

# **Radiazioni (non) ionizzanti e applicazioni in medicina**

**Prof. Tommaso MAGGIPINTO**

Esperto di Radioprotezione

Prof. Associato in Fisica Applicata, Dipartimento di Fisica

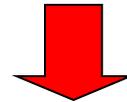
Con il termine **radiazione** si intende l'emissione e la propagazione attraverso lo spazio e la materia di **energia** a livello microscopico

## 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:

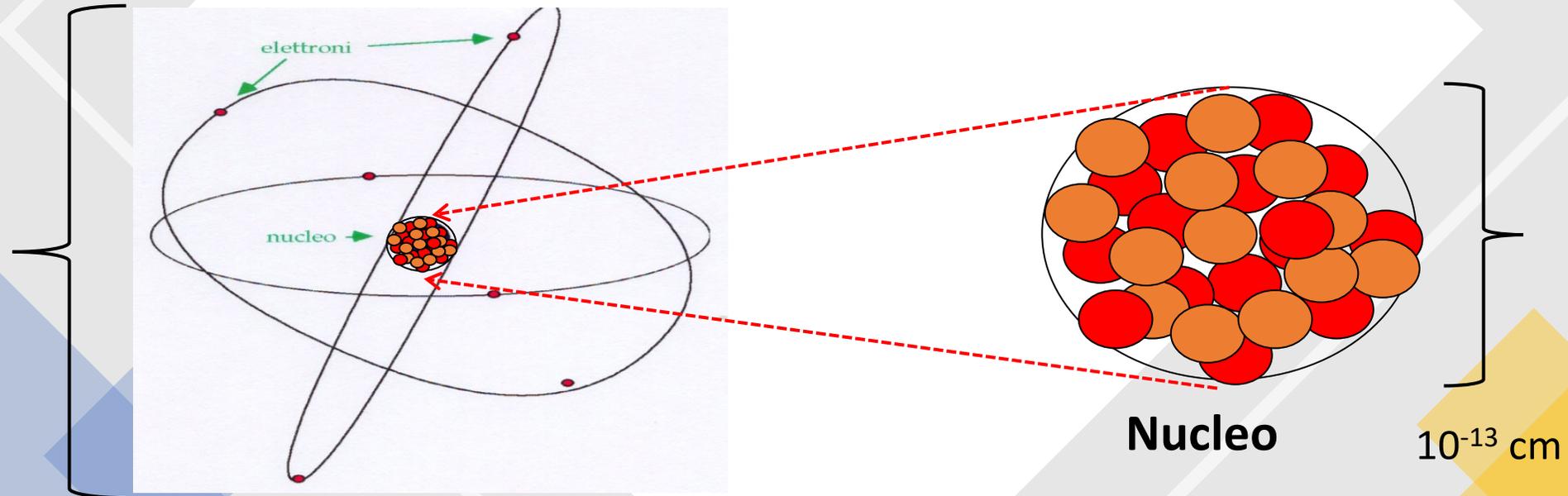


- **ionizzanti**
- **non ionizzanti**

# 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:

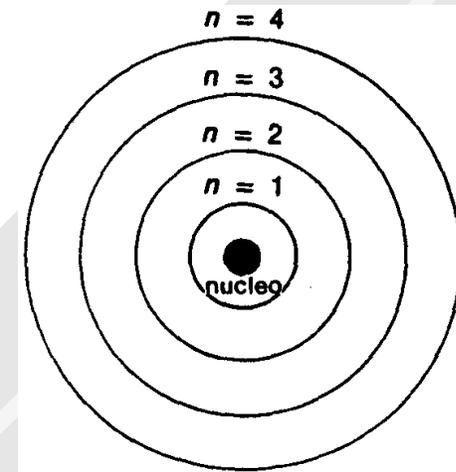
numero protoni = numero elettroni

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

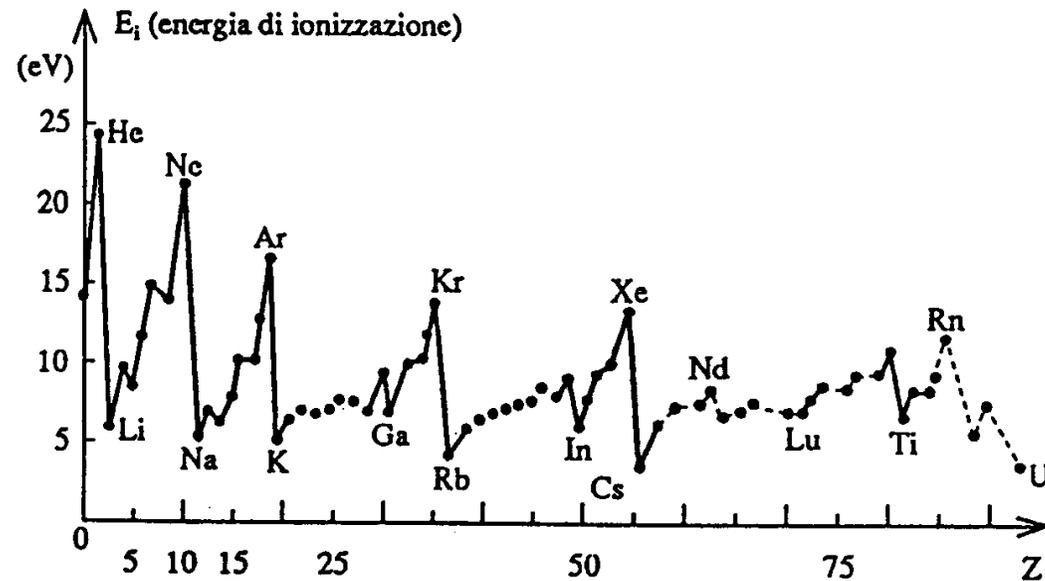
$$1 \text{ eV} = 1.6 * 10^{-19} \text{ J}$$

# CLASSIFICAZIONE DELLE RADIAZIONI

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

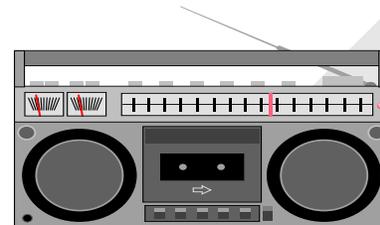
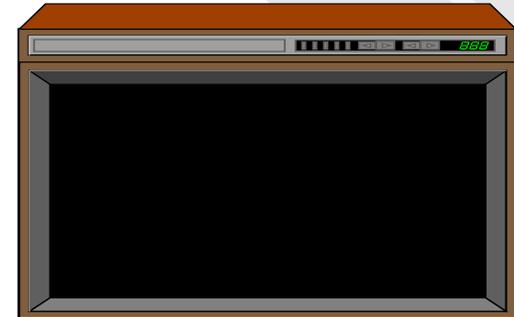
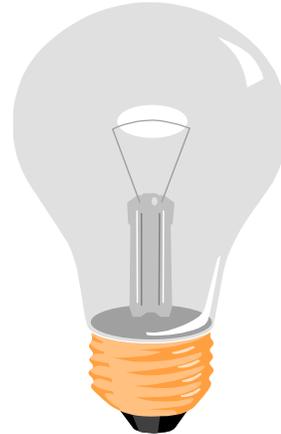
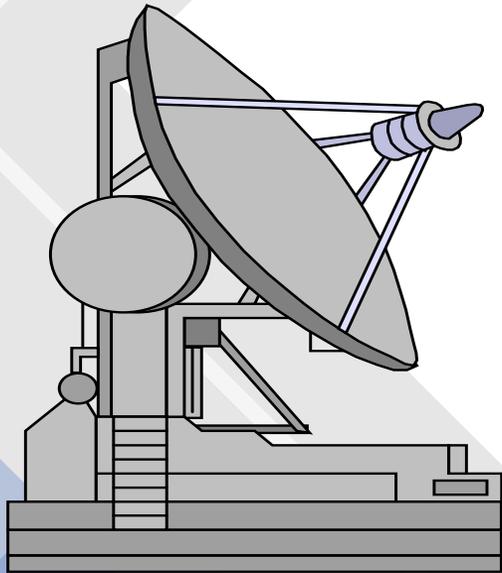
PERCHE' E'  
~ 12 eV??

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** ( $m = 0$ )

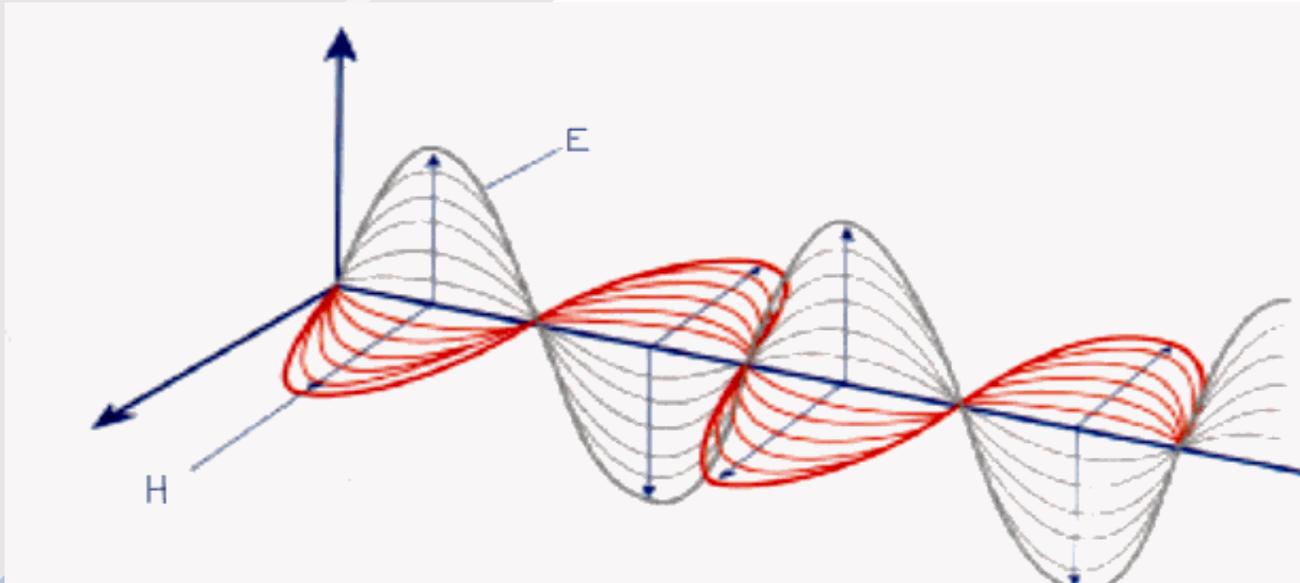
**radiazioni corpuscolari** ( $m > 0$ )

**Si usa fare un ulteriore suddivisione:**

- ✓ **Direttamente ionizzanti:** particelle cariche (elettroni, protoni, particelle  $\alpha$ , etc.) la cui energia cinetica è sufficiente per produrre ionizzazione per collisione;
- ✓ **Indirettamente ionizzanti:** raggi X, raggi  $\gamma$  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.



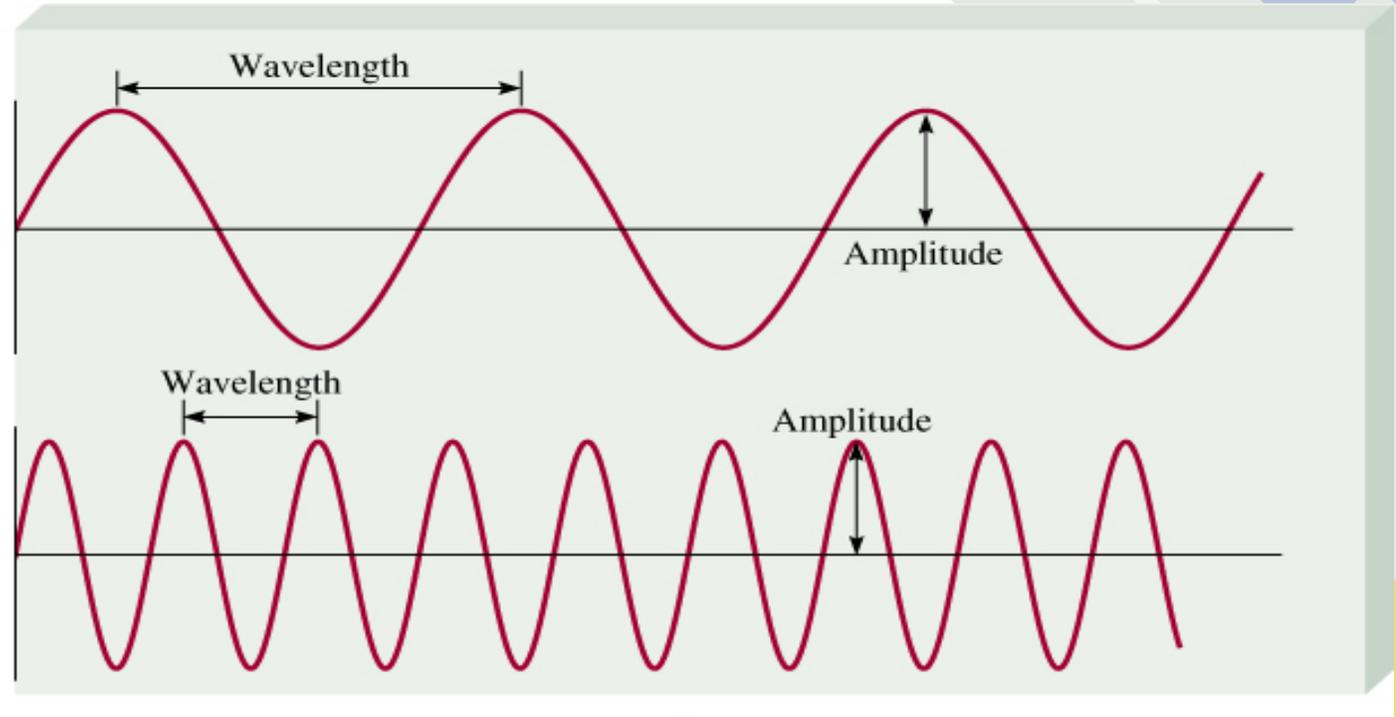
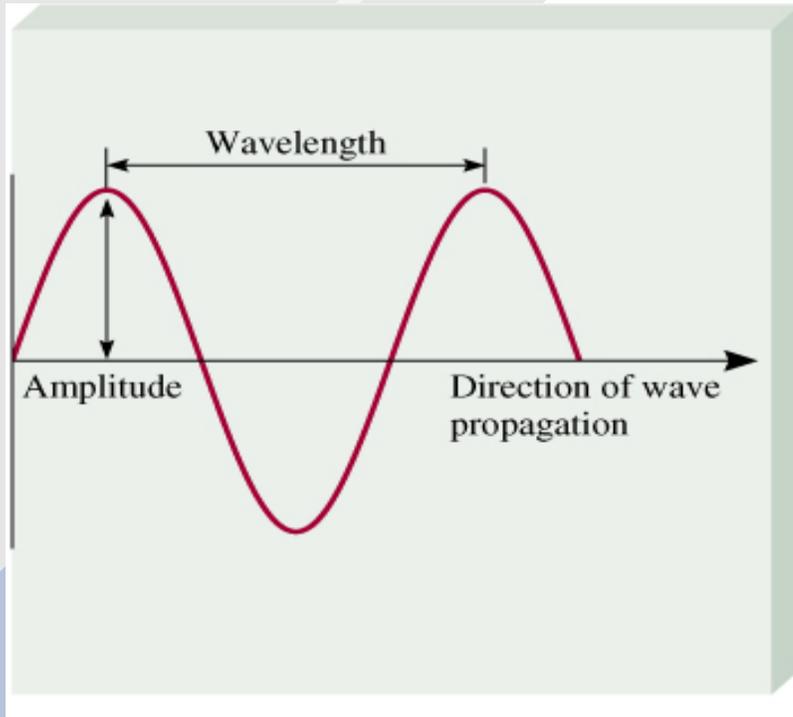
La velocità di propagazione nel vuoto è  $3 \times 10^8$  m/sec  
Questa è la velocità della luce !

# RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

**Lunghezza d'onda ( $\lambda$ ):** distanza lineare tra due massimi successivi di un'onda

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

**Frequenza ( $\nu$ ):** numero di oscillazioni del campo in 1 secondo (Hz = 1 ciclo/s)



# RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

## Modello corpuscolare

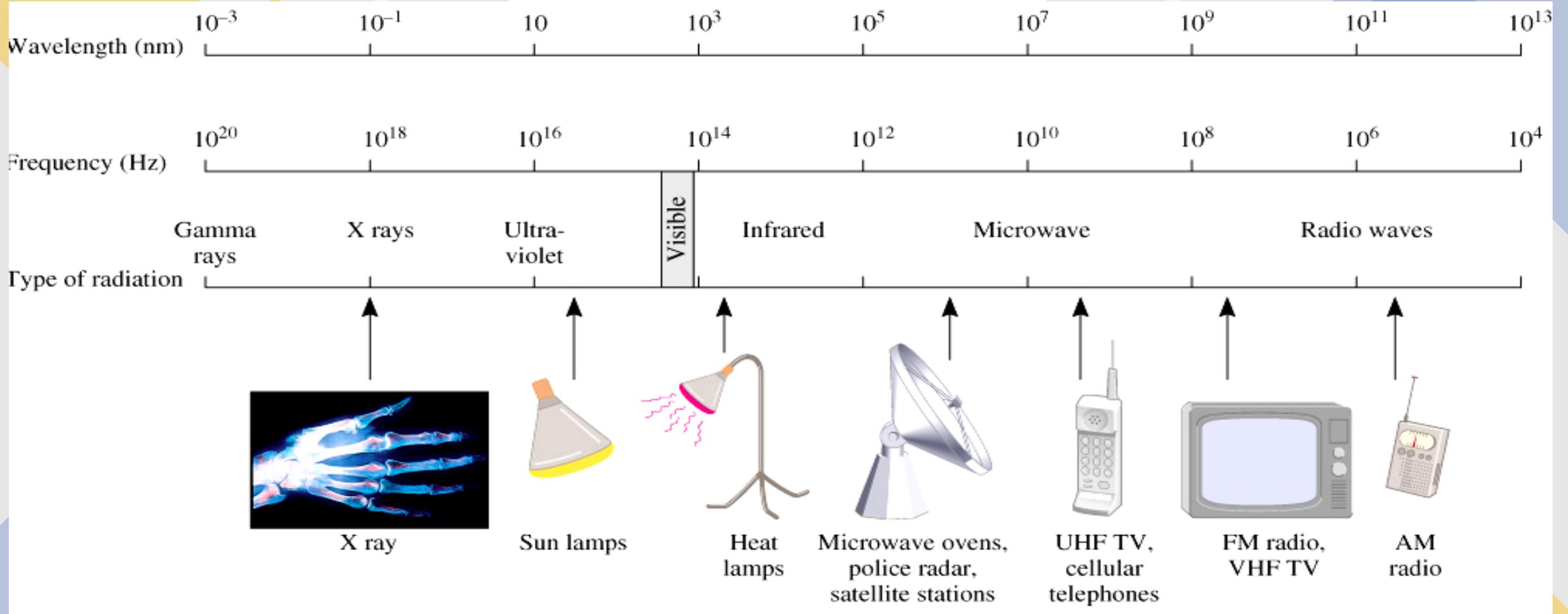
- ◆ Nei processi di trasferimento di energia, la radiazione elettromagnetica si comporta come una particella priva di massa, ma dotata di energia, il FOTONE.
- ◆ L'energia di un fotone dipende dalla frequenza ( $\nu$ ) della radiazione

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

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

# RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

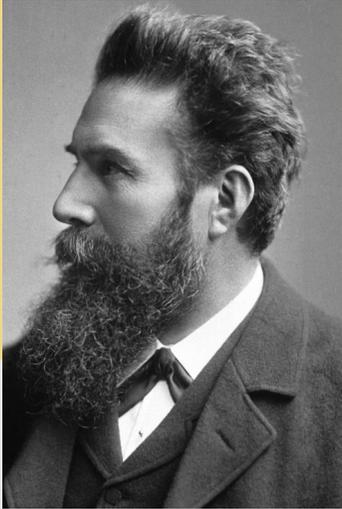
## Spettro elettromagnetico



# 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

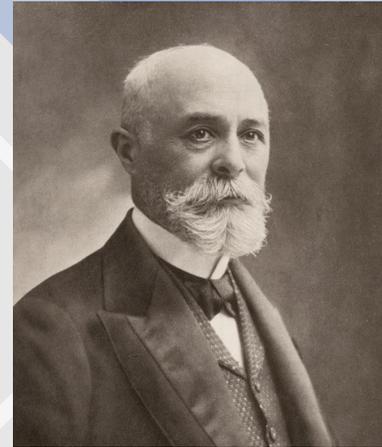
Konrad Röntgen

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  $\alpha$ , mesoni, elettroni, fotoni, neutroni)

### decadimento radioattivo di nuclidi naturali presenti nella crosta terrestre

(particelle  $\alpha$  e  $\beta$ , raggi  $\gamma$ )

# 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**

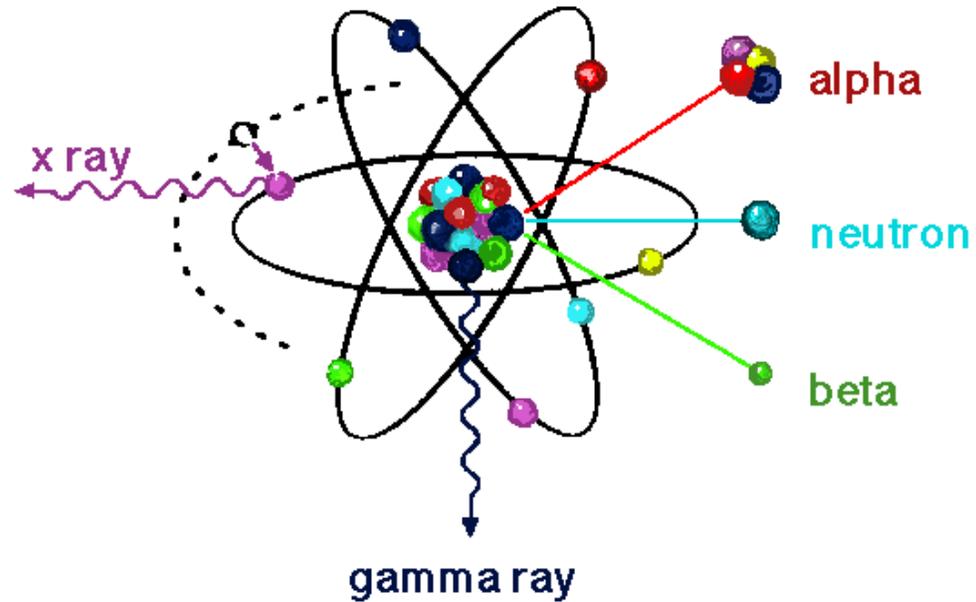
# DECADIMENTO RADIOATTIVO

Radiazioni emesse dall'atomo:

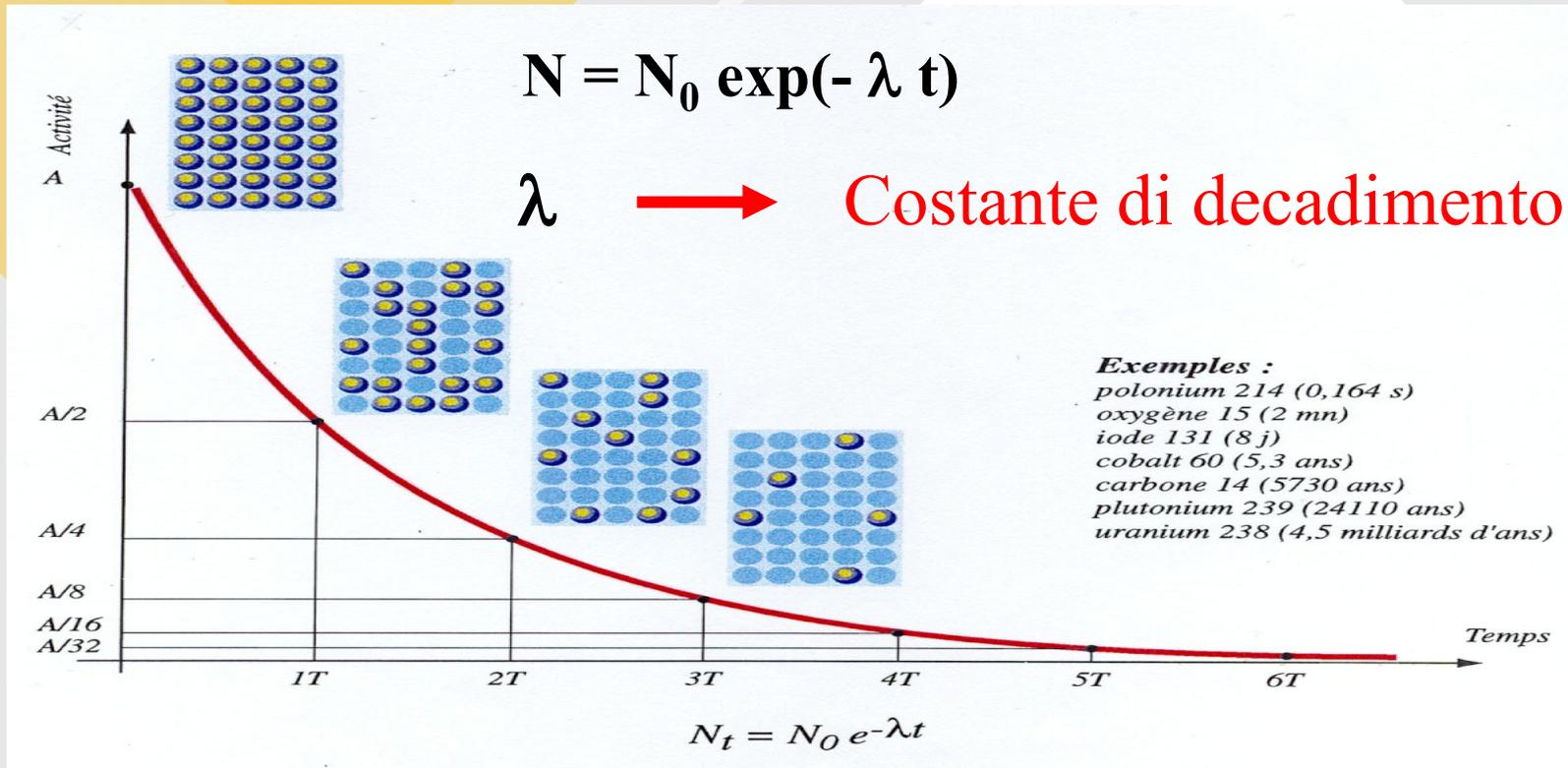
- Raggi X caratteristici

Radiazioni emesse dal nucleo

- Particelle alfa ( $\alpha$ )
- Particelle beta ( $\beta$ )
- Raggi gamma ( $\gamma$ )



# 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

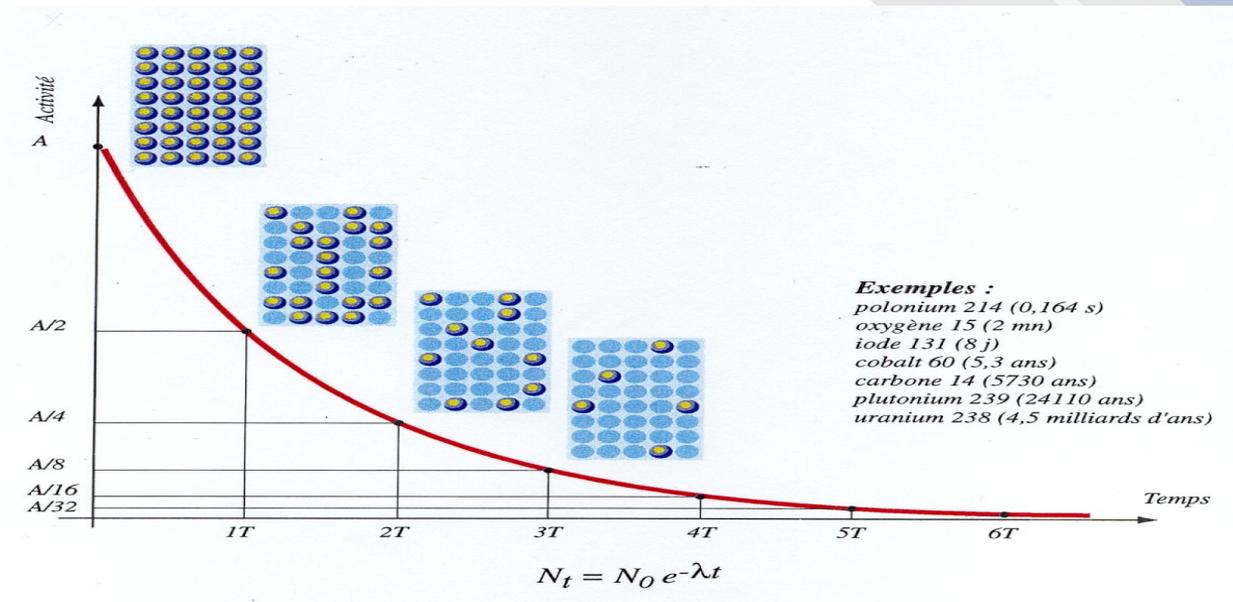
Il decadimento può avvenire in tempi assai brevi o molto lunghi. La misura di tale tempo è data dal TEMPO DI DIMEZZAMENTO o TEMPO DI VITA MEDIA cioè il tempo alla fine del quale la metà degli atomi radioattivi inizialmente presenti ha subito una trasformazione spontanea

**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**



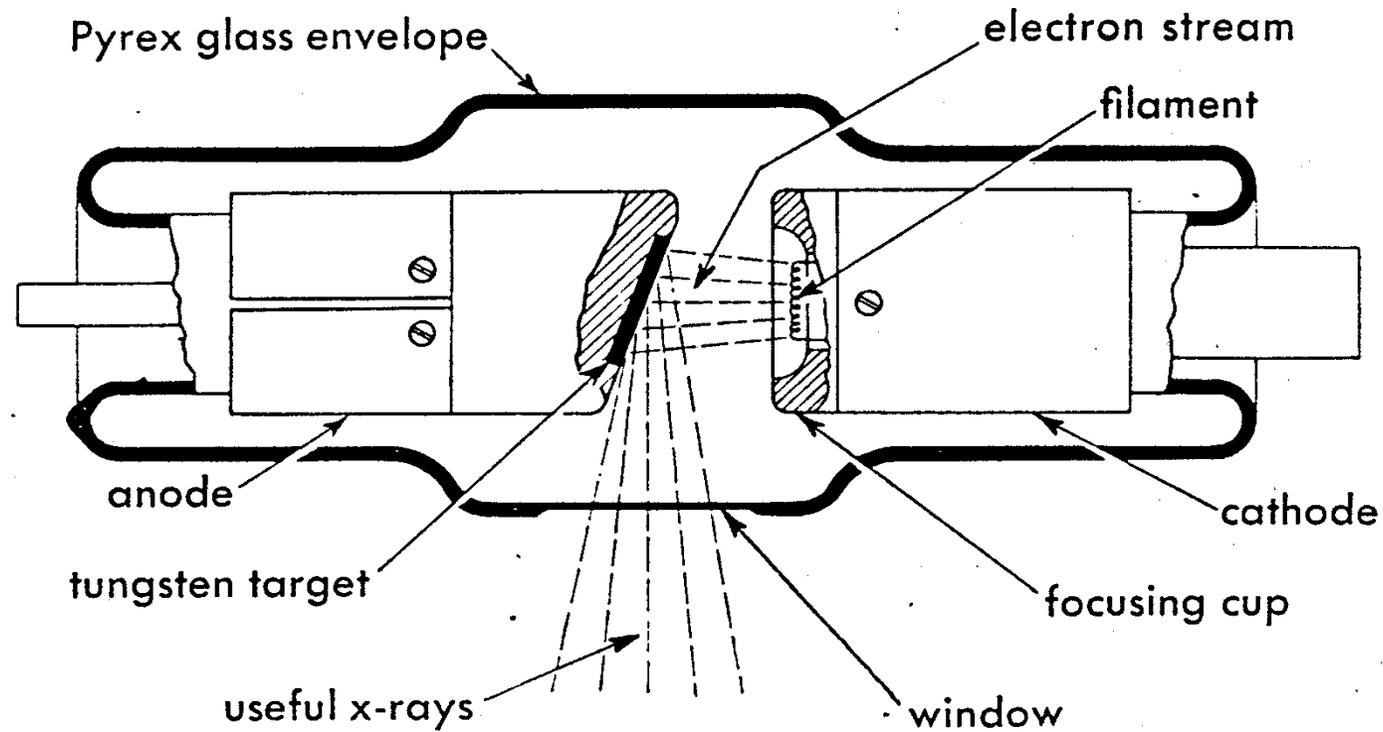
# MACCHINE RADIOGENE

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.

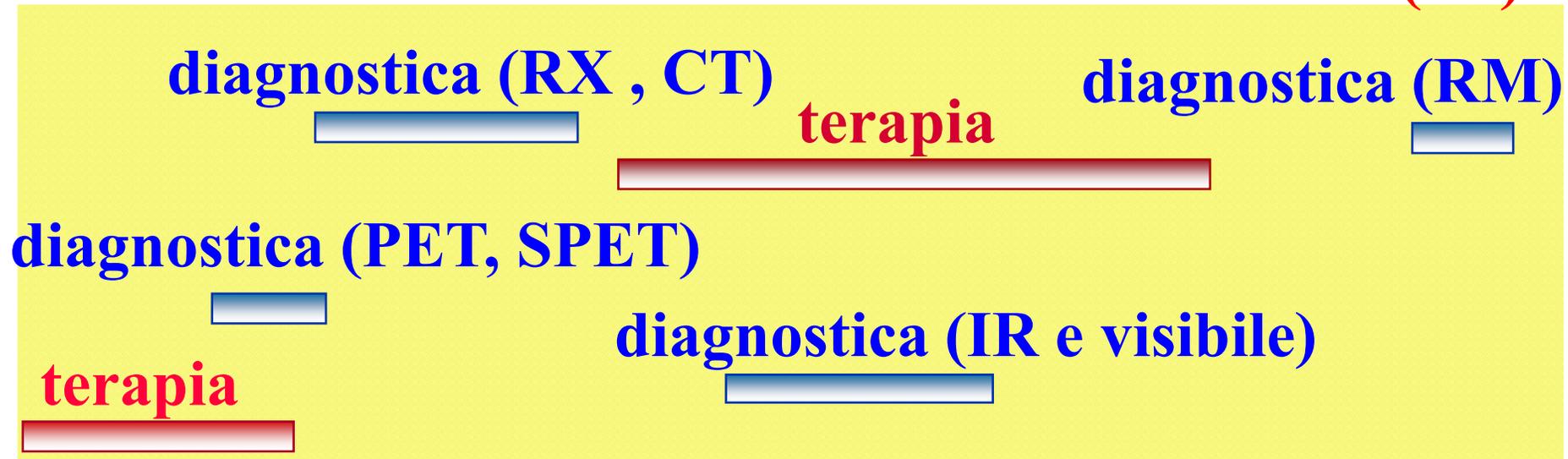
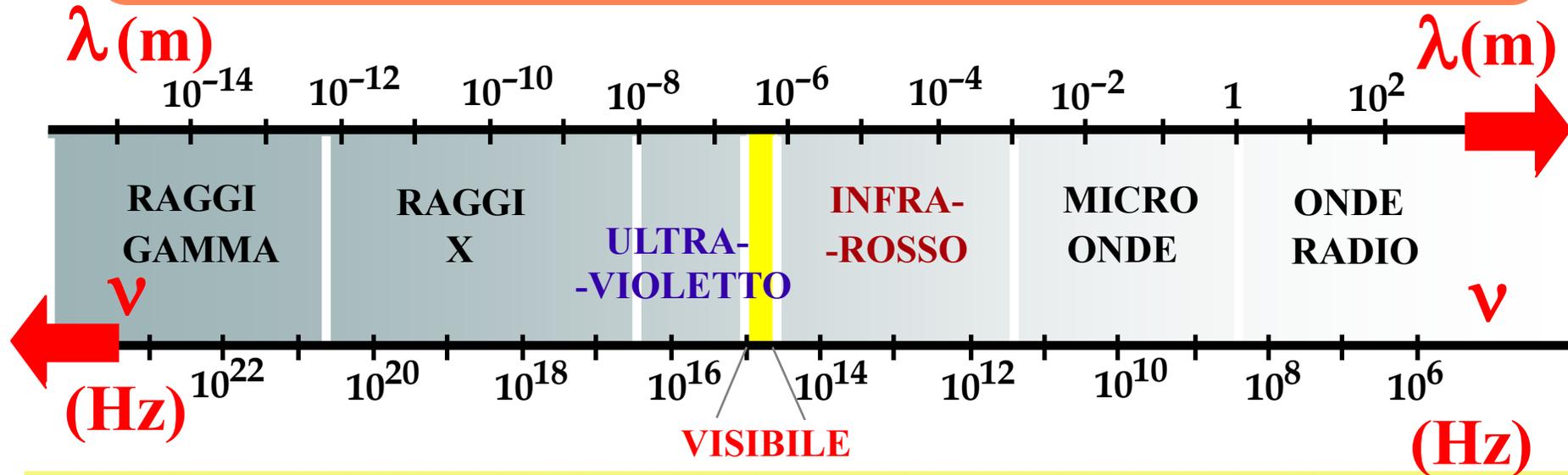
Sostanze  
radioattive

Sorgente  
sigillata

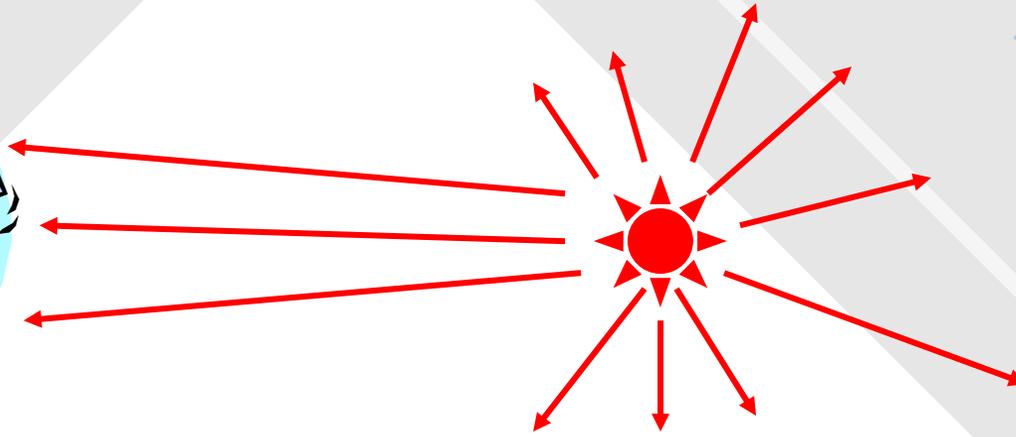
Sorgente  
NON Sigillata

**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

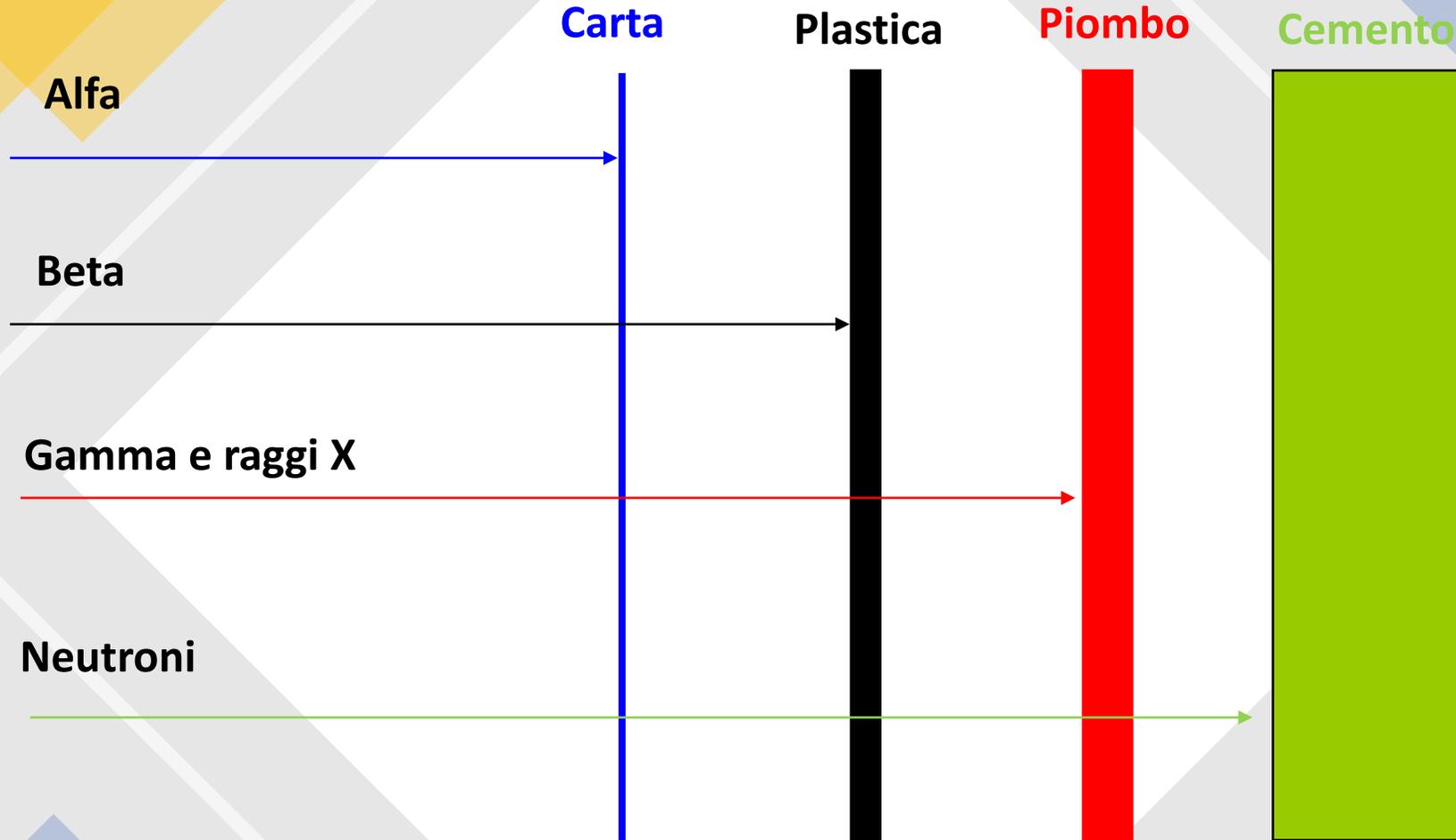


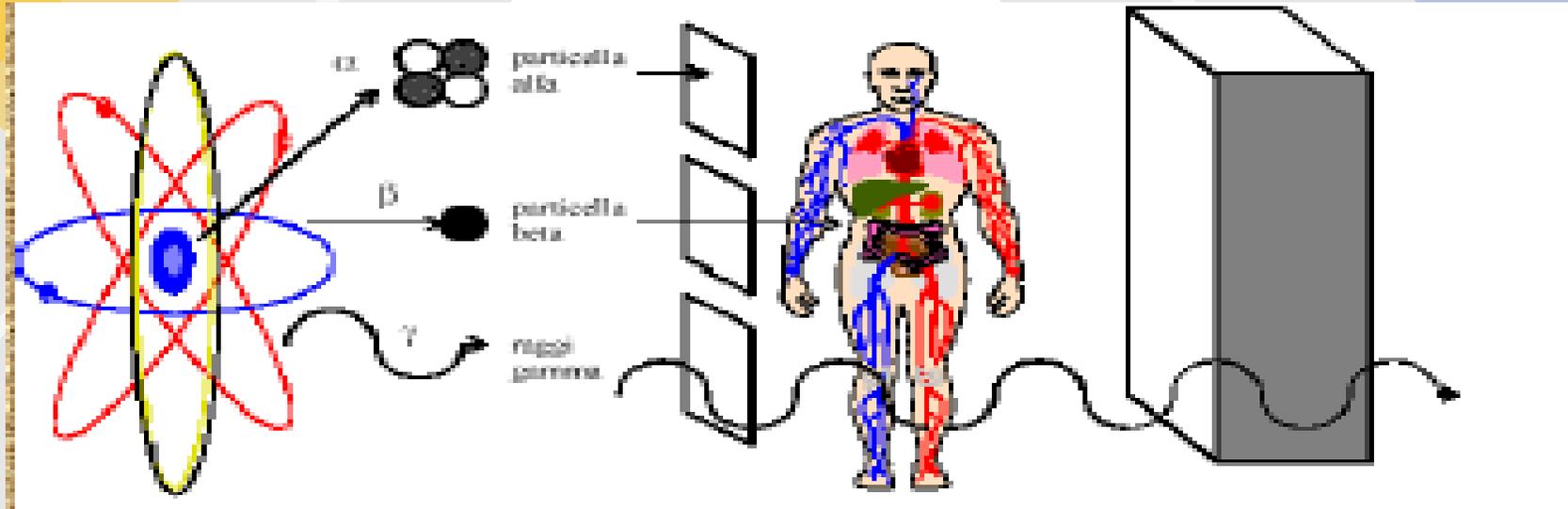
Le radiazioni ionizzanti interagiscono con la materia circostante **depositando in essa la loro energia.**

**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



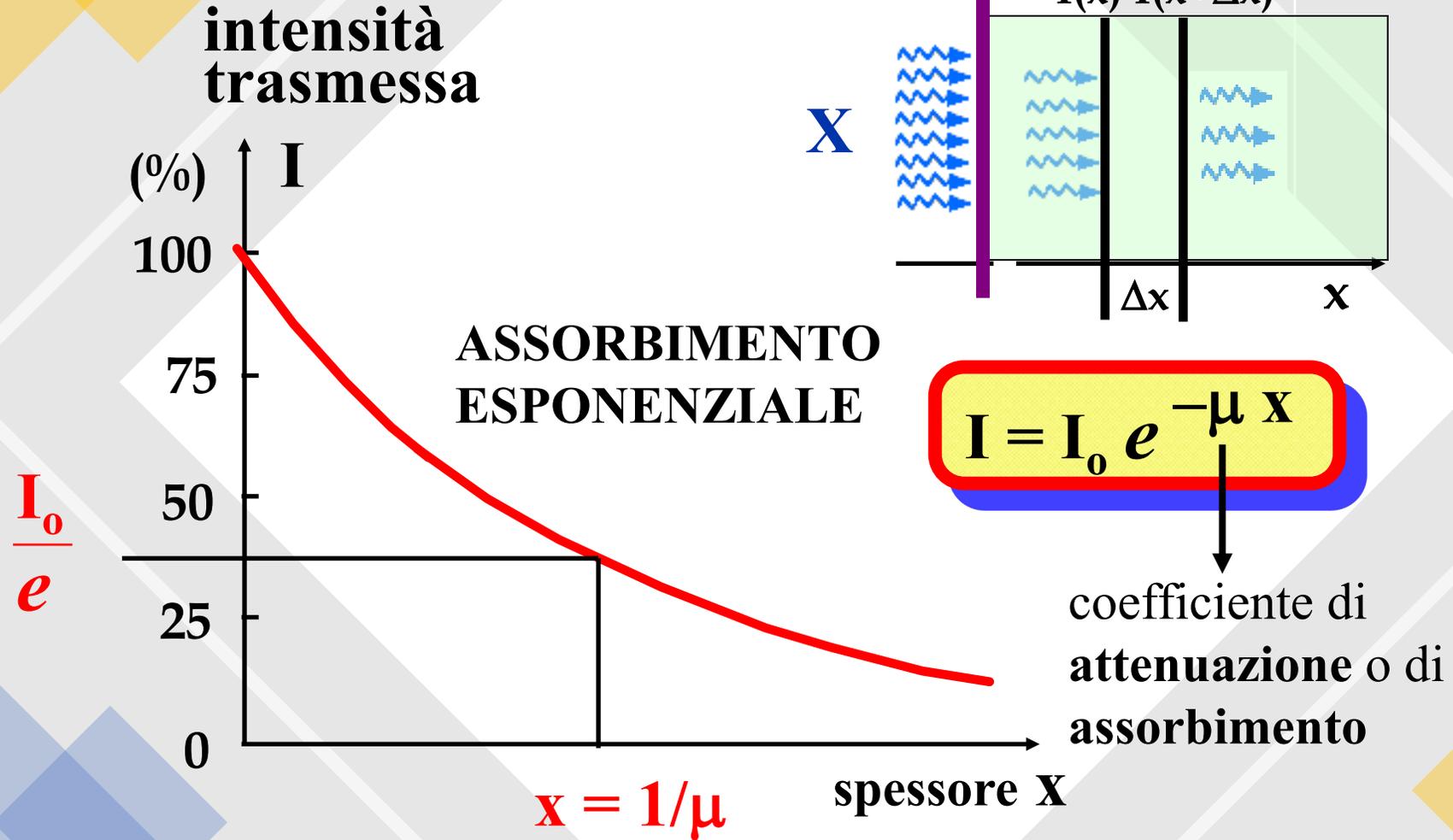


**Particelle alfa:** penetrazione molto limitata nell'aria. Un foglio di carta è sufficiente per fermarle

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

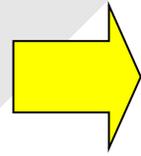
**Raggi X o gamma:** penetrazione molto elevata. In funzione dell'energia possono arrivare a centinaia di metri nell'aria. Alcuni mm/cm di piombo permettono di schermarle

# ASSORBIMENTO DEI RAGGI X

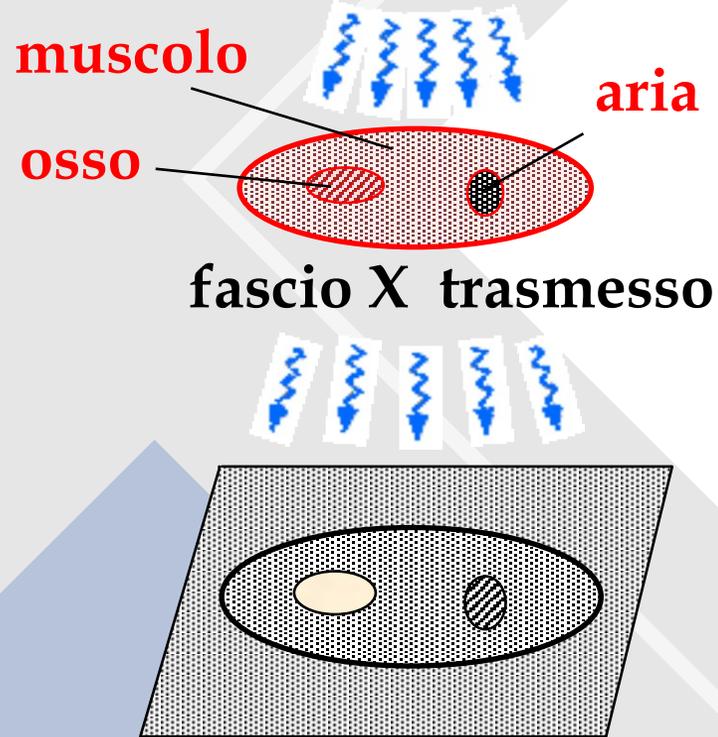


# L'IMMAGINE RADIOLOGICA

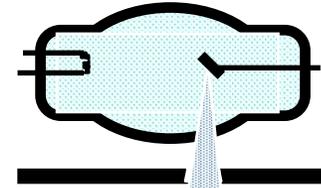
Tessuti e organi di differente densità e differente numero atomico hanno diversi  $\mu$



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

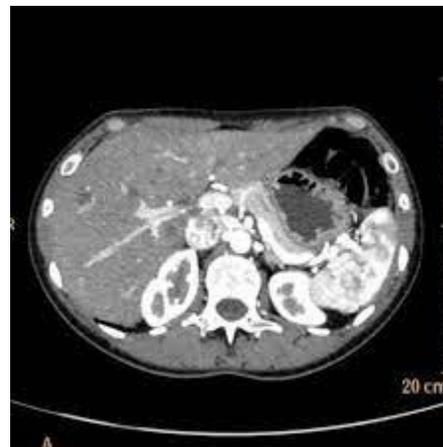
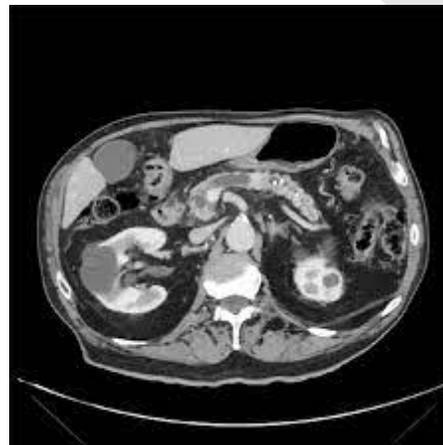
parametri :  potenziale elettrico  
 intensità di corrente  
 tempo di esposizione

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

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

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

# 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

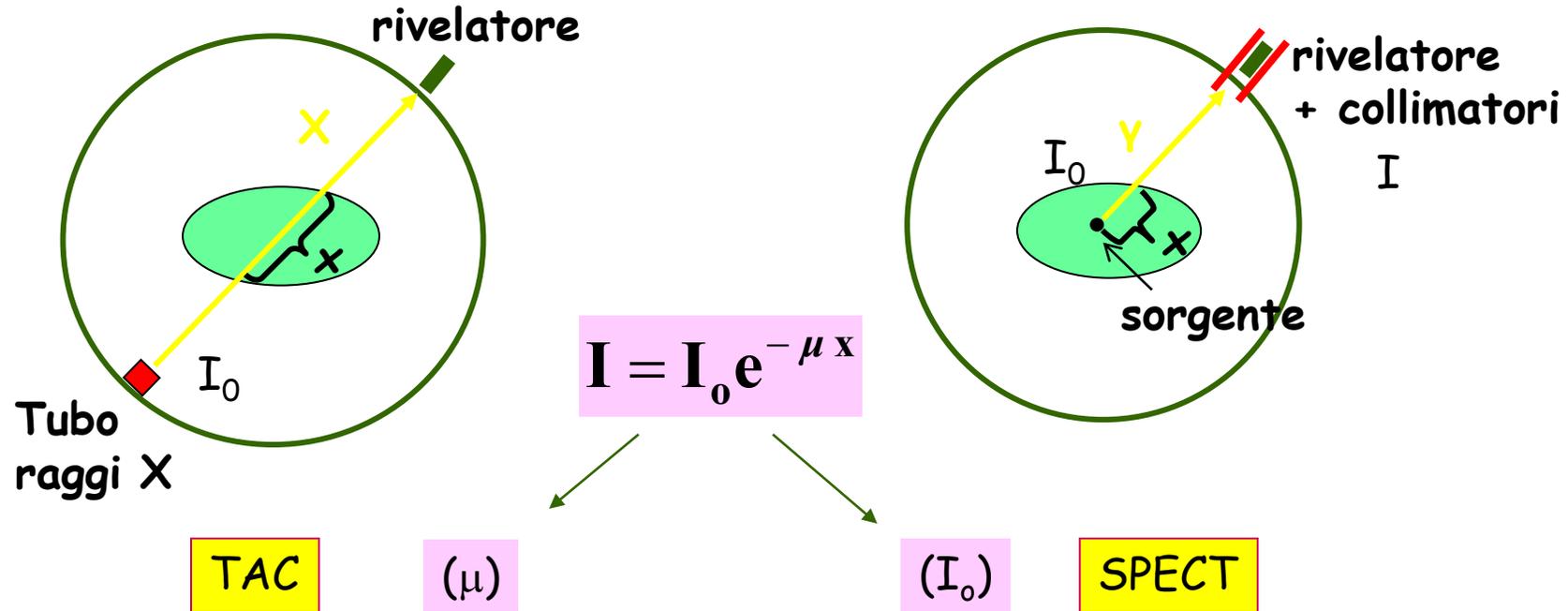
# Applicazioni cliniche della diagnostica nucleare

- 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



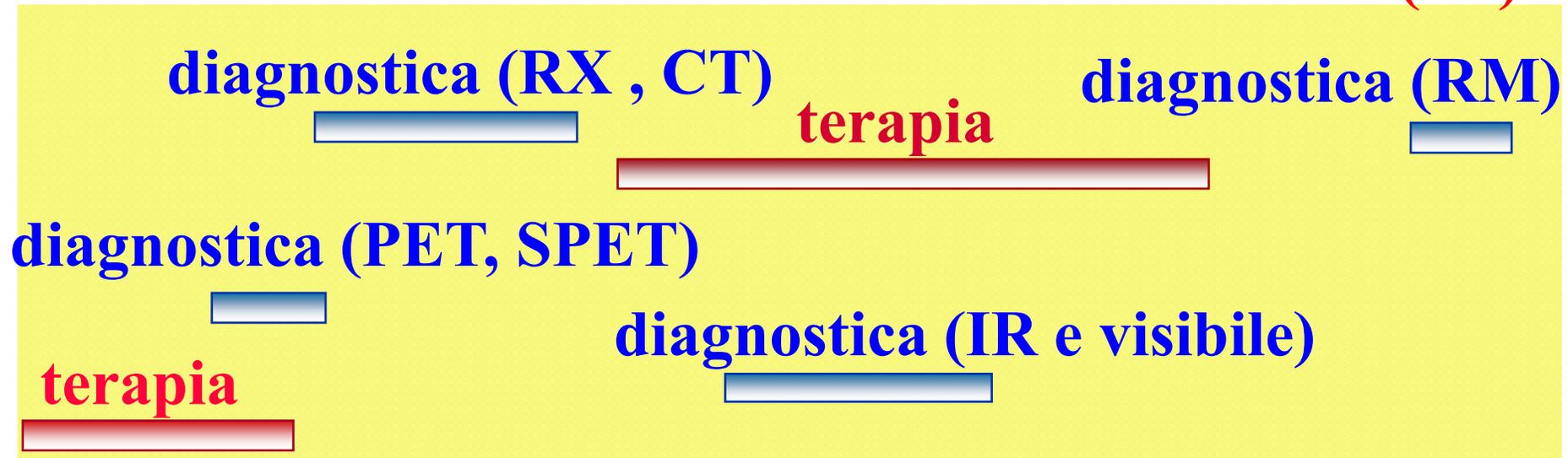
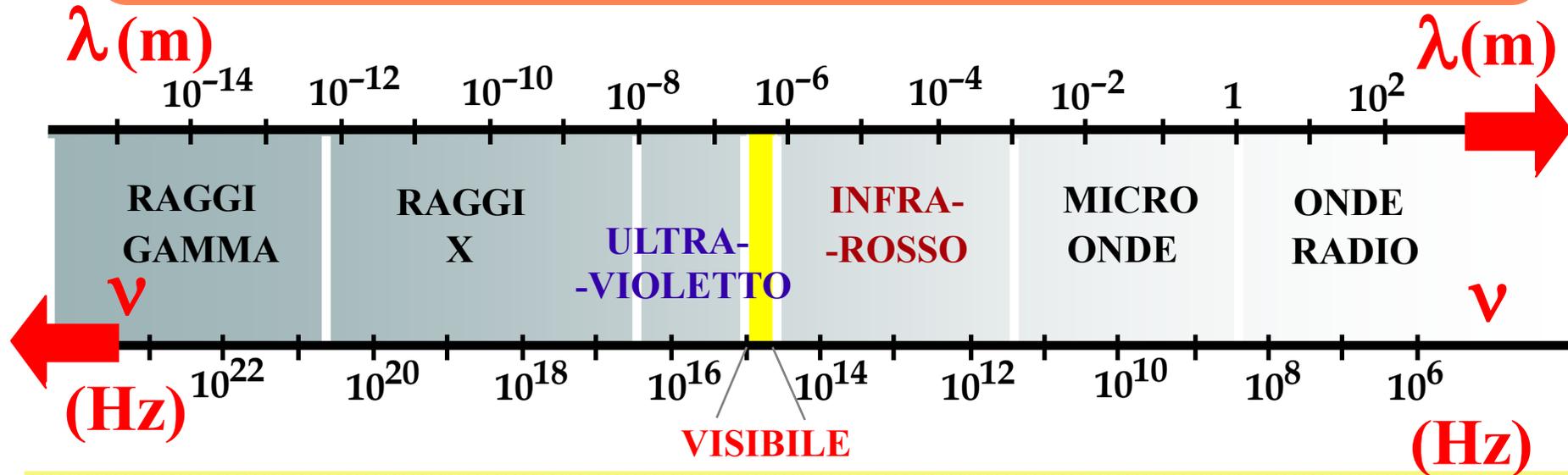
# Differenze tra SPECT e TAC



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

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

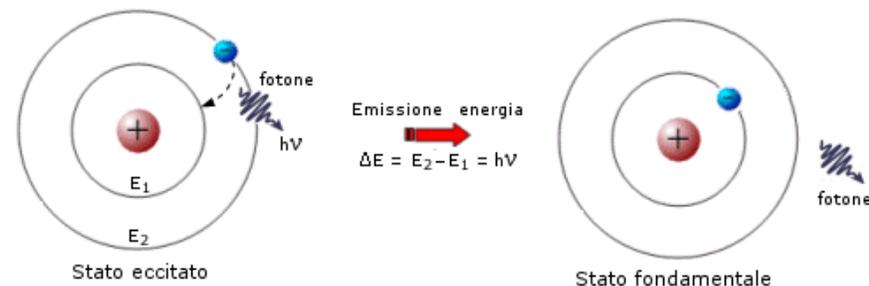
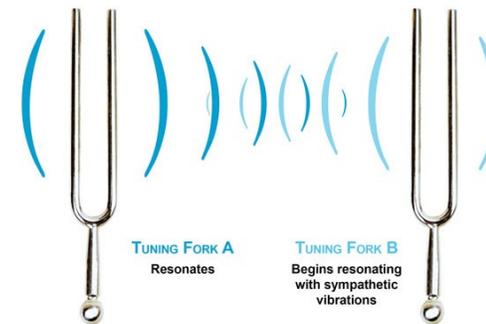
# SPETTRO ELETTROMAGNETICO : impiego



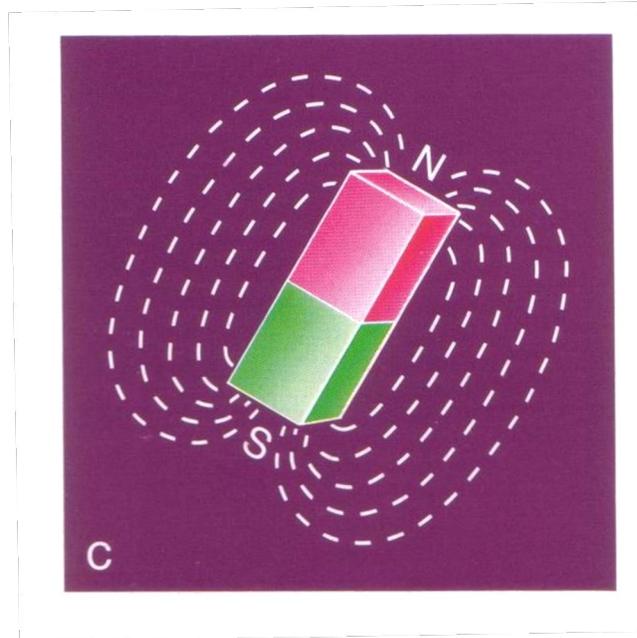
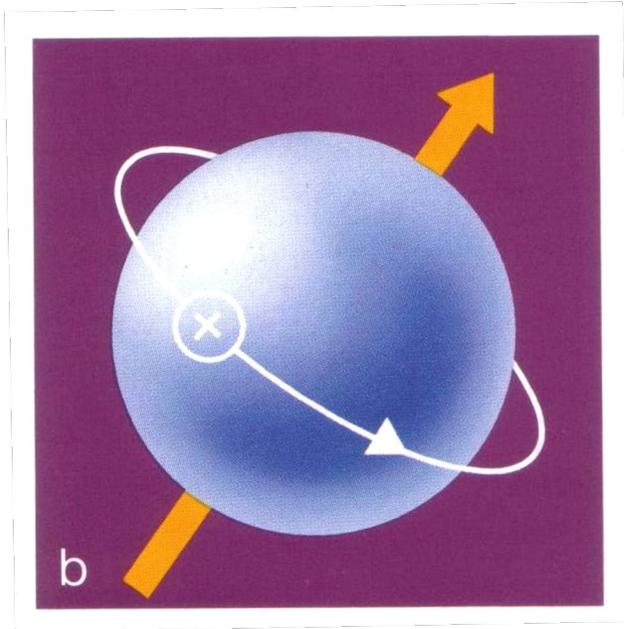
# Risonanza Magnetica Nucleare

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



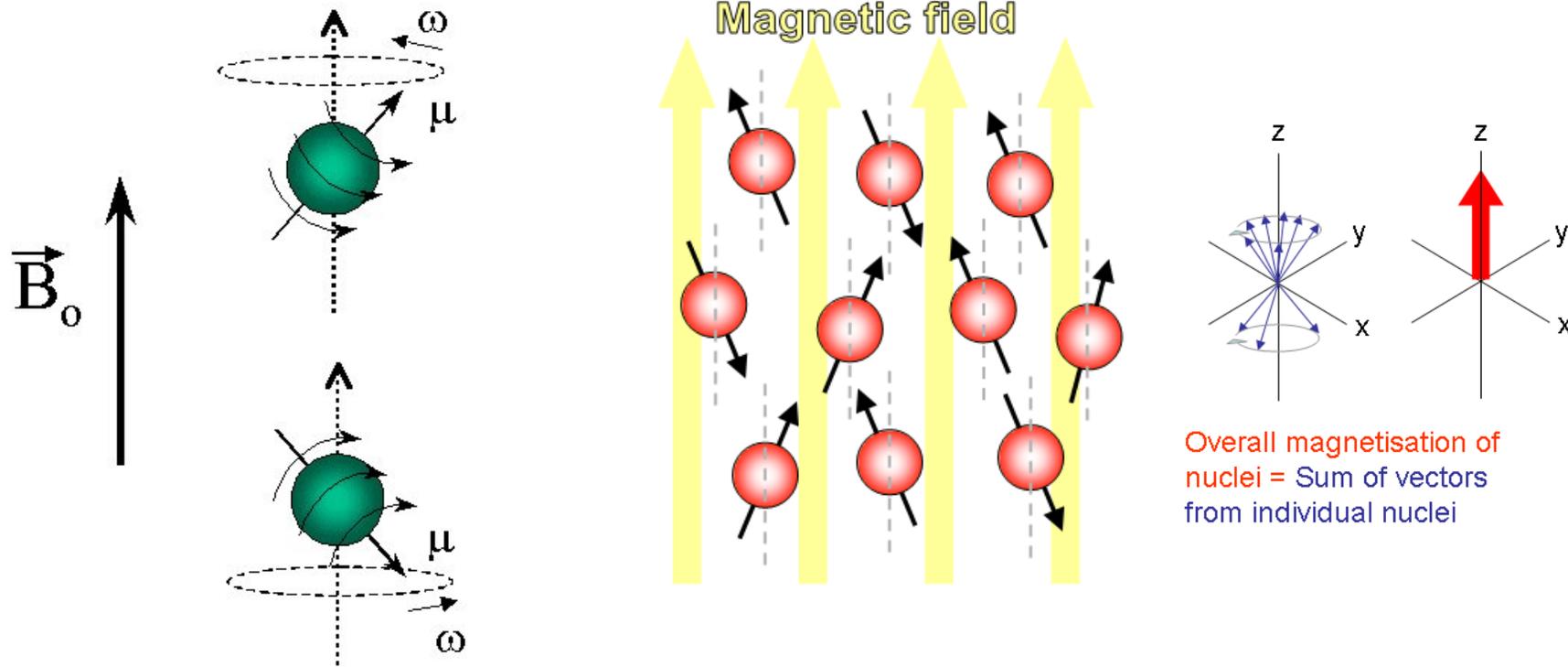
- Il nucleo atomico utilizzato per la formazione delle immagini di Risonanza Magnetica è quello degli **atomi di idrogeno** (“protone”)
- I nuclei degli atomi di idrogeno possiedono una proprietà chiamata **spin**. Lo spin fa sì che il protone si comporti come un piccolo magnete

# 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)
  - $\underline{G}_\xi$  – gradienti di campo magnetico che consentono la localizzazione del segnale

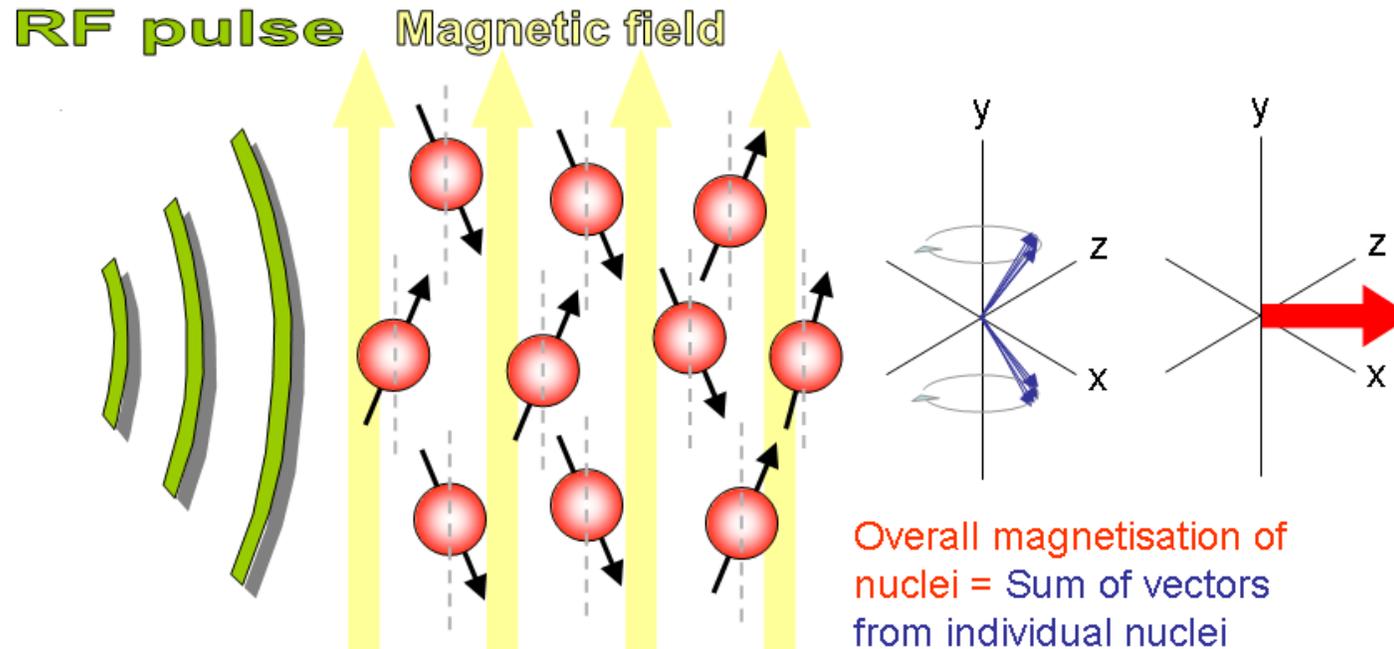
# Effetti del campo magnetico esterno

Punto di vista macroscopico (interpretazione semiclassica)



# Effetti del campo RF

Punto di vista macroscopico (interpretazione semiclassica)

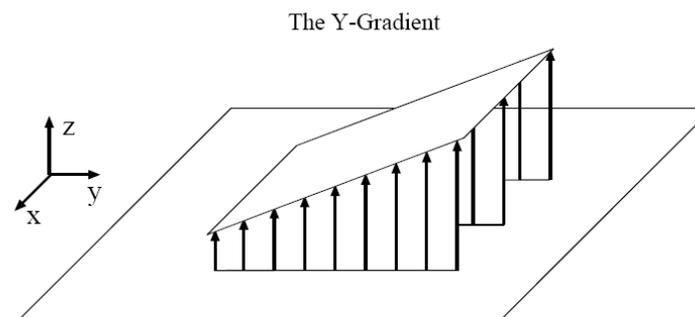
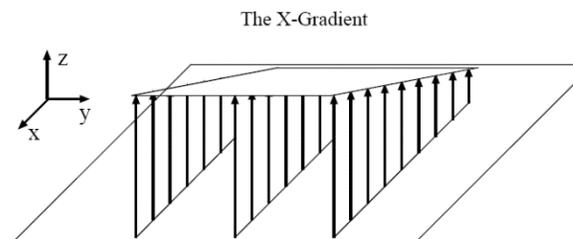
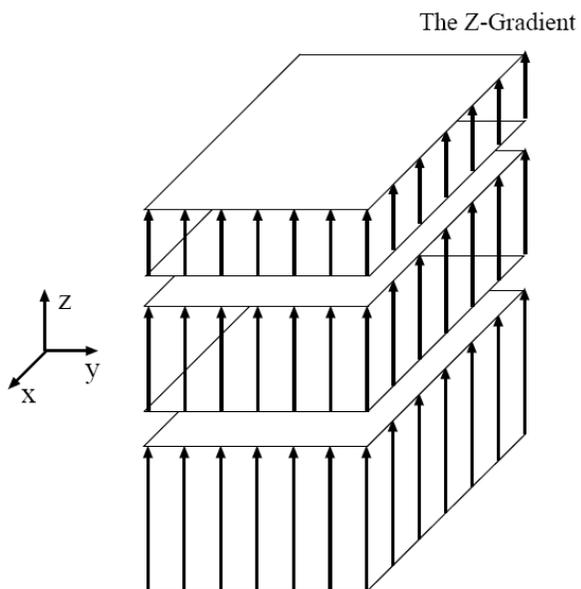


- Il vettore magnetizzazione  $\underline{M}$  ritorna nella posizione di equilibrio seguendo un moto di precessione attorno alla direzione del campo statico alla frequenza di Larmor.
- Questo moto coinvolge due fenomeni: il **rilassamento trasversale**, o annullamento della componente trasversale  $\underline{M}_{xy}$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

# Gradienti di campo

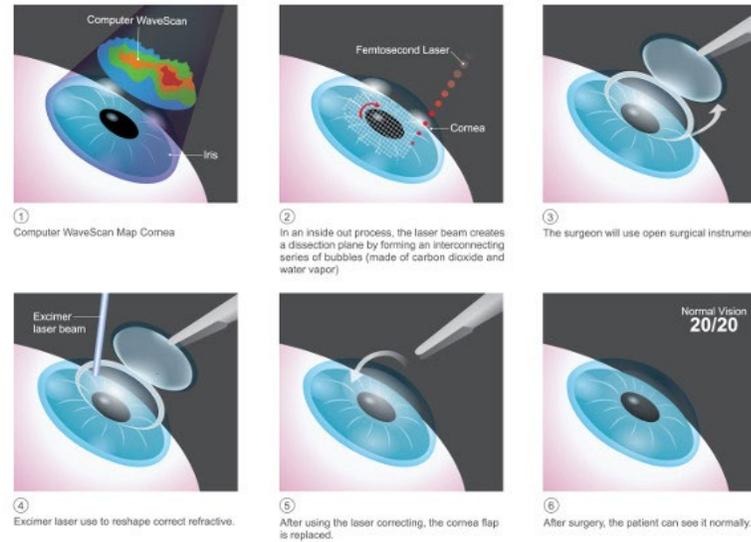
La localizzazione spaziale del segnale avviene creando dei **gradienti di campo** sugli assi x, y e z che producono una piccola variazione del campo magnetico principale come funzione di x, y e z.

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.

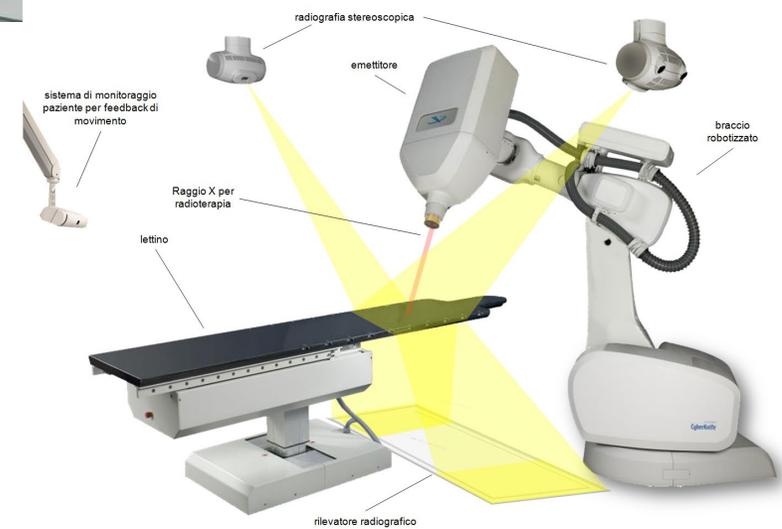
## Effetti stocastici (reazioni tissutali)

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

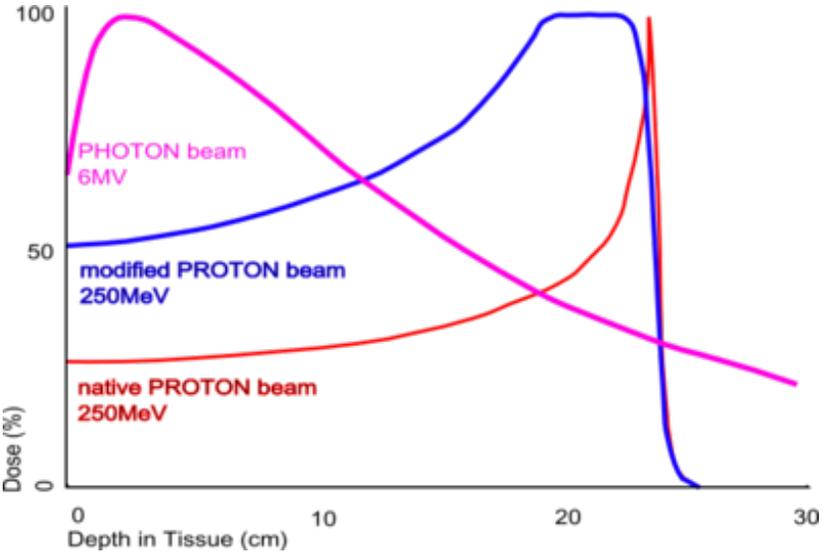


Gammaknife



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)