

Radiazioni

IL TRASPORTO DI ENERGIA ASSOCIATO ALLA PROPAGAZIONE
DI PARTICELLE O DI UN'ONDA ELETTROMAGNETICA E'
DESCRITTO DAL TERMINE **RADIAZIONE**

- **Radiazioni elettromagnetiche**

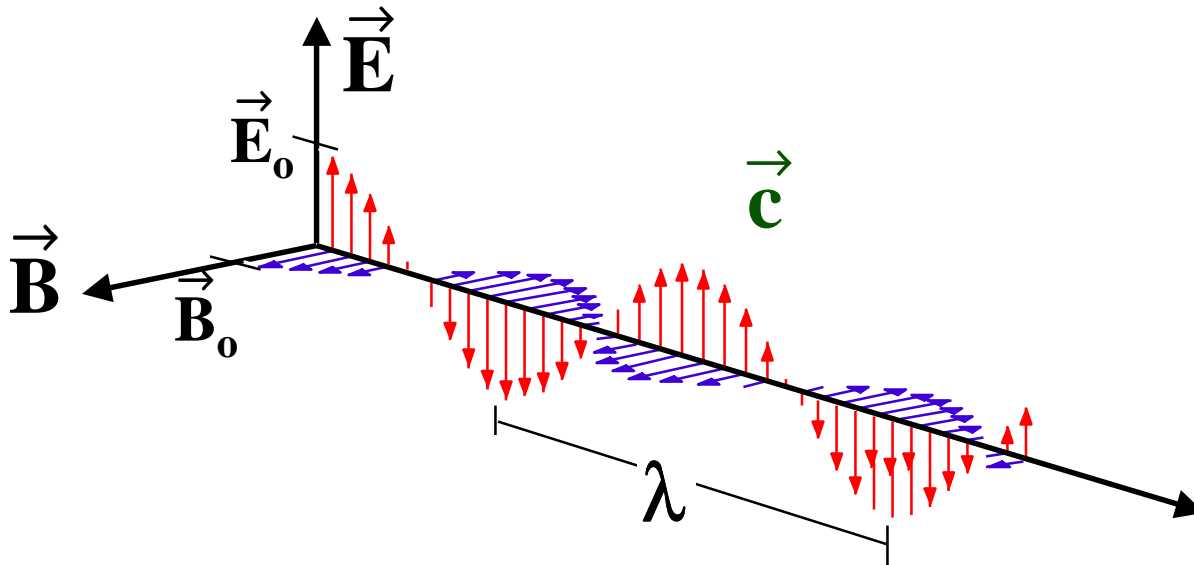
- Raggi X e raggi γ

- **Radiazioni corpuscolari**

- Raggi α , β , protoni, neutroni,

**Produzione ed
Assorbimento**

Onde elettromagnetiche



Lunghezza d'onda:

$$\lambda = cT = c/f$$

c : **velocità**
 f : **frequenza**
 $T=1/f$: **periodo**

Nel vuoto:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Intensità:

$$I = E / (S \cdot \Delta t) \text{ [W/m}^2\text{]}$$

E è l'energia che un'onda trasporta attraverso una superficie

S in un intervallo di tempo Δt

Teoria dei quanti

Planck (1900) ed Einstein (1905) ipotizzarono che l'energia di un'onda elettromagnetica è trasportata in "pacchetti" detti "quanti di luce" o **FOTONI**.

I FOTONI:

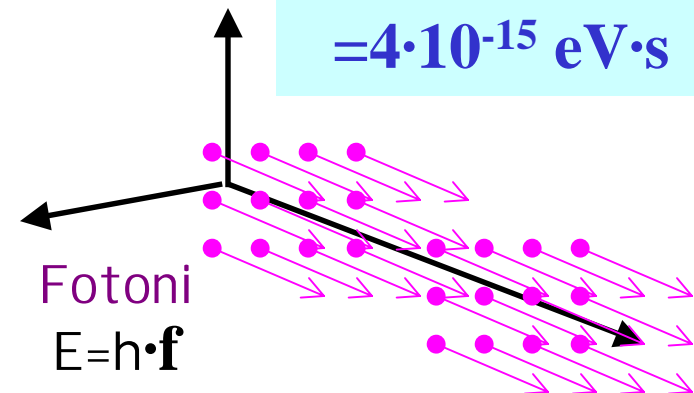
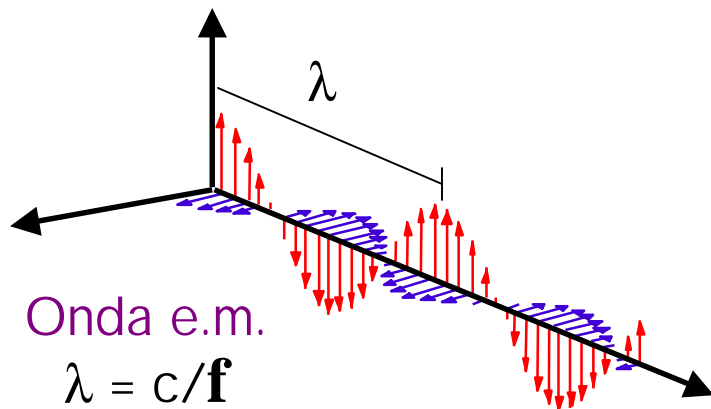
- sono particelle prive di massa ($m=0$);
- si propagano con velocità della luce $c=3\cdot 10^8$ m/s
- hanno ciascuno energia **E** proporzionale alla frequenza f dell'onda elettromagnetica:

$$E=h\cdot f$$

Costante di Planck

$$h= 6,6\cdot 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$$

$$=4\cdot 10^{-15}\text{eV}\cdot\text{s}$$



Esempio

Teoria dei quanti

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 600 \text{ nm} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m} \\ f &= c/\lambda = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \end{aligned} \right\} \text{ (visibile : luce gialla)}$$

L'energia trasportata dai fotoni risulta pari a

$$\begin{aligned} E &= h \cdot f = (6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) \cdot (5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}) = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \\ &= 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot \frac{1 \text{ eV}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \approx 2 \text{ eV} \end{aligned}$$

Ricorda: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

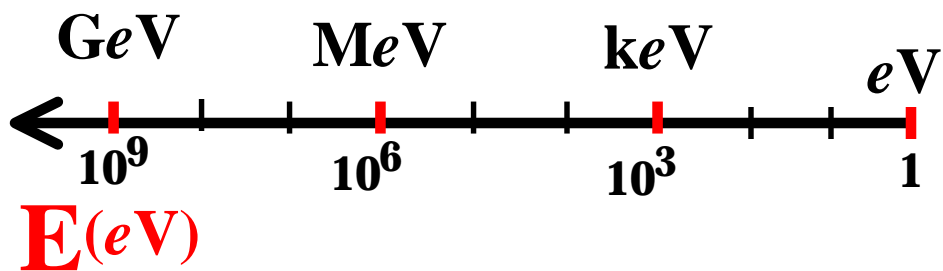
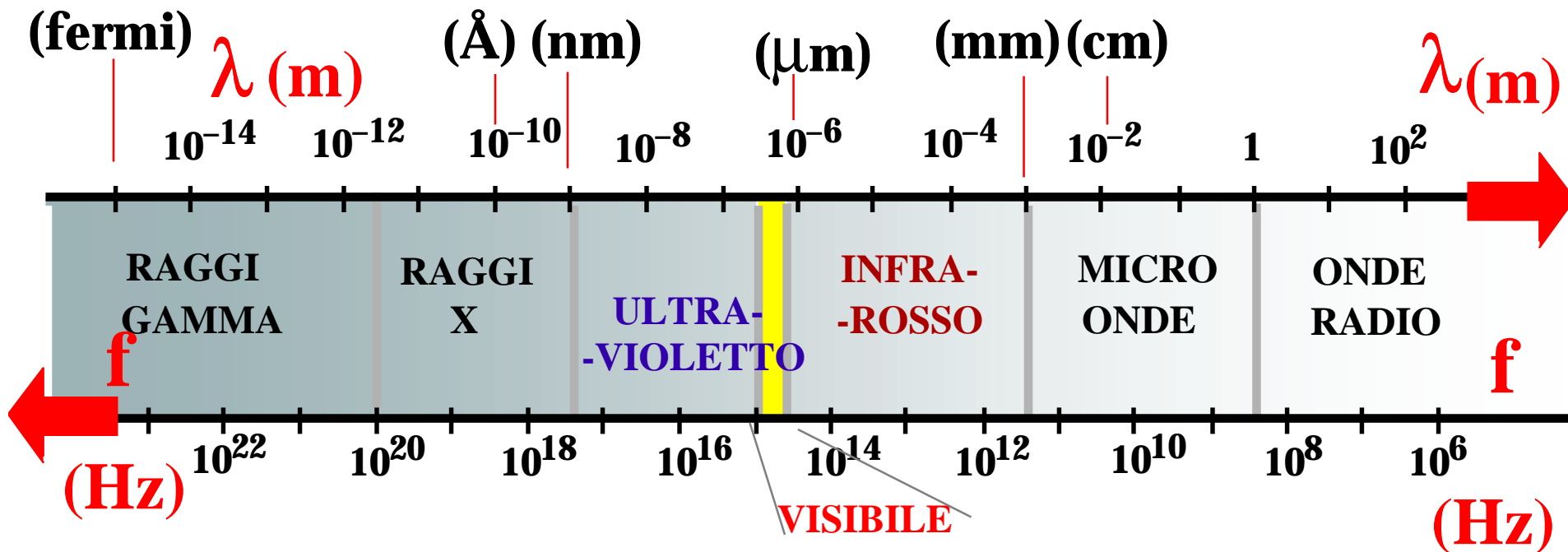
Nota:

Intensità di
un'onda
elettromagnetica
 $I = E/S \cdot \Delta t$



Flusso di fotoni
che attraversano
la superficie S nel
tempo Δt

Spettro delle onde elettromagnetiche



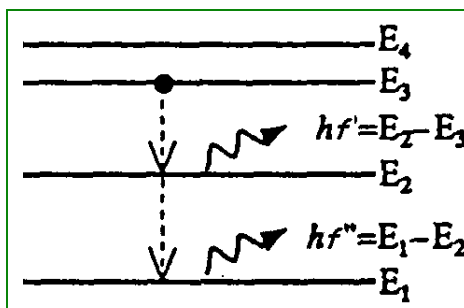
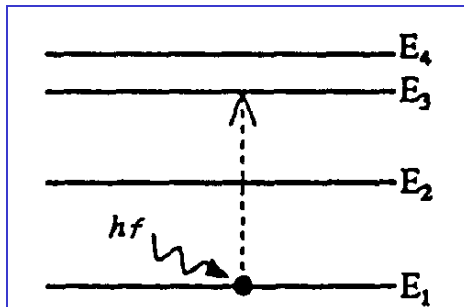
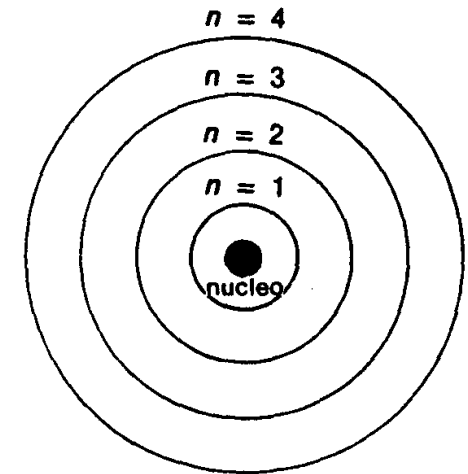
$$\lambda f = c$$

$$E = hf$$

Transizioni atomiche

n = numero quantico principale

- 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.



Le onde elettromagnetiche vengono sempre emesse ed assorbite dalla materia sotto forma di fotoni:

- **Eccitazione**: passaggio dal livello fondamentale ad un livello eccitato tramite assorbimento di un fotone;
- **Diseccitazione**: ritorno al livello fondamentale tramite emissione di uno o più fotoni.

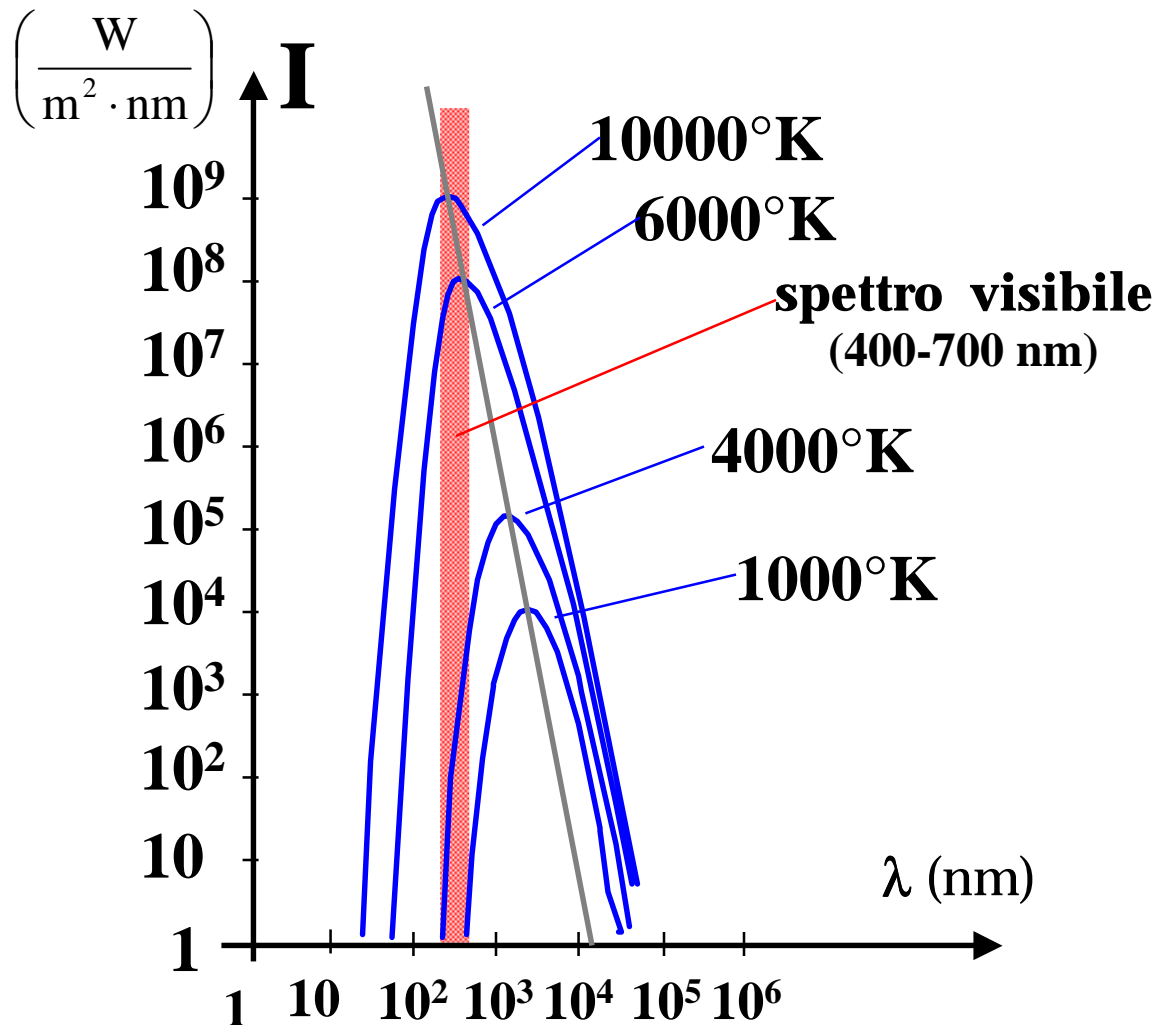
Nelle transizioni atomiche:

$$f = \Delta E / h$$

(ΔE = diff. di energia tra i livelli atomici)

Radiazione termica

Nei solidi, i livelli energetici sono molto ravvicinati \longrightarrow Spettro continuo



Emissione termica

Infrarosso \leftrightarrow Ultravioletto

● legge di Stefan

$$I = \sigma T^4 \quad (\text{watt/m}^2)$$

● legge di Wien

$$\lambda_{I_{\max}} = \frac{0.2897}{T} \quad (\text{cm})$$

Ionizzazione

IL TRASPORTO DI ENERGIA ASSOCIATO ALLA PROPAGAZIONE DI PARTICELLE o DI UN'ONDA ELETTROMAGNETICA E' CHIAMATO **RADIAZIONE**

LE **RADIAZIONI** SI SUDDIVIDONO IN

NON IONIZZANTI (N.I.R.)

$E < 12 \text{ eV}$

Non hanno energia sufficiente per ionizzare l'atomo

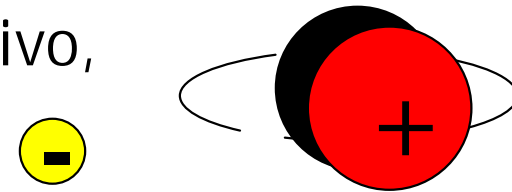
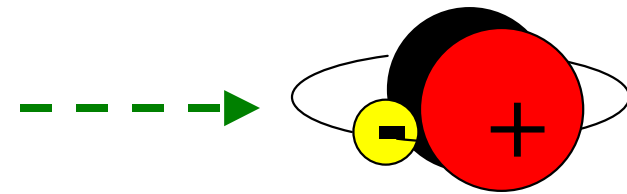
IONIZZANTI

$E > 12 \text{ eV}$

Hanno energia sufficiente per ionizzare l'atomo

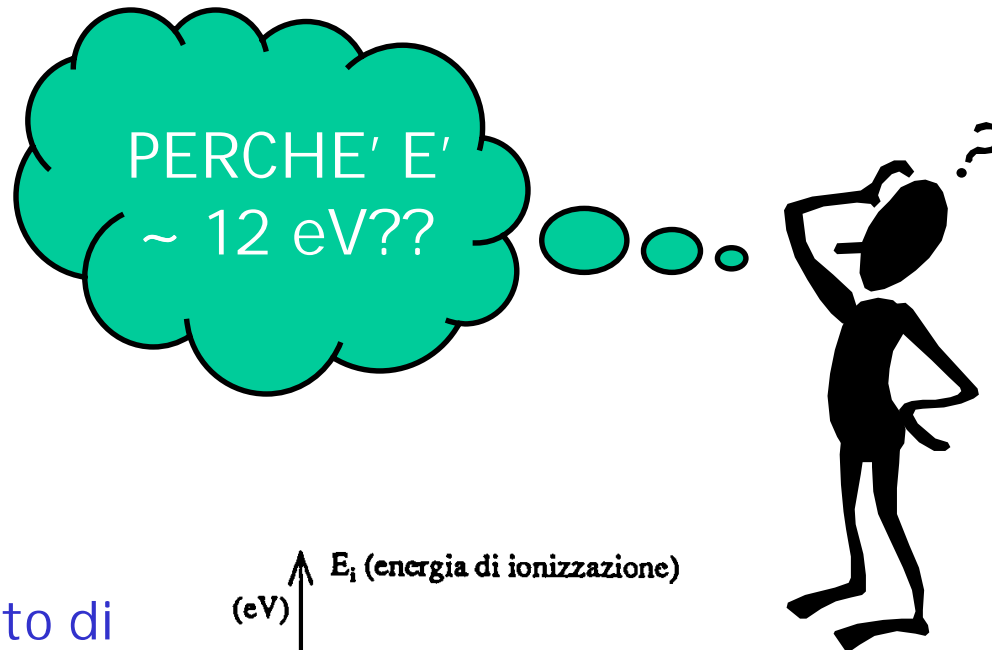
Fenomeno della IONIZZAZIONE

Le radiazioni sono ionizzanti se, interagendo con un atomo, sono in grado di spezzare il legame tra un elettrone e il nucleo dell'atomo e creare una coppia di ioni, uno negativo, l'elettrone libero, e uno positivo, cioè l'atomo privo di elettrone.



Energia di ionizzazione: la minima energia necessaria per rimuovere un elettrone da un atomo

IL CONFINE TRA RADIAZIONI IONIZZANTI E NON IONIZZANTI



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



Radiazioni ionizzanti

radiazioni ionizzanti : $E > 12 \text{ eV}$

☀ **radiazioni elettromagnetiche** ($m = 0$) $E = h f$

- **fotoni X e fotoni γ**

☀ **radiazioni corpuscolari** ($m > 0$) $E = \frac{1}{2} m v^2$

- **alfa** (nucleo ${}^4\text{He}$)
- **beta** (elettroni e^- , positroni e^+)
- **protoni**
- **neutroni**
- **ioni** (nuclei)

INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

L'**INTERAZIONE** sarà diversa a seconda di:

- ENERGIA
- NATURA DEL MEZZO (numero atomico, spessore)

3 SONO i PRINCIPALI

"FENOMENI" di **INTERAZIONE** di un fascio di fotoni con un mezzo materiale:

1. Effetto Fotoelettrico
2. Effetto Compton
3. Produzione di Coppie



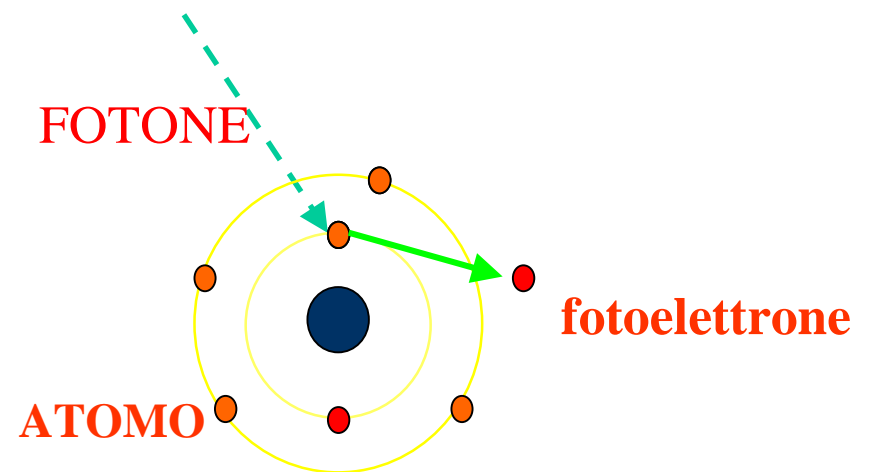
- Dipendono dall'energia del fascio
- Generano elettroni liberi nel mezzo

INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

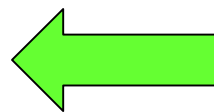
1. EFFETTO FOTOELETTRICO (per U.V., X)

ENERGIA < 100 keV

Un fotone, urtando con un atomo, viene assorbito e TUTTA la sua energia è ceduta ad un elettrone legato, generalmente delle orbite più interne, che si "libera" dall'atomo con una certa energia cinetica.



La probabilità di interazione del fotone è elevata per i materiali con **alto numero atomico Z**

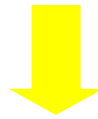


**DI INTERESSE IN
RADIODIAGNOSTICA**

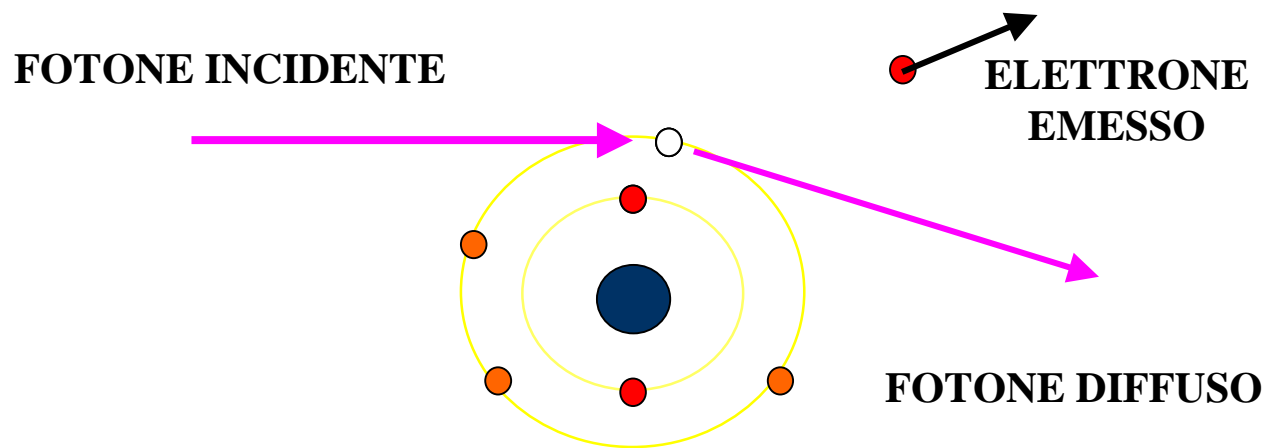
INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

2. EFFETTO COMPTON (per X) $100 \text{ keV} < \text{ENERGIA} < \sim \text{MeV}$

Un fotone cede parte della propria energia ad un elettrone di valenza dell'atomo.



L'elettrone viene emesso dall'atomo e il fotone diffonde



La probabilità di interazione del fotone è approssimativamente indipendente dal numero atomico Z

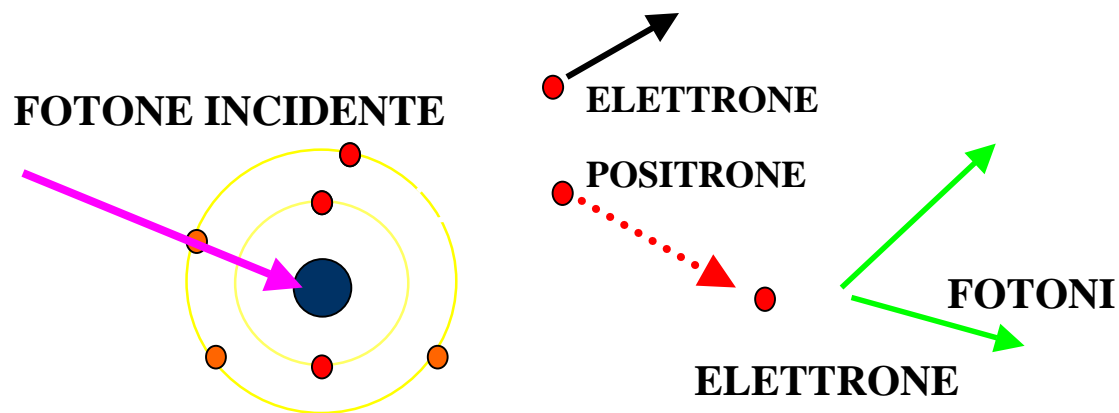
INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

3. PRODUZIONE DI COPPIE (per γ)

$\sim 1.02 \text{ MeV} < \text{ENERGIA} < 10 \text{ MeV}$

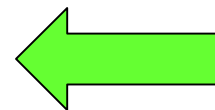
Un fotone in prossimità del nucleo si trasforma in un **ELETTRONE** e un **POSITRONE**

(elettrone con carica positiva)



Al termine del suo percorso nel mezzo, il positrone si combina con un elettrone "libero", dando origine a 2 **FOTONI "DI ANNICHI LAZIONE"**

La probabilità di interazione del fotone cresce con il numero atomico **Z** ed è trascurabile per energie $E < 5 \text{ MeV}$



**DI INTERESSE IN
RADIOTERAPIA**

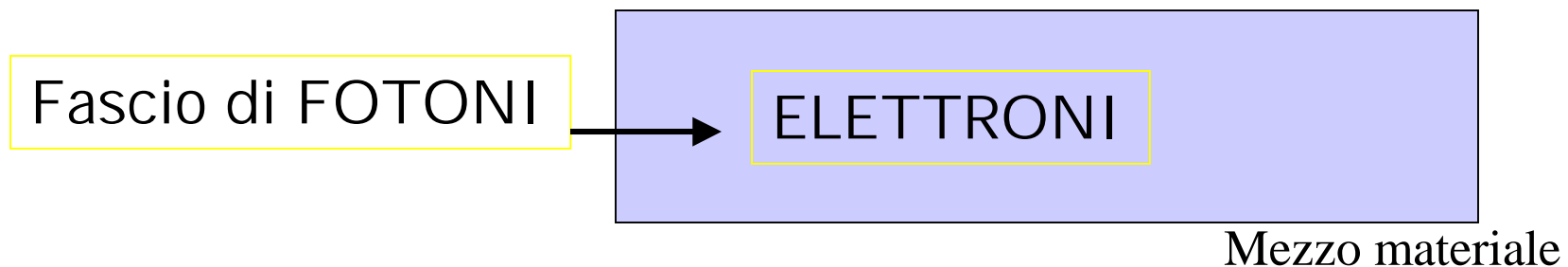
INTERAZIONE DEI FOTONI CON LA MATERIA

Riassumendo

DAI **3 processi** di interazione si producono quindi

ELETTRONI liberi

Queste particelle cariche (carica $-e = -1.6 * 10^{-19}$ C),
dotate di una certa energia assorbita dal fascio di fotoni
incidenti, cedono a loro volta l'energia nel mezzo

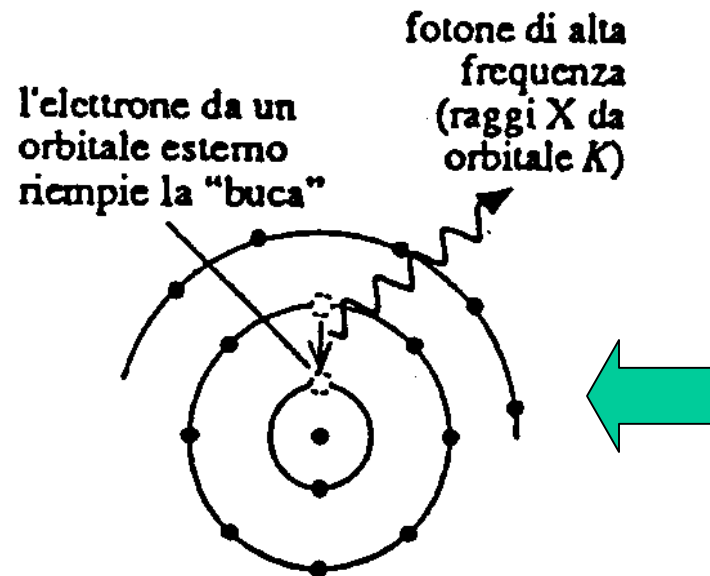
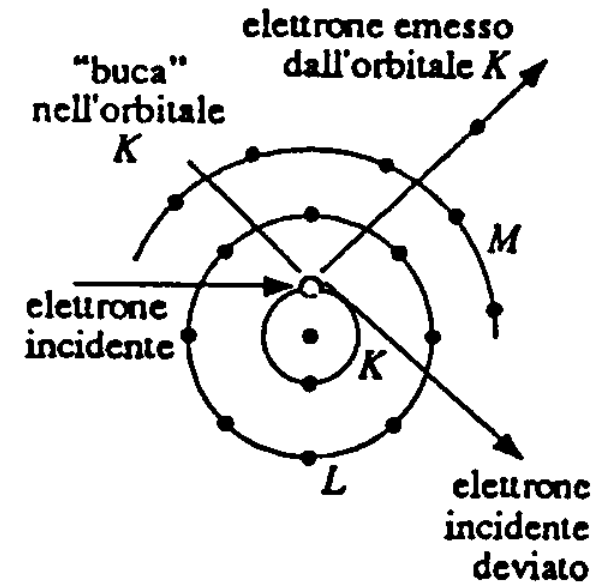


COME SI COMPORTANO GLI ELETTRONI NEL MEZZO?

INTERAZIONE DEGLI ELETTRONI CON LA MATERIA

1.) IONIZZAZIONE diretta

L'elettrone, interagendo con un atomo, è in grado di spezzare il legame tra un elettrone atomico e il nucleo dell'atomo e creare una coppia di ioni, uno negativo, l'elettrone libero, e uno positivo, cioè l'atomo privo di elettrone.



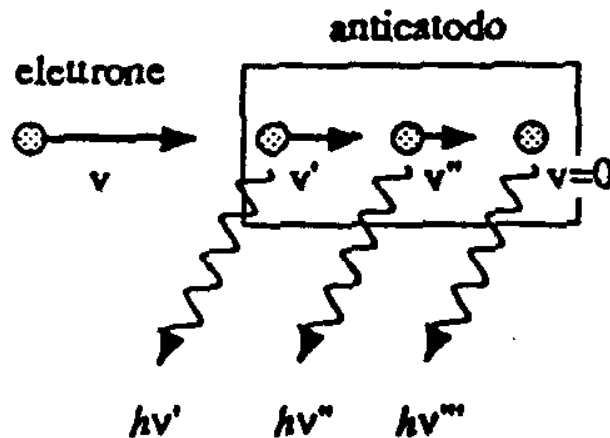
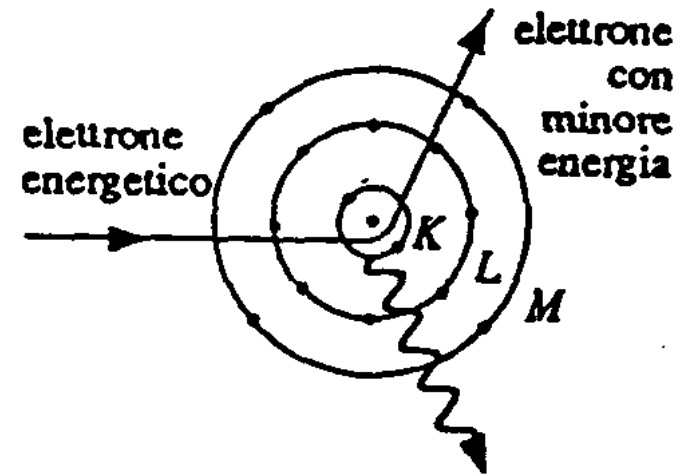
Un elettrone di un'orbitale più esterno riempie l'orbitale interno vacante emettendo un fotone di alta frequenza
⇒ **raggio X**

INTERAZIONE DEGLI ELETTRONI CON LA MATERIA

2.) Il processo di FRENAMENTO

Il percorso degli elettroni viene continuamente deflesso a causa della presenza del campo elettrico creato dai protoni degli atomi del mezzo. Gli elettroni decelerano e dunque perdono energia sotto forma di raggi X detti "di frenamento".

Questo processo è chiamato "**Bremsstrahlung**".



È il fenomeno su cui si basa la produzione artificiale dei raggi X !!

Radiazioni ionizzanti: produzione

raggi X

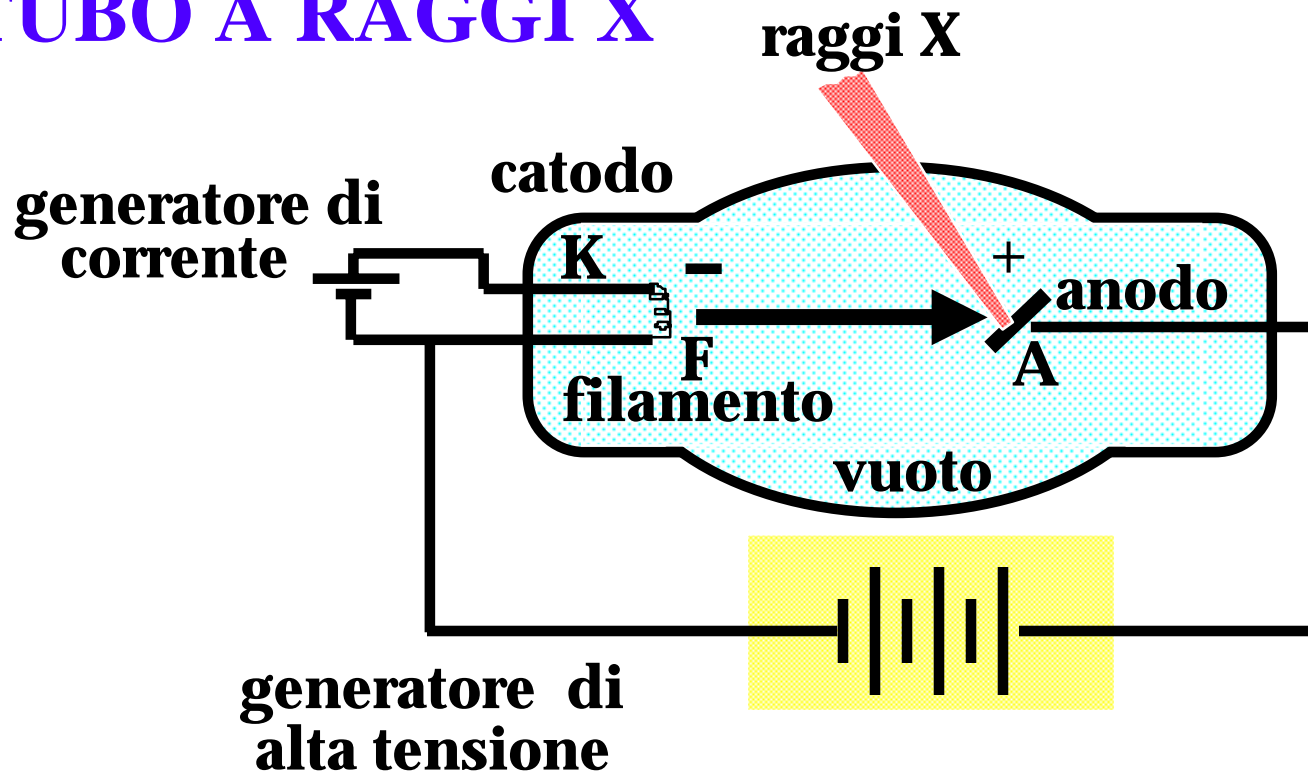
- produzione artificiale
 - tubo a raggi X

raggi γ e radiazione corpuscolare

- produzione naturale
 - emissione α β e γ da decadimento di nuclei instabili (radionuclidi)
- produzione artificiale
 - acceleratori di particelle

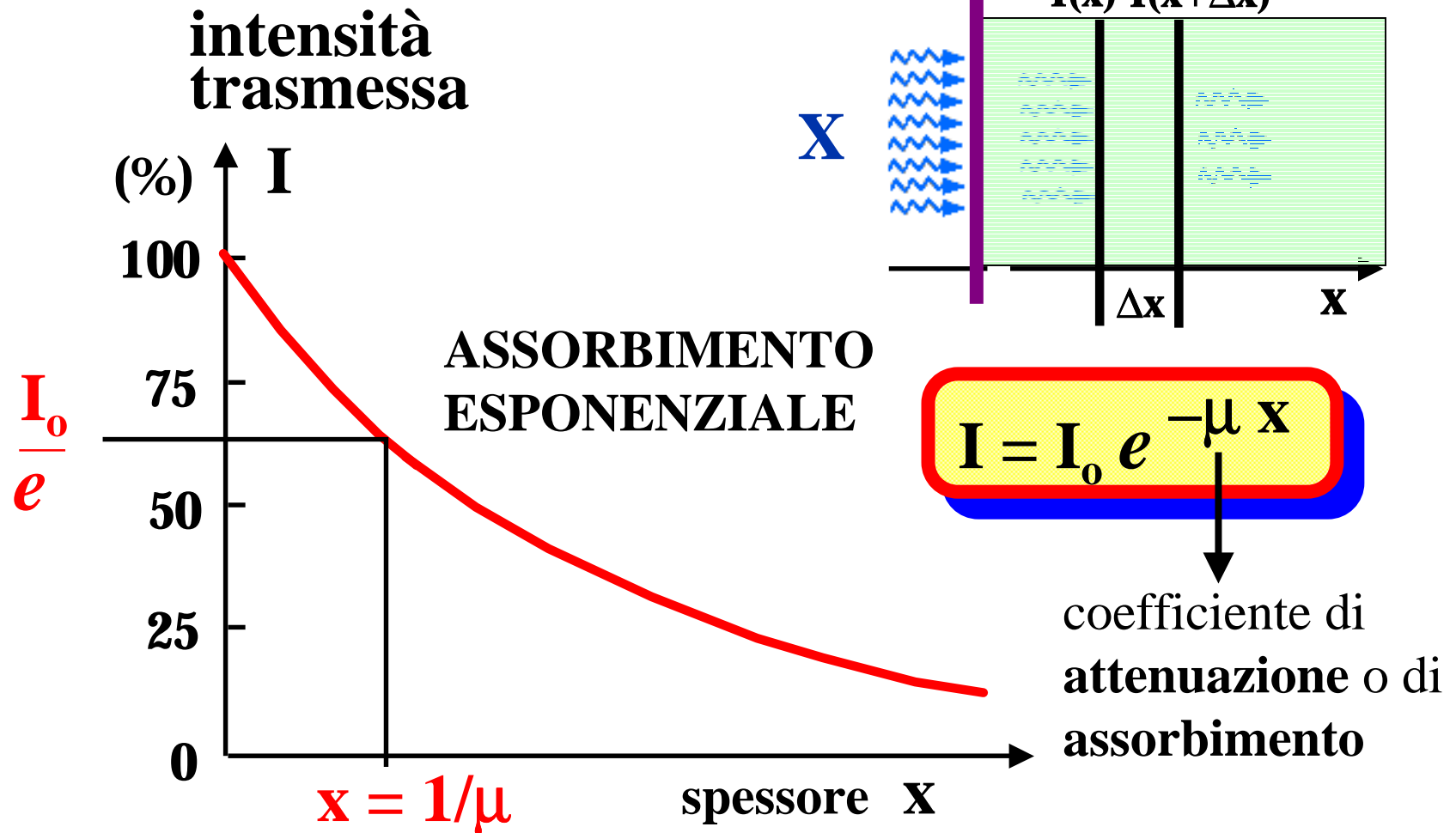
RAGGI X: PRODUZIONE

TUBO A RAGGI X

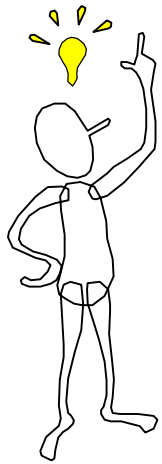


Tensione nel tubo e corrente nel filamento sono regolabili dall'operatore.

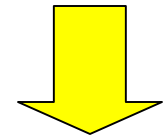
Assorbimento dei raggi X



L'immagine radiologica



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



ASSORBIMENTO DIFFERENZIATO

del fascio di fotoni X

allorchè esso attraversa strati di materiale disomogeneo

L'immagine radiologica

Elementi chimici presenti nell'organismo:

idrogeno

carbonio

azoto

ossigeno

componenti organiche

basso numero atomico



basso potere di assorbimento
dei raggi X

fosforo

calcio

cloro

componenti inorganiche

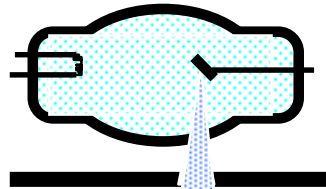
elevato numero atomico



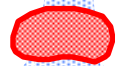
alto potere di assorbimento
dei raggi X

Radiografia

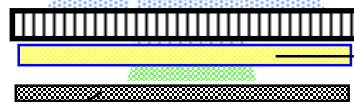
tubo a raggi X



struttura
biologica



diaframmi



schermo
fluorescente

pellicola radiografica

- immagine **negativa**
- sviluppo della pellicola

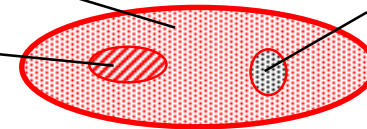
fascio X incidente

muscolo

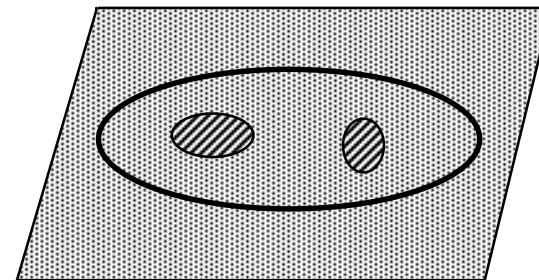


aria

osso



fascio X trasmesso



pellicola radiografica

Radiografia

contrasto radiologico

parametri : potenziale elettrico
 intensità di corrente
 tempo di esposizione

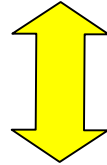
$$\Delta V \longrightarrow 20 \text{ kV} \div 130 \text{ kV}$$

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

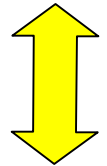
$$\Delta t \longrightarrow 1/60'' \div 1/120''$$

Tubi a raggi X

TENSIONE (kV) APPLICATA AL TUBO



ENERGIA (keV) ELETTRONI ACCELERATI



ENERGIA MASSIMA FOTONI PRODOTTI

$$E_{\max} = e \cdot \Delta V$$

L'energia MEDIA DEI FOTONI è circa
1/3 DELL'ENERGIA MAX

Spettro dei raggi X

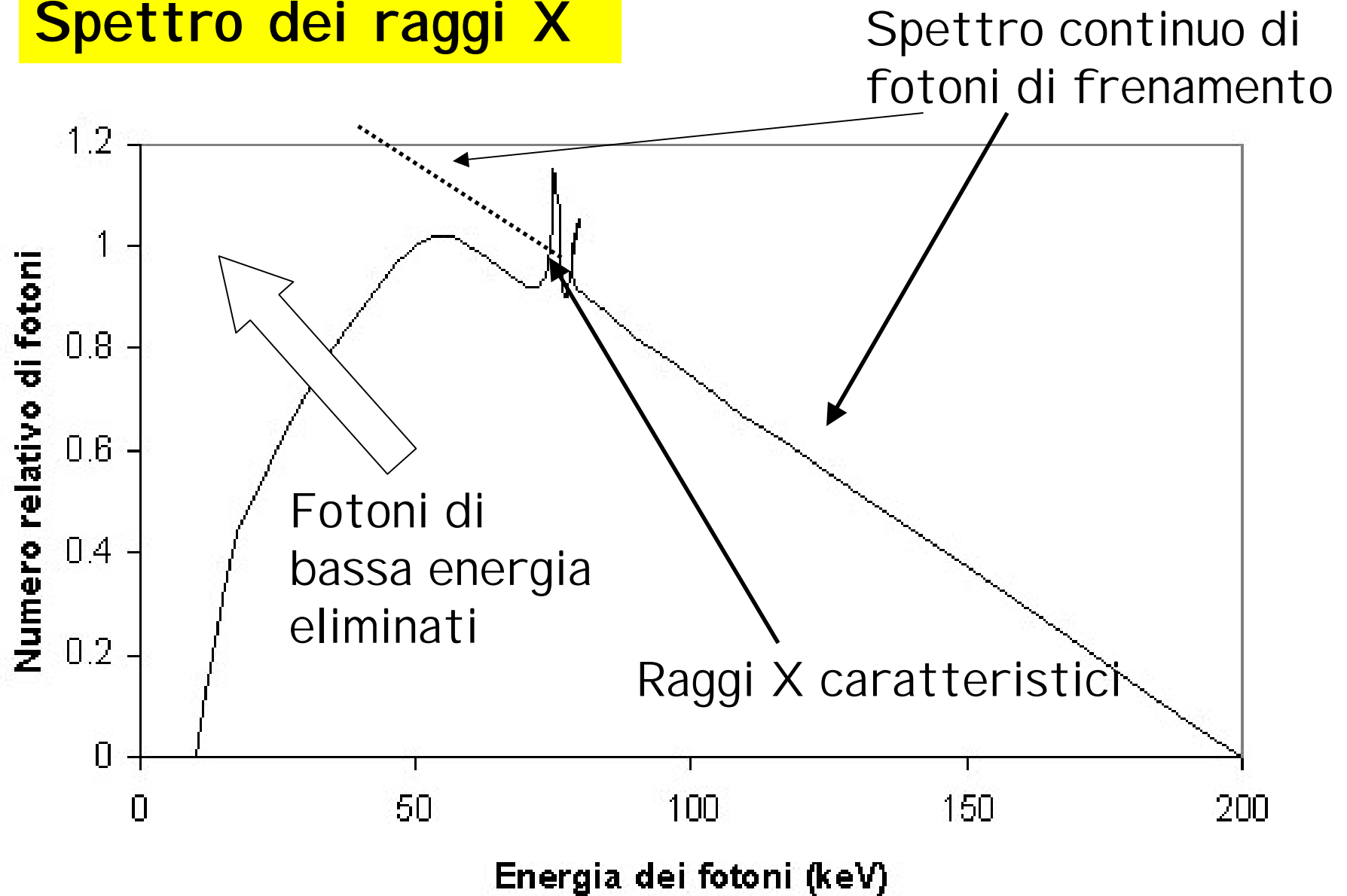
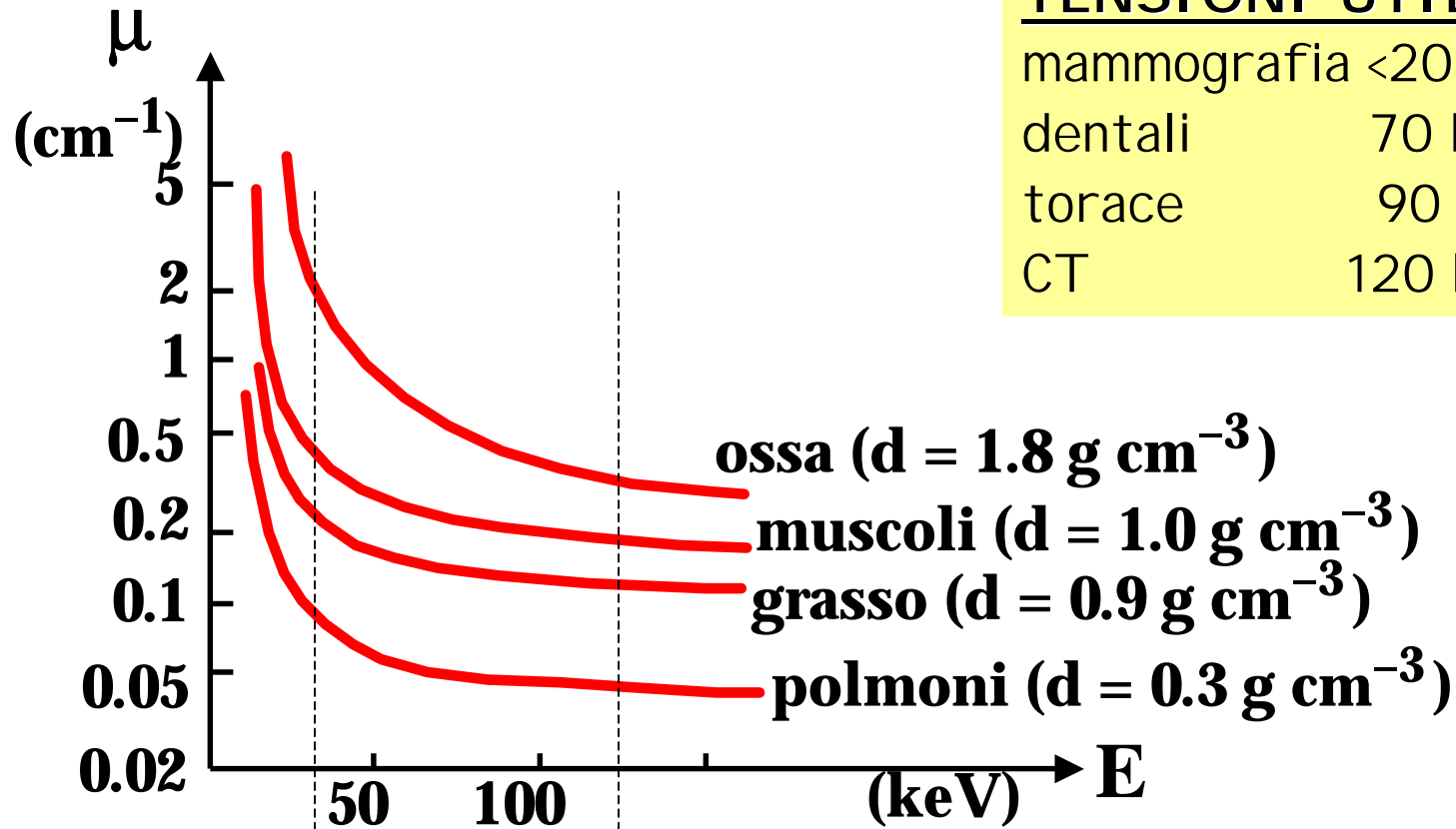


IMMAGINE RADIOLOGICA

Diversa opacità delle strutture biologiche
(diverso **coefficiente di assorbimento**)



TENSIONI UTILIZZATE :

mammografia <20 kV

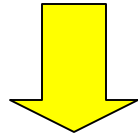
dentali 70 kV

torace 90 kV

CT 120 kV

Tubi a raggi X

CORRENTE degli elettroni: $I = Q / t$



NUMERO di FOTONI

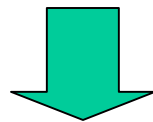
CORRENTI UTILIZZATE: 0.5 -500 mA

Radioattività



Cos'è una SOSTANZA RADIOATTIVA ?

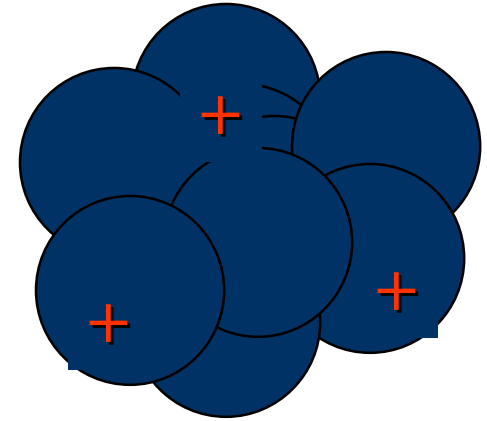
Una sostanza si definisce radioattiva se è costituita da atomi instabili che decadono emettendo radiazioni. Sfruttando l'interazione di queste radiazioni con i diversi tessuti biologici è possibile ottenere informazioni diagnostiche o benefici terapeutici.



Per comprendere l'impiego di un radiofarmaco è dunque necessario conoscere meglio il fenomeno del decadimento radioattivo e quindi la struttura
dell'ATOMO e del NUCLEO

L' ATOMO

Protoni (p) e **neutroni (n)** (NUCLEONI)
costituiscono il NUCLEO dell'atomo,
attorno al nucleo sono disposti su
differenti orbite gli **elettroni (e)**



X **A: NUMERO DI MASSA**
numero dei protoni + neutroni presenti
nell'atomo

Z : NUMERO ATOMICO
numero dei protoni e degli elettroni
dell'atomo X

La forza nucleare

In base alle forze che conosciamo (gravitazionale ed elettromagnetica) i protoni dovrebbero respingersi violentemente e quindi distruggere o impedire la formazione dei nuclei atomici.

A MENO CHE...

A MENO CHE...

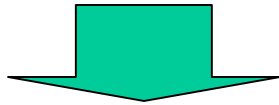
All'interno dei nuclei atomici si manifesta una ulteriore nuova forza di attrazione, capace di "incollare" tra loro i protoni vincendo la loro repulsione coulombiana.

Caratteristiche della forza nucleare:

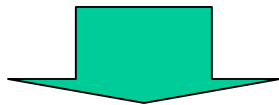
- **E' sempre attrattiva**
- **Si manifesta solo a distanze $d \approx 10^{-15}$ m**
- **Vale tra protoni, tra neutroni, tra protoni e neutroni**

Curva di stabilità

Per A elevati, la repulsione elettrica tende a prevalere

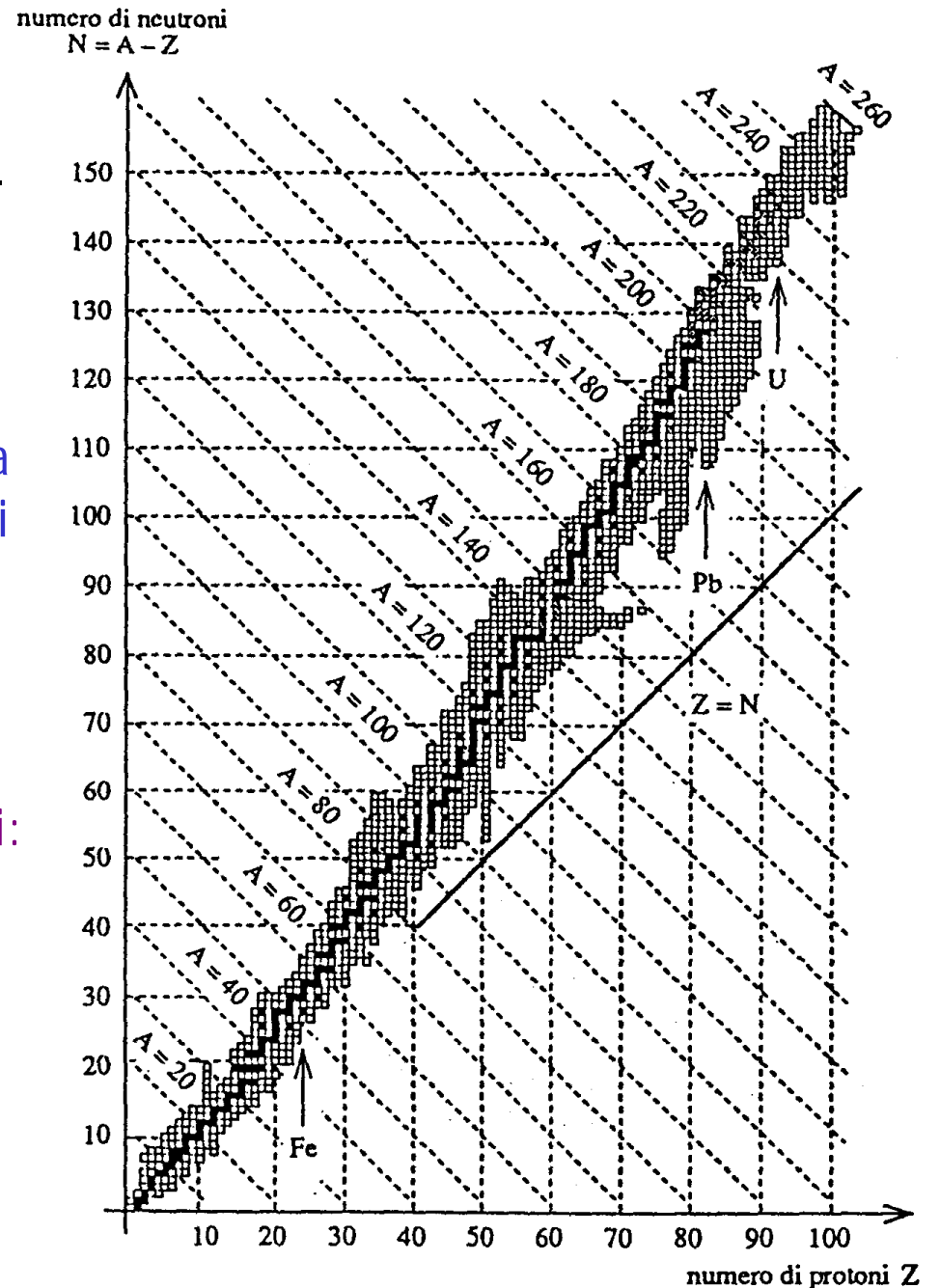


Per mantenere la stabilità il sistema reagisce arricchendo il nucleo di componenti neutre (neutroni)



Per $Z > 82$ non esistono atomi stabili:
Gli atomi decadono emettendo
radiazioni

⇒ **Radioisotopi**

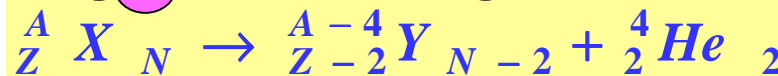
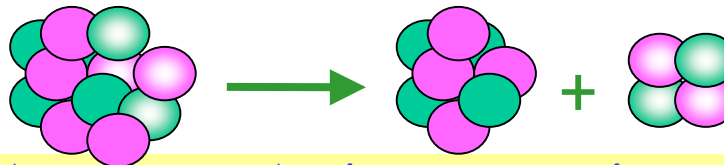


Radioattività = trasformazione spontanea o artificiale dei nuclei con emissione di radiazione corpuscolare → particelle
elettromagnetica → energia

Tipi di decadimento:

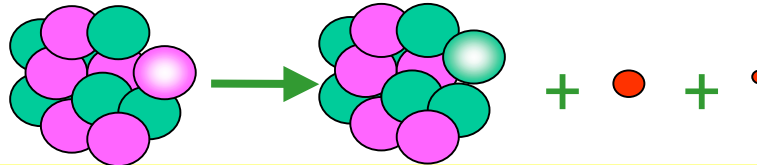
α

Nuclei pesanti



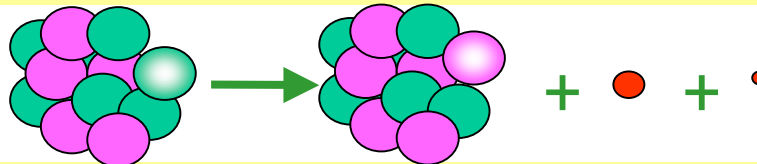
β^-

Nuclei con troppi neutroni



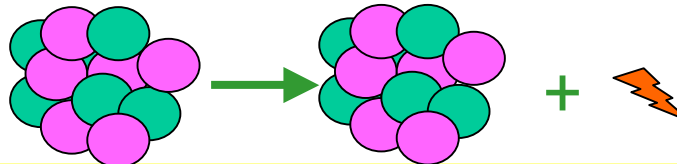
β^+

Nuclei con pochi neutroni



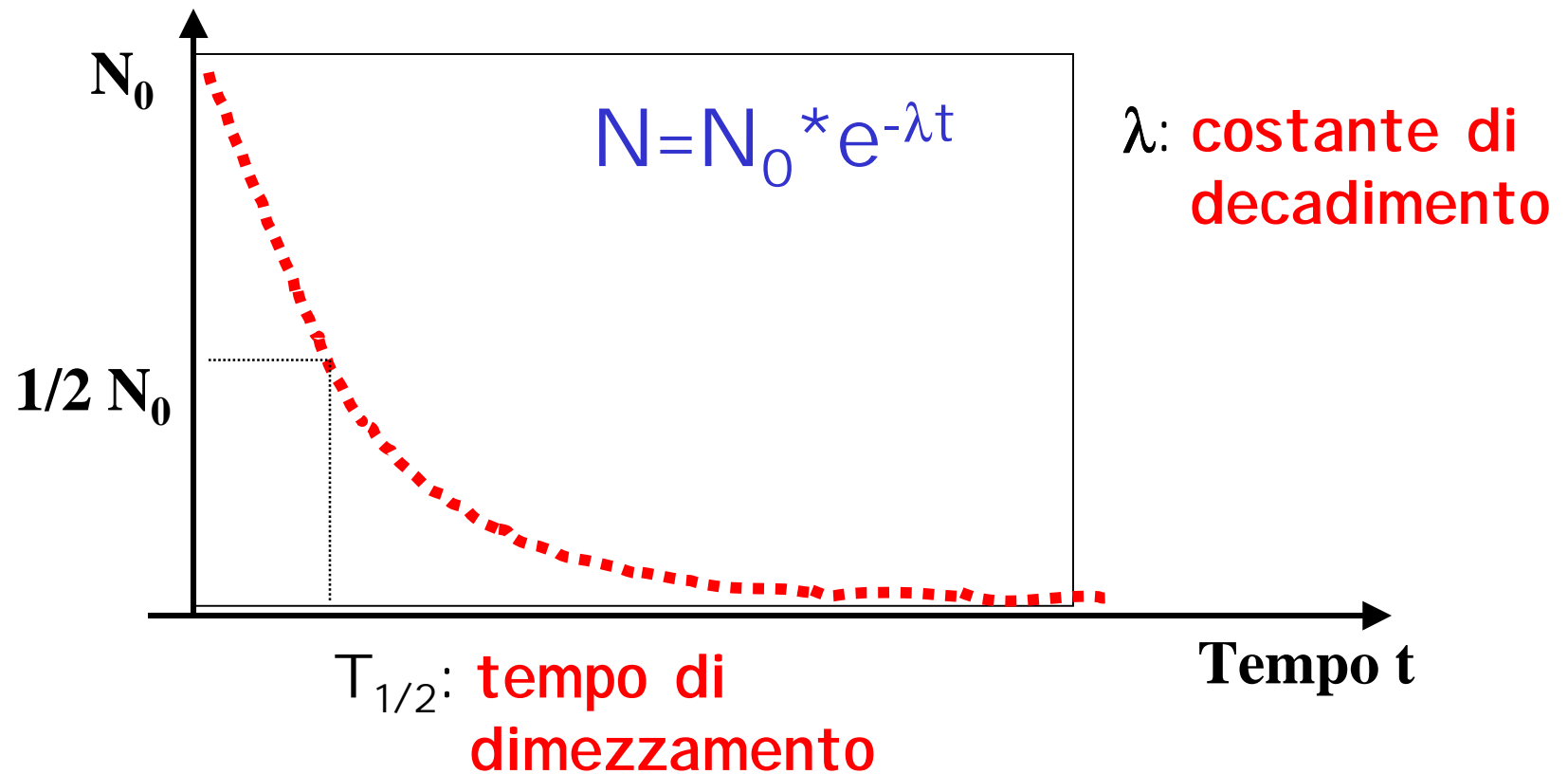
γ

Spesso dopo decadimento α o β



Legge del DECADIMENTO RADIOATTIVO

$N(t)$: numero di nuclei non ancora decaduti al tempo t



$$T_{1/2} = 0,693/\lambda$$

DECADIMENTO RADIOATTIVO

ATTIVITA' A di una sorgente:

Numero di nuclei che decadono nell'unità di tempo :

$$A(t) = \lambda N(t)$$

A si misura in Curie (Ci) o Bequerel (Bq)

1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ disintegrazioni /secondo

1 disintegrazione /secondo = 1 Bq

I radioisotopi sono utilizzati in
diagnostica e terapia

Radioisotopi: diagnostica

radiodiagnostica

- radioisotopi** → **■ radiofarmaci**
- diffusione nell'organismo**
- decadimento radioattivo**
- rivelazione radiazione**

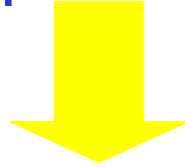
Radioisotopi: terapia

- ☀ **cobaltoterapia** ^{60}Co γ (1.3 MeV)
- ☀ **fasci di elettroni** (acceleratori di particelle)
- ☀ **fasci gamma** (acceleratori di particelle)
- ☀ **adroterapia** (acceleratori di particelle)
 - **protoni**
 - **neutroni (BNCT)**
 - **ioni pesanti**

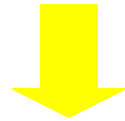


Boron Neutron Capture Therapy

Cosa succede ad un organismo biologico
quando viene colpito da una radiazione?



GLI EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADI AZIONI



Il Danno Biologico si distingue in

1. Danno **FISICO**
2. Danno **CHIMICO**



Gli elettroni secondari
sono i **RESPONSABILI**
del **DANNO BIOLOGICO**

FASE FISICA

L'interazione delle radiazioni con la struttura cellulare che costituisce il tessuto biologico può causare danni fisici diretti letali per la cellula:

se la deposizione di energia è elevata si possono avere infatti **mutazioni nella replicazione cellulare a causa della rottura delle eliche del DNA.**

In questo caso la cellula non si riproduce correttamente:



MORTE CELLULARE

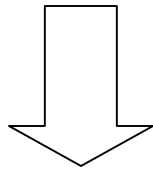
Questo effetto è **POSITIVO**: se si vuole distruggere un tessuto malato (tumore)

NEGATIVO: se si colpisce un tessuto sano

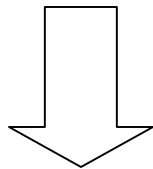
FASE CHIMICA

La radiazione incidente nel tessuto biologico oltre ad un danno direttamente letale per la cellula (fase F I S I C A), in seguito ai fenomeni di ionizzazione ed eccitazione genera delle specie chimiche altamente dannose per l'organismo

RADIAZIONE



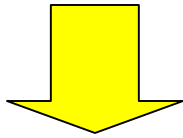
MOLECOLE D'ACQUA



Reazioni chimiche negli atomi dell'organismo

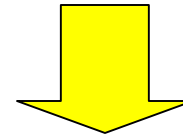
AZIONE DIRETTA

- scissione di legami inter e intra molecolari
- formazione di ponti inter e intra molecolari



AZIONE INDIRECTA

formazione di radicali liberi $H^+ + OH^-$
molto reattivi con le altre
molecole : RADICALI DELL'ACQUA



MODIFICAZIONE STRUTTURALE DELLE MOLECOLE

LA DOSE ASSORBITA

E' l'energia media dE ceduta dalle radiazioni ionizzanti in un elemento volumetrico di massa dm

$$D = dE/dm$$

Si misura in Gray (Gy) **1 Gy = 1J/1Kg**

Quando un fascio incide su un paziente,
la dose assorbita varia con la profondità
e dipende: **dal tipo di radiazione,**

dalla sua energia,

dalla densità del mezzo attraversato

Quali sono gli EFFETTI sull'intero ORGANISMO UMANO provocati dall'irradiazione

Si distingue tra:

Effetto SOMATICO : **si limita al solo individuo colpito dalla radiazione**

Effetto GENETICO : **viene trasmesso e può manifestarsi nella progenie**

E tra:

Effetto Stocastico : esiste una dose soglia al di sotto della quale non vi è danno

Effetto Non Stocastico : non esiste una dose soglia

IRRADIAZIONE ACUTA AL CORPO INTERO

EFFETTO

DOSE (Gy)

sterilità permanente nel maschio

sterilità permanente nella donna



> 4

cataratta

> 2

rischio di morte per sindrome del midollo osseo
(settimane)

2-10

morte per sindrome gastrointestinale
(giorni)

10-100

morte per sindrome del sistema nervoso centrale
(ore)

> 100

morte istantanea

> 1000