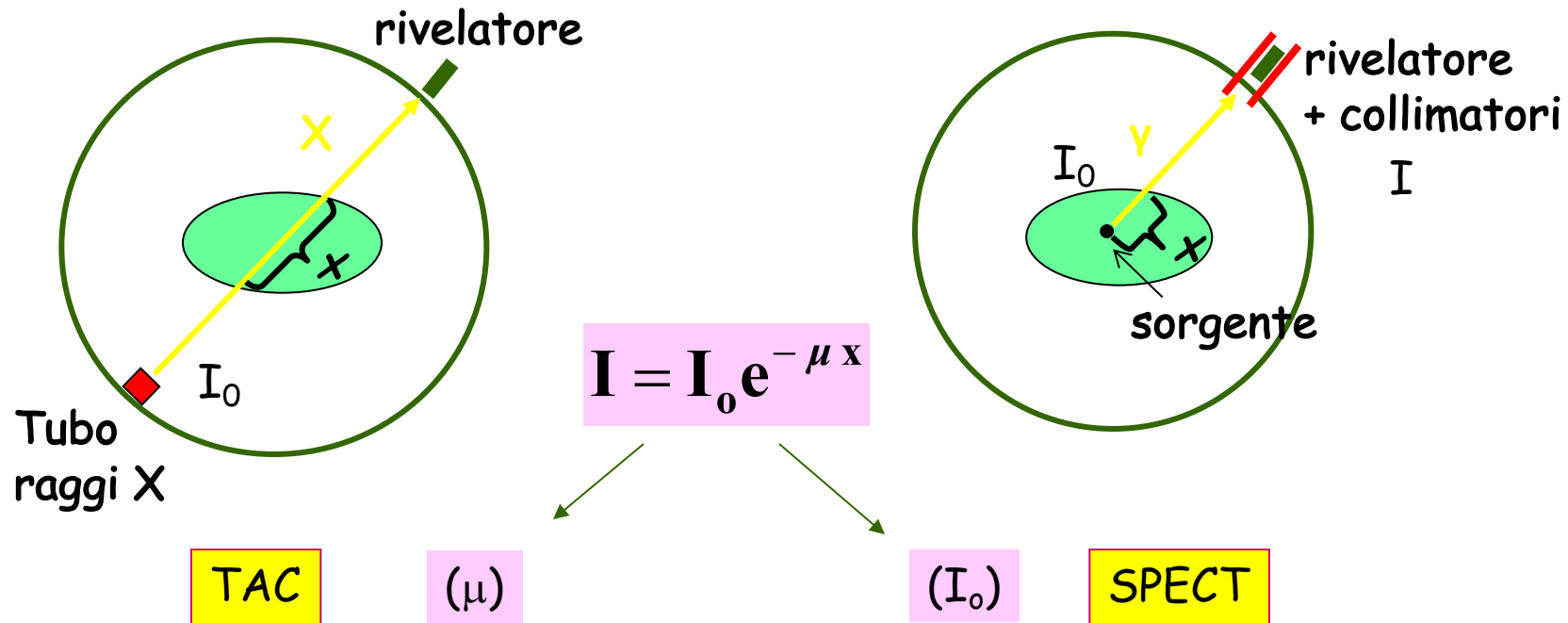
Applicazioni cliniche della diagnostica nucleare

- Monitoraggio attività tiroidea
- Monitoraggio attività cerebrale e funzioni fisiologiche dell'encefalo (flussi e volumi sanguigni)
- Identificazione di malattie neurologiche
- Studio funzionalità cardiaca (flussi ventricolari, immagini del miocardio)
- Studio funzionalità renale
- Identificazioni di molti tumori con radiofarmaci specifici (tumori del polmone, del retto, dell'esofago, linfomi, encefalo, pancreas, mammella, sistema scheletrico, ecc...)

The gamma camera



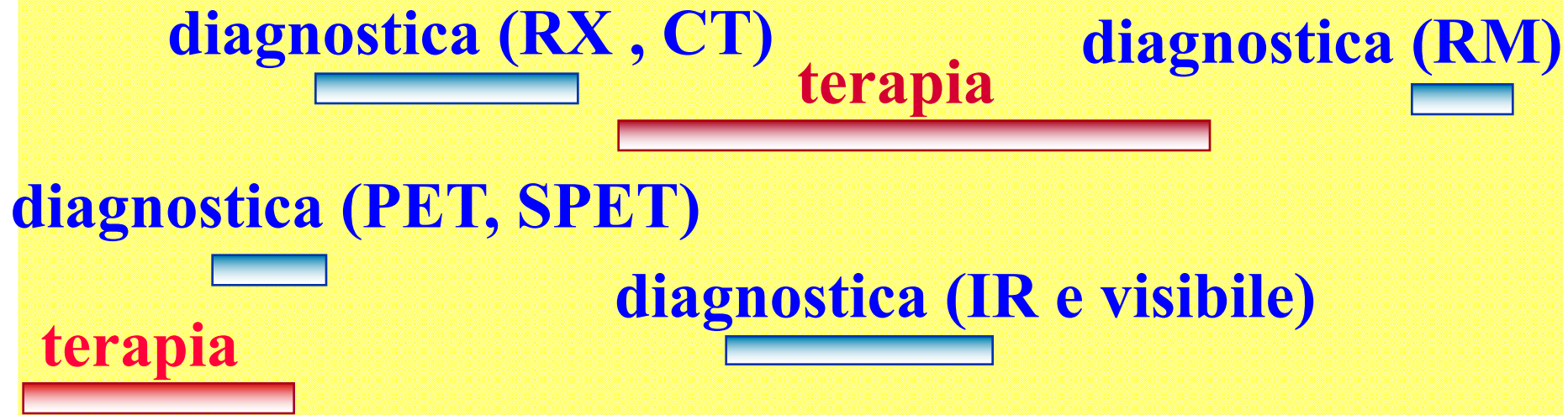
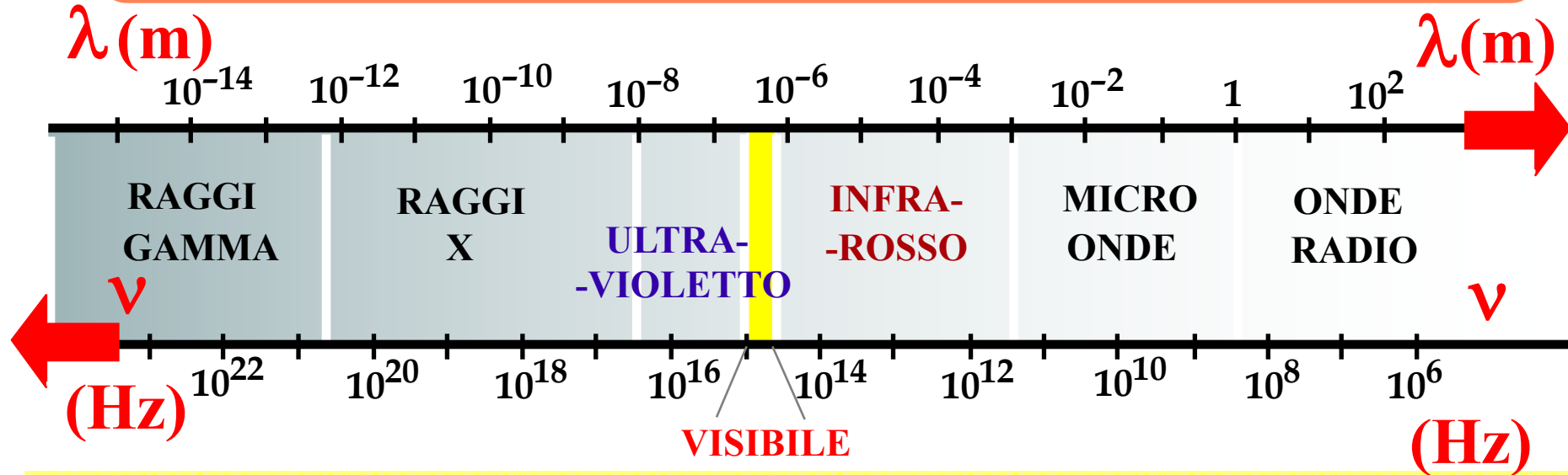
Differenze tra SPECT e TAC



- direzione del fotone: congiungente la sorgente X e il rivelatore
- **informazione strutturale** determinata dall'assorbimento dei fotoni (μ)
- risoluzione spaziale $\sim 1 \text{ mm}$

- direzione del fotone: definita dai collimatori
- **informazione funzionale determinata dall'attività della sorgente I_0** (necessario correggere per attenuazione)
- risoluzione spaziale $\sim 5 \text{ mm}$

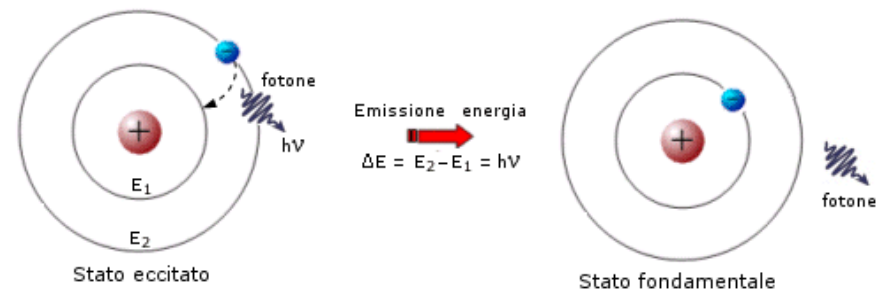
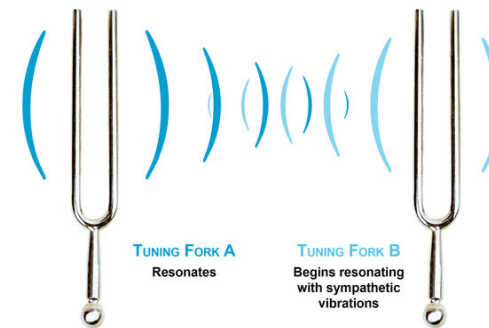
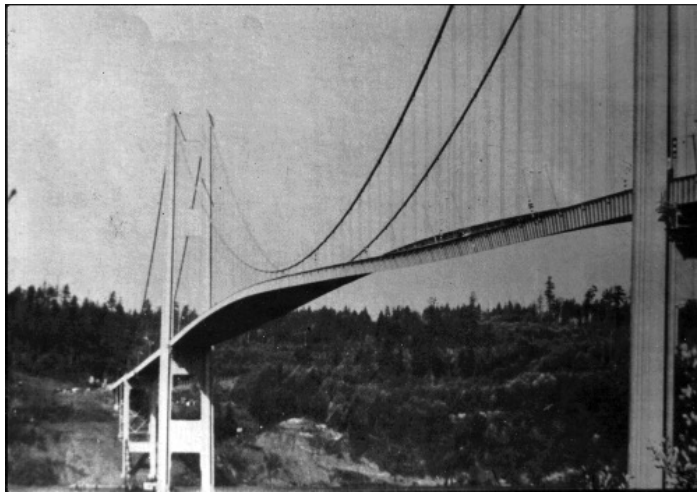
SPETTRO ELETTROMAGNETICO : impiego



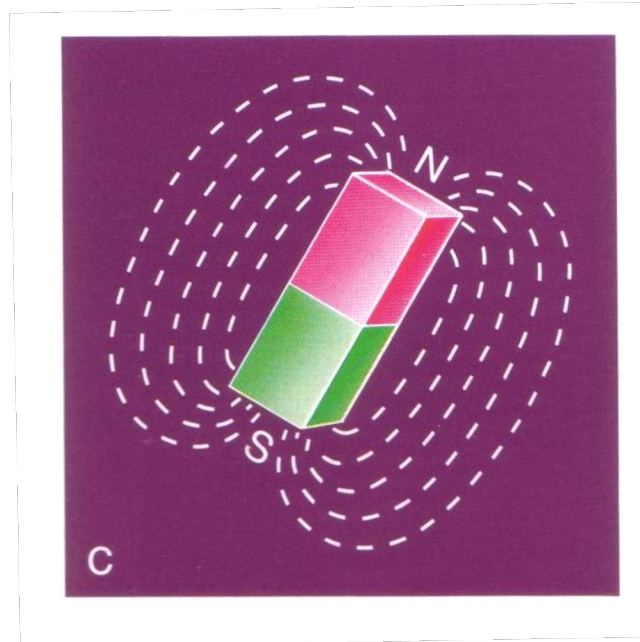
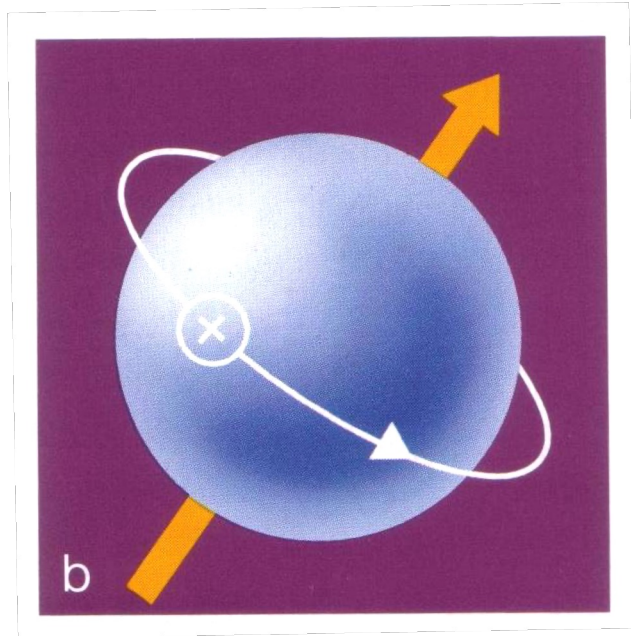
Risonanza Magnetica Nucleare

In Fisica si osserva un fenomeno di risonanza quando un sistema che ha una frequenza propria di oscillazione viene sollecitato dall'esterno da un agente (ad es. forza o campo e/m) che ha una frequenza circa uguale a quella propria del sistema.

In condizioni di risonanza si ha il massimo trasferimento di potenza dall'agente esterno al sistema



Risonanza Magnetica Nucleare



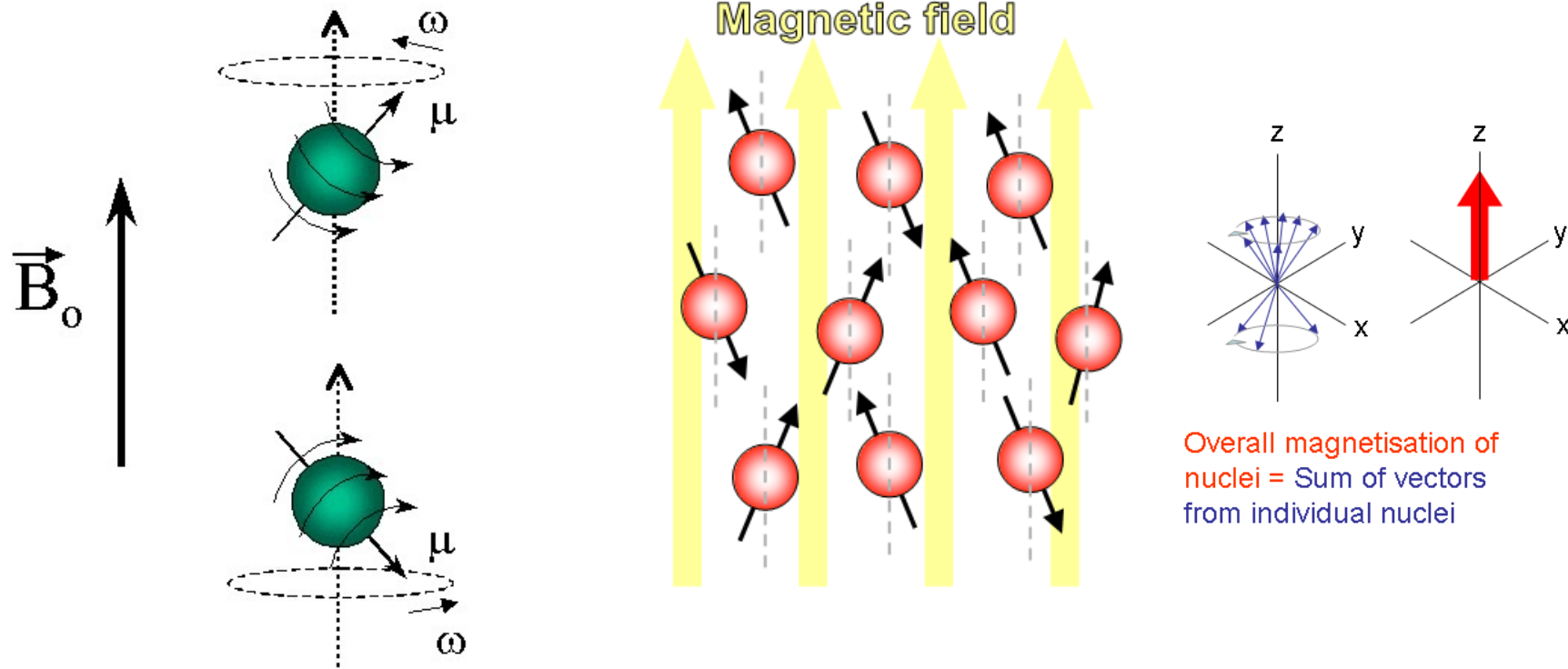
- Il nucleo atomico utilizzato per la formazione delle immagini di Risonanza Magnetica è quello degli **atomi di idrogeno** (“protone”)
- I nuclei degli atomi di idrogeno possiedono una proprietà chiamata **spin**. Lo spin fa sì che il protone si comporti come un piccolo magnete

Basi teoriche della RMN

- I nuclei di idrogeno interagiscono con tre tipi di campi magnetici
 - \underline{B}_0 – il campo magnetico principale (campo statico)
 - \underline{B}_1 – un impulso a radiofrequenza che eccita i nuclei (campo RF)
 - \underline{G}_ξ – gradienti di campo magnetico che consentono la localizzazione del segnale

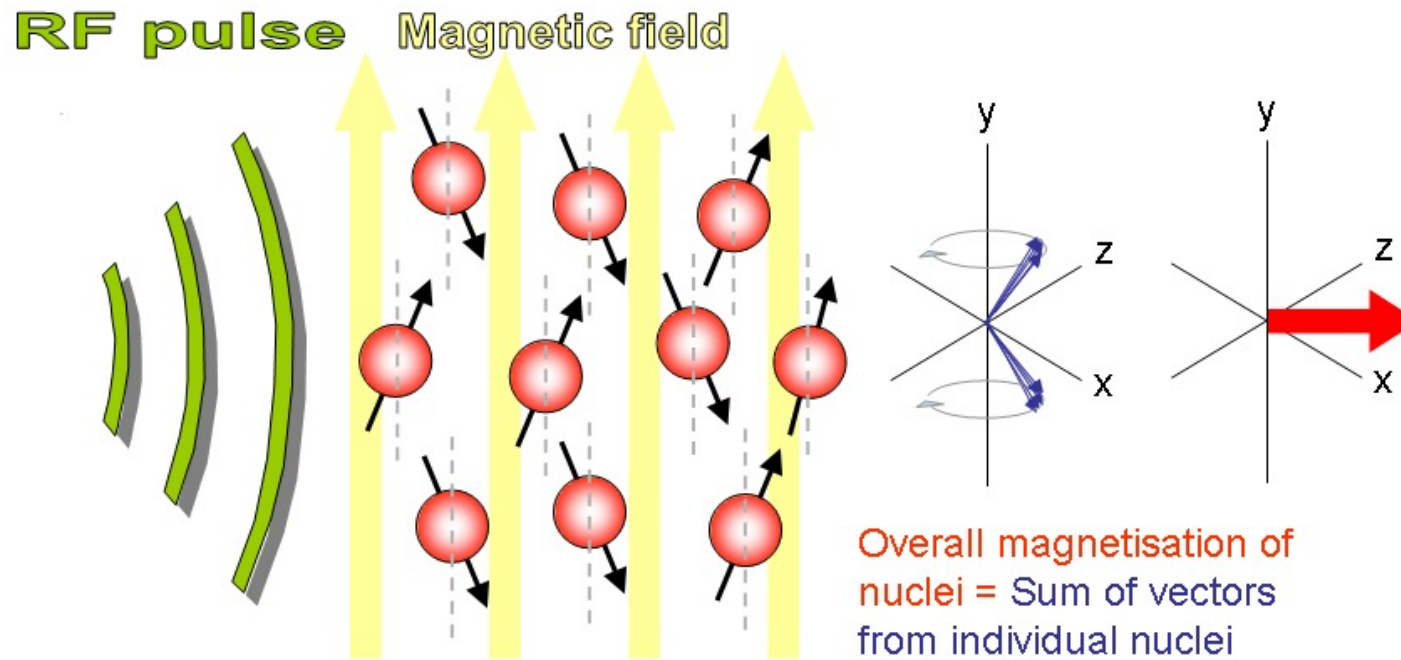
Effetti del campo magnetico esterno

Punto di vista macroscopico (interpretazione semiclassica)



Effetti del campo RF

Punto di vista macroscopico (interpretazione semiclassica)

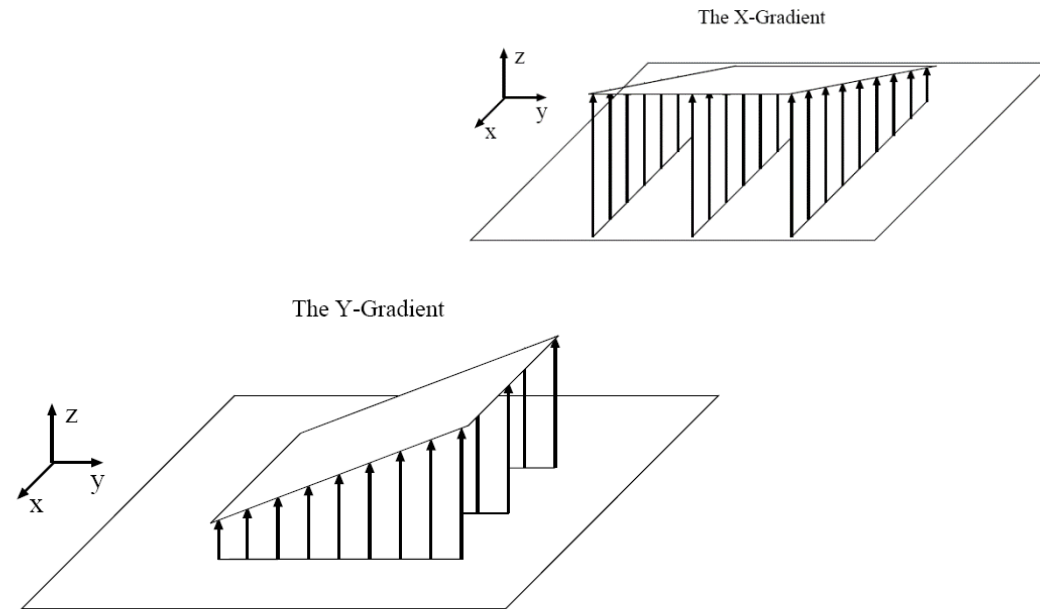
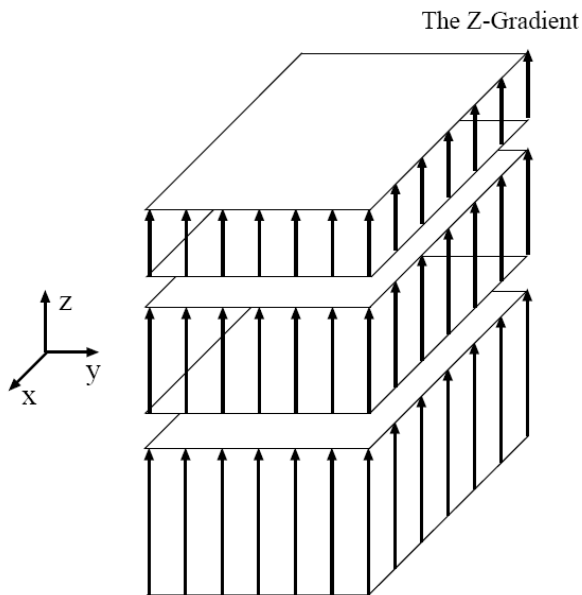


- Il vettore magnetizzazione \underline{M} ritorna nella posizione di equilibrio seguendo un moto di precessione attorno alla direzione del campo statico alla frequenza di Larmor.
- Questo moto coinvolge due fenomeni: il **rilassamento trasversale**, o annullamento della componente trasversale \underline{M}_{xy} (T2) ed il **rilassamento longitudinale**, o recupero della magnetizzazione longitudinale \underline{M}_z (T1).

Gradienti di campo

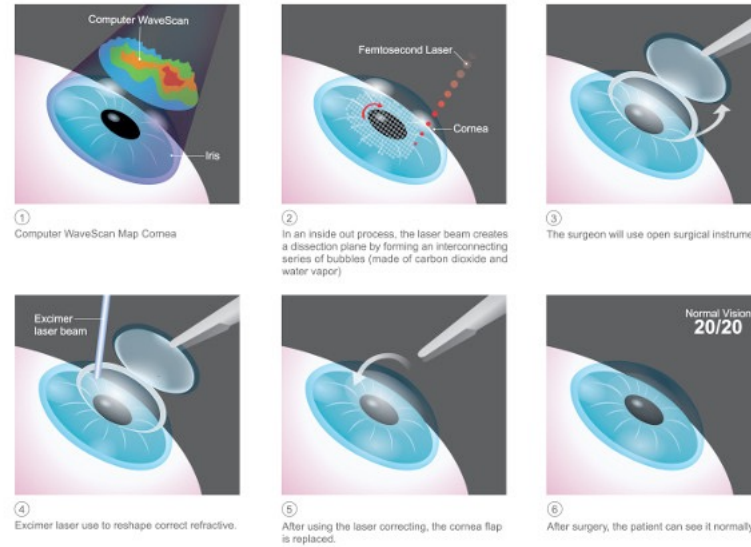
La localizzazione spaziale del segnale avviene creando dei **gradienti di campo** sugli assi x , y e z che producono una piccola variazione del campo magnetico principale come funzione di x , y e z .

ogni elemento del corpo in esame è sottoposto ad un campo diverso e risuona ad una frequenza leggermente diversa dagli altri



Chirurgia Refrattiva Laser

«light amplification by stimulated emission of radiation»



Le radiazioni fanno male ?

Effetti biologici delle radiazioni ionizzanti

Prodotto finale di una serie di processi

- ❖ **Fisici,**
- ❖ **Chimici,**
- ❖ **Biochimici**
- ❖ **Biologici**

Classificazione degli Effetti

Effetti deterministici

Effetti la cui gravità varia in funzione della dose ricevuta e per i quali esiste una dose soglia.

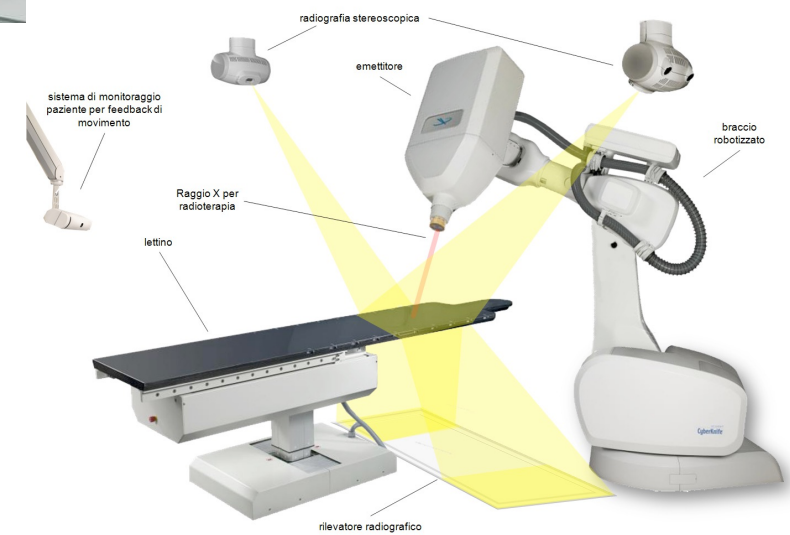
Effetti stocastici (reazioni tissutali)

Effetti la cui probabilità di accadere viene considerata una funzione della dose senza soglia. Si tratta di effetti "tutto o nulla", la cui gravità, quando si manifestano, non dipende dalla dose.

Radioterapia e adroterapia

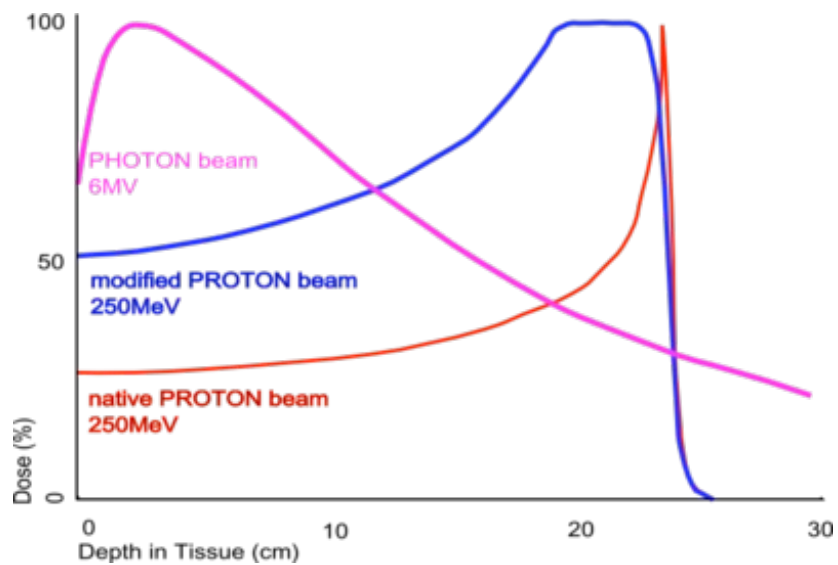


Gammaknife



Cyber Knife

Radioterapia e adroterapia



Obiettivi della Radioprotezione

- ❖ prevenire totalmente i danni deterministici
- ❖ limitare a livelli accettabili la probabilità di comparsa degli effetti stocastici (effetti somatici tardivi e genetici senza soglia).

Principi della Radioprotezione

- ❖ principio di giustificazione
- ❖ principio di ottimizzazione
- ❖ principio di limitazione delle dosi individuali

Principio di giustificazione

Ogni attività umana con radiazioni ionizzanti deve trovare adeguata motivazione in un netto e positivo bilancio tra rischi e benefici associati ad essa.

Principio di ottimizzazione

Tutte le esposizioni devono essere mantenute tanto basse quanto ragionevolmente ottenibile in riferimento a considerazioni economiche e sociali.

Principio di limitazione delle dosi

limiti di “DOSE EFFICACE” → per effetti stocastici

limiti di “DOSE EQUIVALENTE” → per effetti deterministici

***“le esposizioni mediche
non sono soggette a limitazioni»***

(Art. 1, comma 4, lettera c) del D.Lgs. 101/2020)