

# LE RADIAZIONI

- Cosa si intende con il termine **Radiazioni** ?

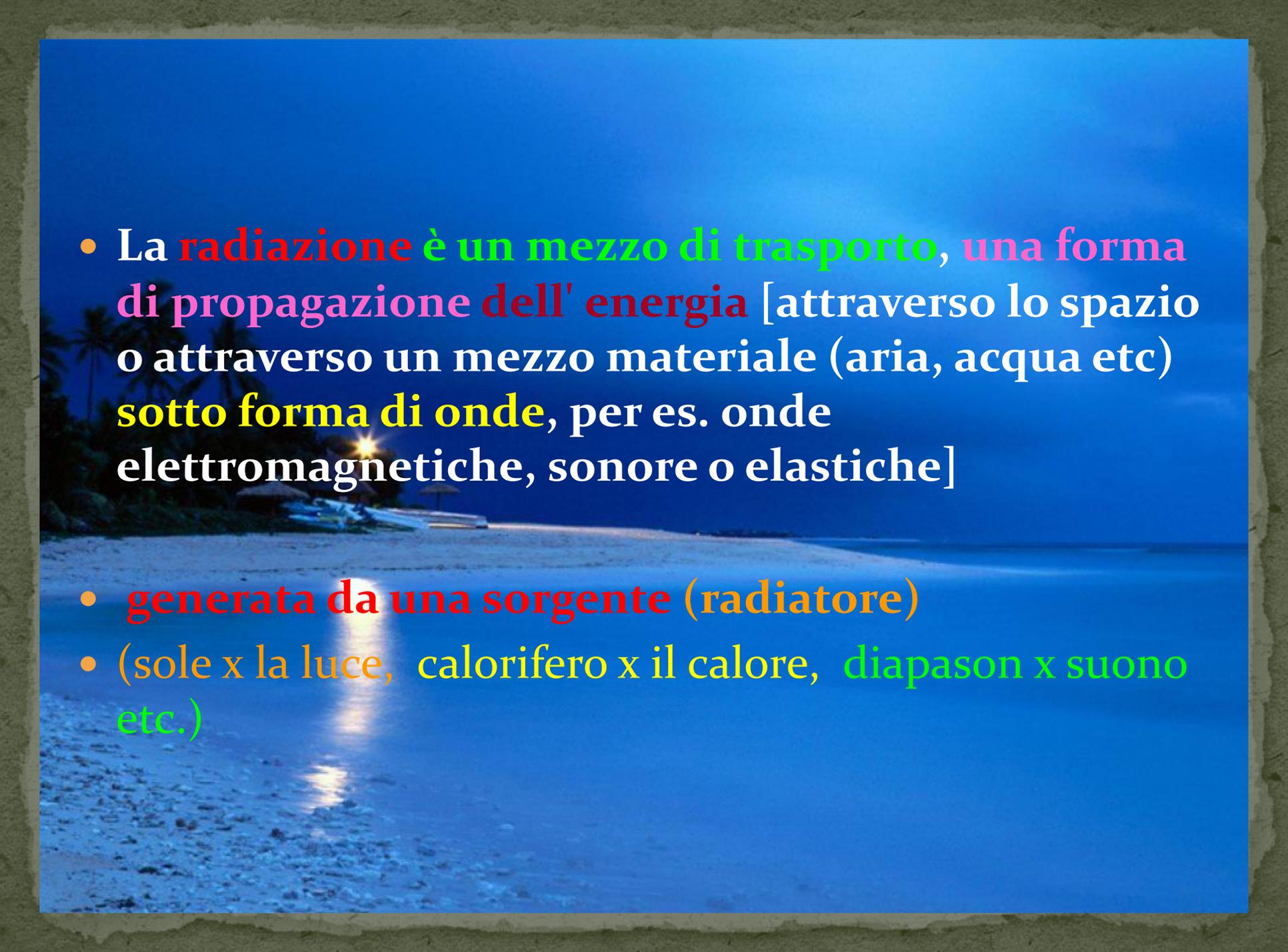


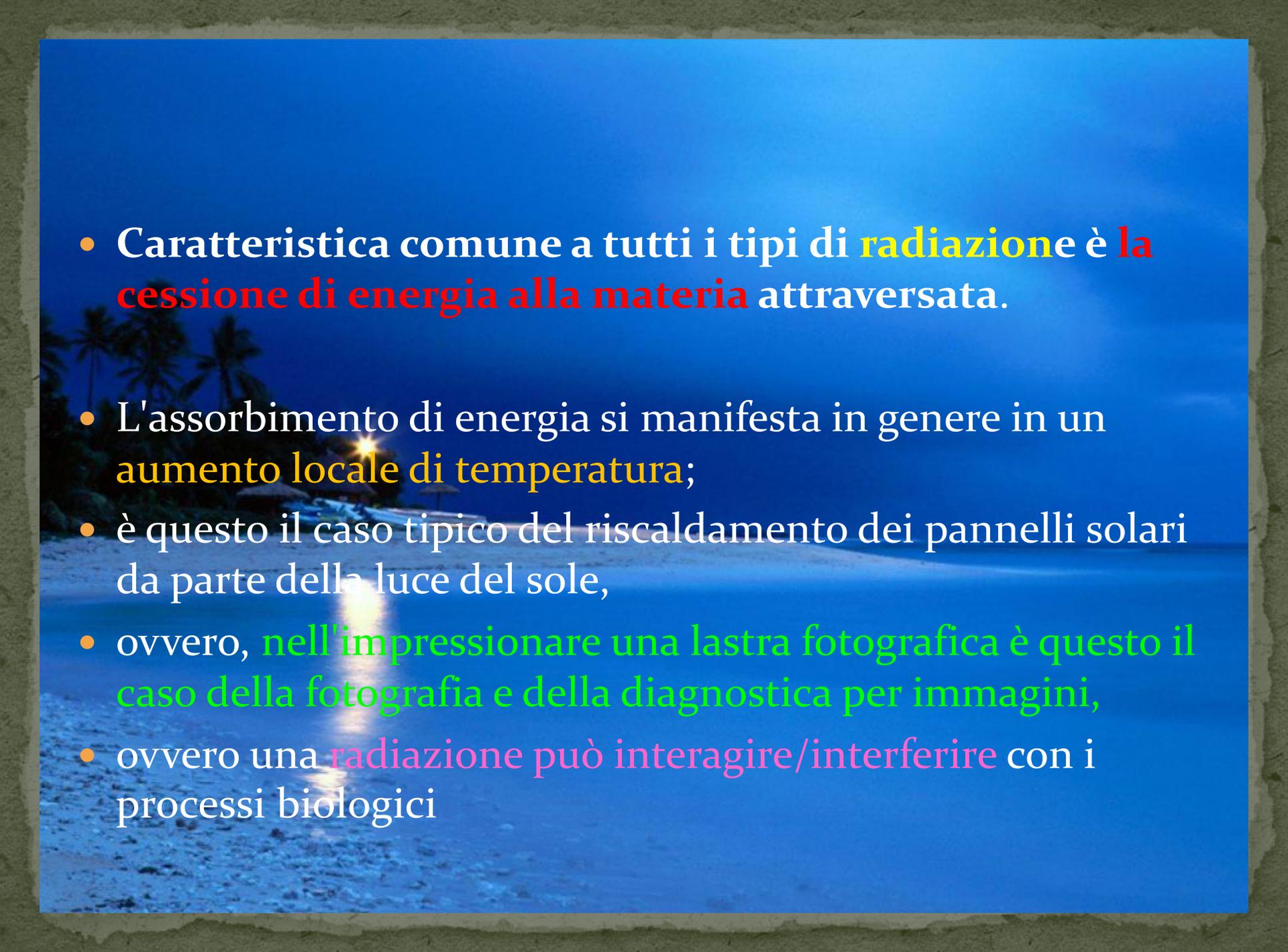
# LE RADIAZIONI

- Il termine **radiazioni** viene utilizzato per descrivere **fenomeni fisici** apparentemente diversi fra loro, quali **la luce** e **il calore** perfettamente percettibili dai sensi umani.

- Oppure

**la radiazione elettromagnetica**, **la radiazione cosmica**, **le radiazioni ionizzanti**, del tutto invisibili e impercettibili ai sensi umani

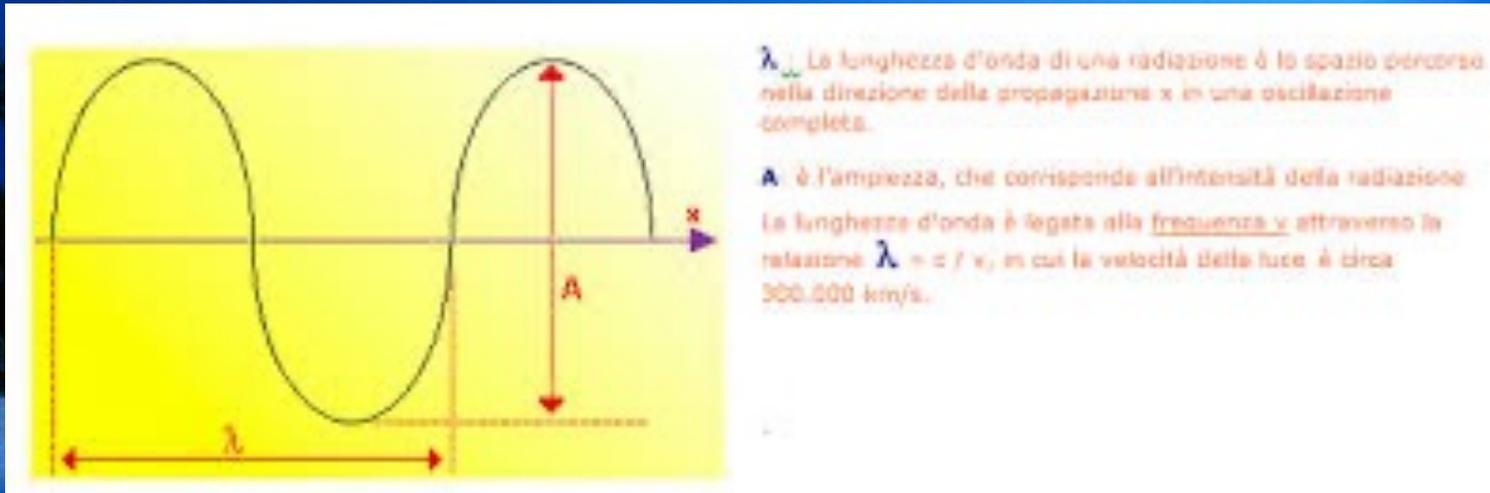
- 
- La **radiazione** è un mezzo di trasporto, una forma di propagazione dell' energia [attraverso lo spazio o attraverso un mezzo materiale (aria, acqua etc) **sotto forma di onde**, per es. onde elettromagnetiche, sonore o elastiche]
  - **generata da una sorgente (radiatore)**
  - (sole x la luce, calorifero x il calore, **diapason x suono** etc.)

- 
- Caratteristica comune a tutti i tipi di **radiazione** è **la cessione di energia alla materia** attraversata.
  - L'assorbimento di energia si manifesta in genere in un **aumento locale di temperatura**;
  - è questo il caso tipico del riscaldamento dei pannelli solari da parte della luce del sole,
  - ovvero, **nell'impressionare una lastra fotografica è questo il caso della fotografia e della diagnostica per immagini**,
  - ovvero una **radiazione può interagire/interferire** con i processi biologici

- Gli effetti della interazione con la materia sono diretta conseguenza dei processi fisici di **eccitazione e/o ionizzazione** dovute agli urti della con la materia.

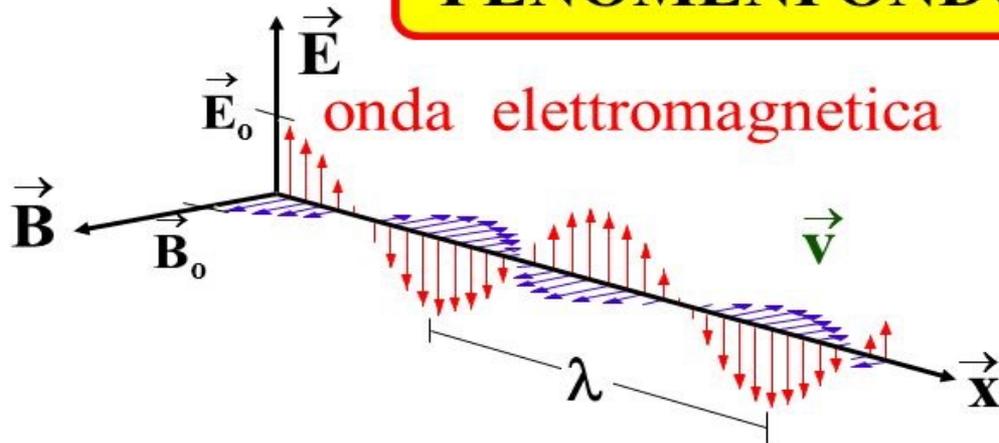
**Ma come si propaga una radiazione ?**

- Essa si propaga tramite **onde** caratterizzate da una **oscillazione periodica** (nel tempo e nello spazio) di un parametro detto **fenomeno ondulatorio** caratterizzato



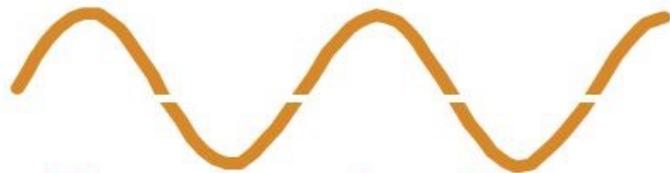
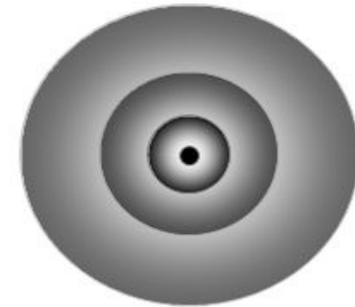
- $\lambda \Rightarrow$  **lunghezza d'onda** (spazio o tempo tra due punti nella stessa fase, es. tra due creste)
- $\nu \Rightarrow$  **frequenza** (numero di oscillazioni complete nell'unità di tempo)
- **no** spostamento di **materia**
- **sì** spostamento di **energia**

# FENOMENI ONDULATORI



onda elettromagnetica

onda meccanica  
(suono)

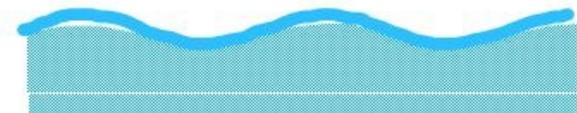


onda meccanica lungo una fune

onda meccanica  
(superficie gas-liquido)



onda meccanica lungo una molla



# Onda elettromagnetica

La radiazione elettromagnetica (di cui la luce è un esempio) è un'onda che si propaga nel vuoto o nei materiali, con una velocità  $c$  prossima o uguale a 300000 Km al secondo

$$v = c / \lambda$$

Le onde elettromagnetiche sono caratterizzate da un campo elettrico ( $E$ ) e un campo magnetico ( $H$ ) che si propagano secondo piani perpendicolari tra loro

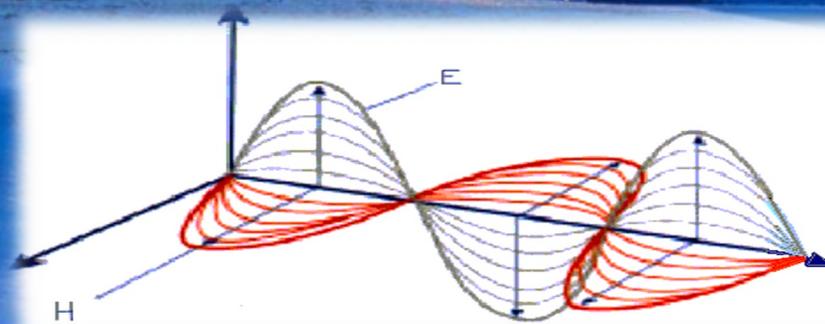
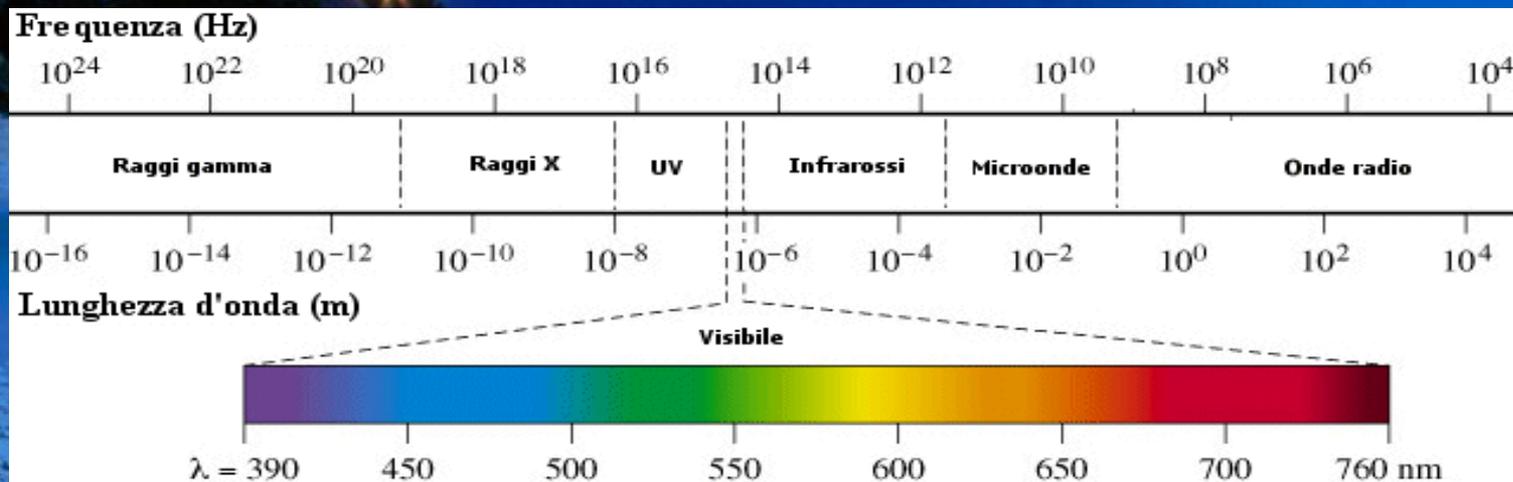


Diagramma radiazione elettromagnetica

# Le Onde Elettromagnetiche

- Sono una grande famiglia che comprende molte radiazioni, apparentemente diverse, come le onde radio o hertziane, i raggi ultravioletti, gli infrarossi e i raggi X



# Caratteristiche della radiazione elettromagnetica

- $\nu = c / \lambda$
- $c$  = velocità della luce nel vuoto ( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ )

- $E = h \nu$

$E$  = energia del singolo fotone

- $h$  = costante di Planck ( $6.3 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$ )
- Più bassa è la frequenza, più bassa è l'energia!

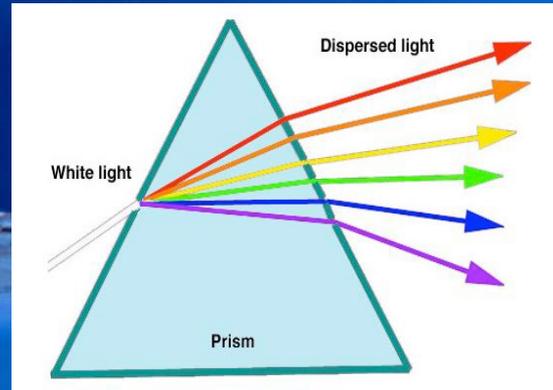
# LA NATURA DELLA LUCE

- **La luce** è energia raggiante (**Fotoni**  $E = h \nu$ )
- che si propaga nel vuoto in forma di **onde elettromagnetiche** alla velocità di circa **300.000 km/s**.
- Essa è caratterizzata da lunghezza d'onda comprese tra circa 380 nm e 780  $\mu\text{m}$ , campo di sensibilità dell'occhio umano confinato a sx dalle **radiazioni UV** ( $\lambda < 380\text{nm}$ ) e a dx dalle **radiazioni IR** ( $\lambda > 780\text{ nm}$ )
- Lo spettro delle **radiazioni visibili**, che si presenta come luce bianca può essere a sua volta suddiviso in sei bande principali, **ciascuna corrispondente ad una determinata sensazione cromatica**:

# Le Radiazioni Luminose

- Come si evince facendo passare un fascio di luce bianca attraverso un prisma di quarzo trasparente:

- 380 - 436 nm: viola
- 436 - 495 nm: blu
- 495 - 566 nm: verde
- 566 - 589 nm: giallo
- 589 - 627 nm: arancio
- 627 - 780 nm: rosso



- Ciò è possibile perchè radiazioni di diversa lunghezza d'onda vengono rifratte in maniera diversa dal materiale costituente il prisma.

# Interazione con la materia

- Gli effetti della interazione con la materia sono diretta conseguenza dei processi fisici di **eccitazione e/o ionizzazione** dovute agli urti della con la materia.
- **Ovverosia alla cessione di Energia alla materia stessa**
- **Come avviene questa cessione di energia ?**

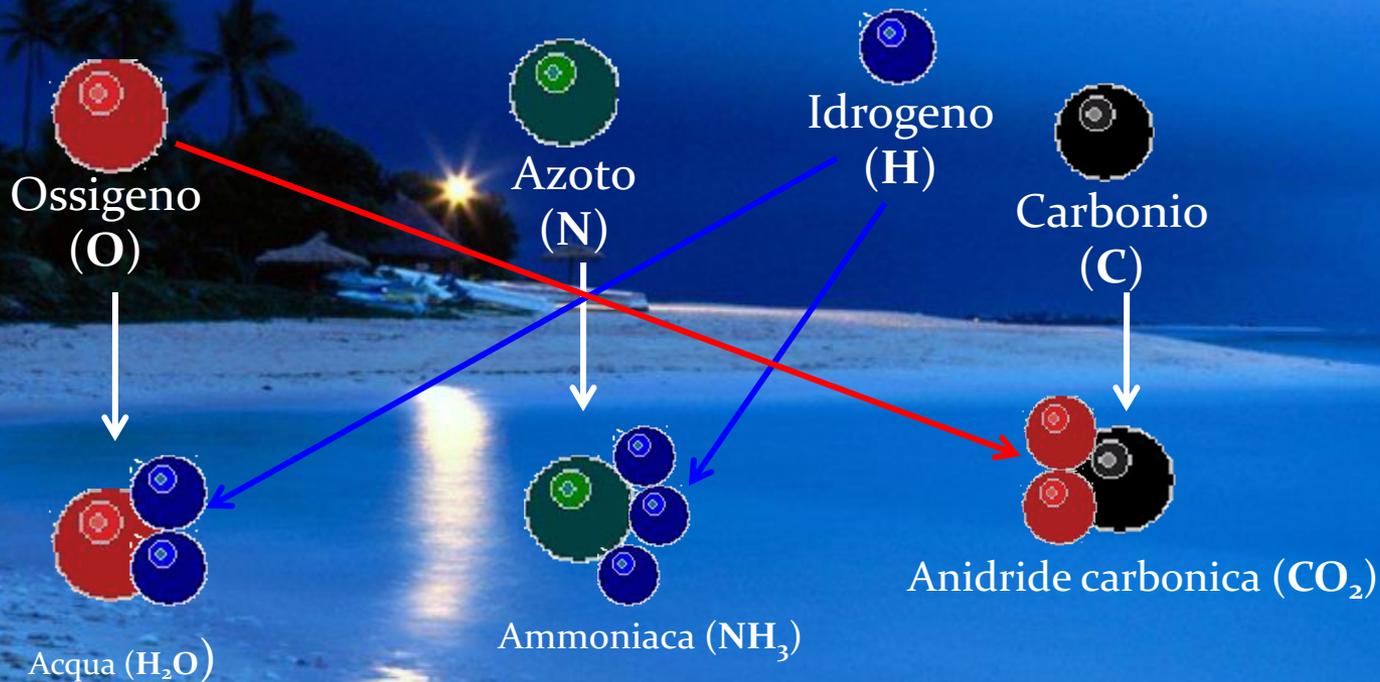
# Costituzione della Materia

## Il Modello Atomico di Dalton

- È la prima **teoria atomica** basata su fondamenti scientifici:
  - ❖ **Tutta la materia è costituita da atomi piccolissimi di diversi elementi**
  - ❖ **Gli atomi sono indivisibili e indistruttibili**
  - ❖ **Un atomo di un elemento non si può trasformare in altri elementi**
  - ❖ **Gli atomi non si creano né si distruggono ma si trasferiscono da un composto ad un altro**

# Atomi e molecole

- Gli atomi dei vari elementi si combinano in vari modi formando un gran numero di molecole



Ma come è fatto un atomo?



# Elettroni e Protoni

- Alcuni esperimenti verso la fine dell'800 dimostrarono che esistono, all'interno dell'atomo, due tipi di particelle cariche



I **protoni**, carichi positivamente



Gli **elettroni**, molto più piccoli e carichi negativamente

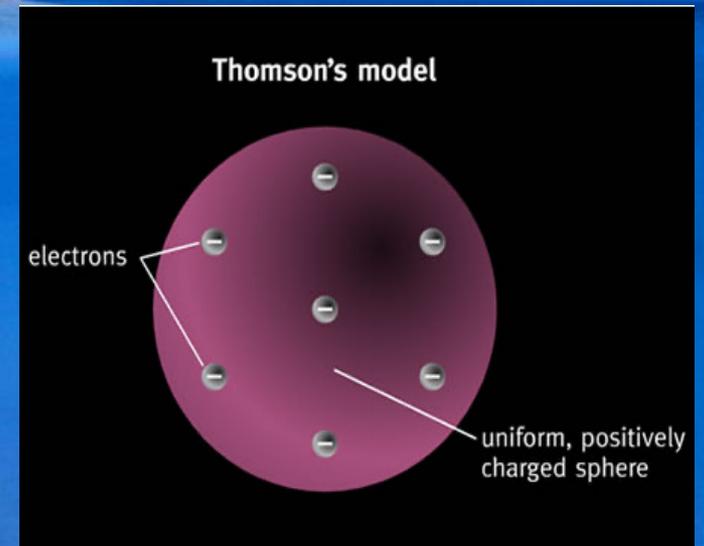
Come si dispongono queste particelle all'interno dell'atomo?

# Modello Atomico di Thomson



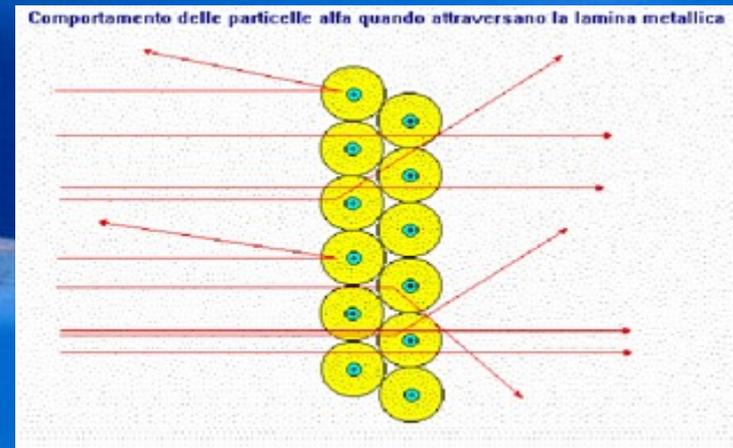
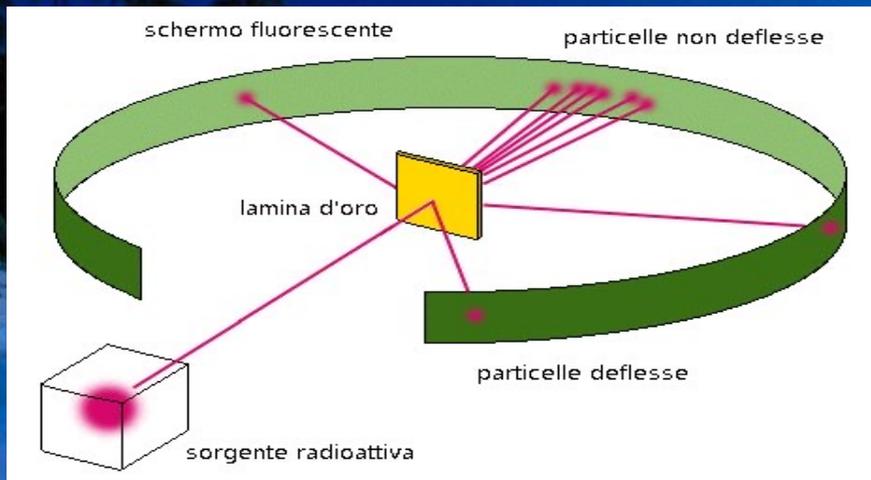
Thomson (1897) propose un primo modello di atomo, per così dire “pieno”

In questo modello la carica positiva è concentrata in una sfera centrale mentre gli elettroni sono poggiati sopra un po' come “l'uvetta sul panettone



# L'esperimento di Rutherford

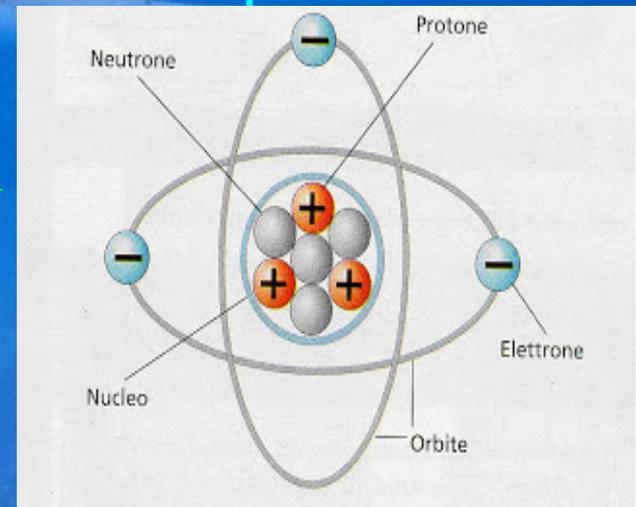
- Il modello di Thomson si rivelò sbagliato in seguito al celebre esperimento di Rutherford (1909)



Se la maggior parte dei **raggi  $\alpha$**  (carichi positivamente) non viene deviata attraversando una sottile lamina d'oro, vuol dire che l'atomo è essenzialmente "vuoto"

# Modello Atomico di Rutherford

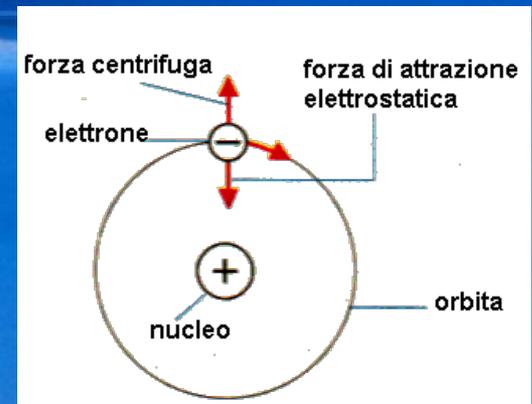
- Nel frattempo Rutherford che aveva teorizzato la presenza di un'altra particella, **il neutrone**, senza carica e con una massa (quasi) pari a quella del protone
- Ipotizzò che l'atomo avesse una struttura aperta
- Un nucleo costituito da un certo numero di protoni...
- Più un certo numero di neutroni
- Intorno a cui ruotavano gli elettroni
- come dei pianeti attorno al sole



# Criticità del modello Atomico di Rutherford

Il modello di Rutherford aveva da subito evidenziato delle criticità

- In primo luogo era impossibile giustificare la stabilità dell'edificio atomico. In base alle leggi dell'elettrodinamica classica ogni carica che si muove di moto non uniforme irradia onde elettromagnetiche a spese della propria energia di moto.
- Un elettrone percorrendo una traiettoria curva (un'orbita circolare) è necessariamente sottoposto ad un'accelerazione di tipo centripeto.
- In un tempo molto piccolo ( $\sim 10^{-8}$ s) un elettrone atomico, dopo una traiettoria spiraleggiante, dovrebbe quindi cadere sul nucleo.
- Inoltre lo spettro continuo della radiazione prevista per questo processo di caduta a spirale sul nucleo è in completo disaccordo con lo spettro discreto.



# L' Atomo di Bohr

Il modello atomico di Bohr , si basa su due postulati innovativi.

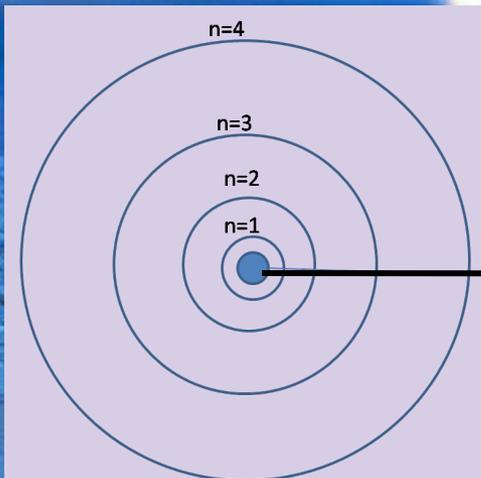
**Il primo postulato** afferma che l'elettrone può percorrere attorno al nucleo alcune orbite circolari senza perdere energia.

I raggi di tali orbite soddisfano tutti la relazione:

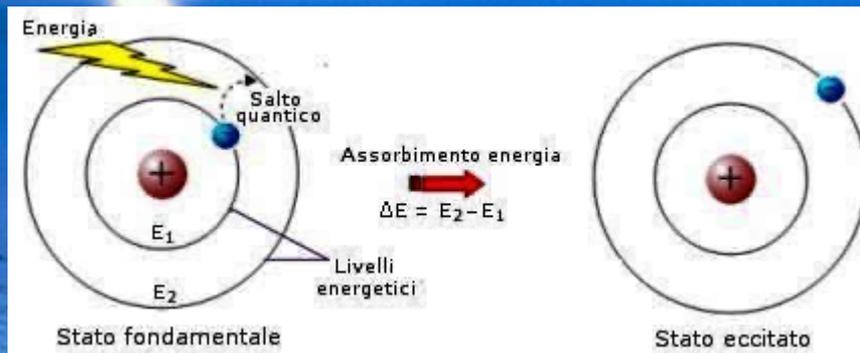
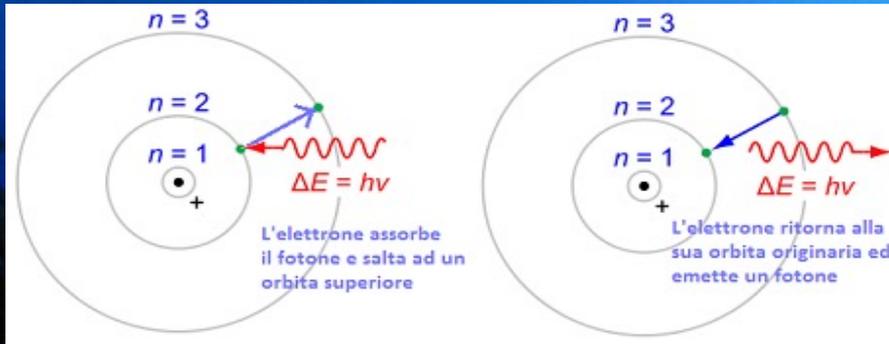
dove  $m$  è la massa dell'elettrone,  $v$  è la sua velocità,  $h$  è la costante di Plank

Al termine  $n$ , un numero intero che può assumere tutti i numeri interi maggiori di 1,

Bohr diede il nome di **numero quantico principale**



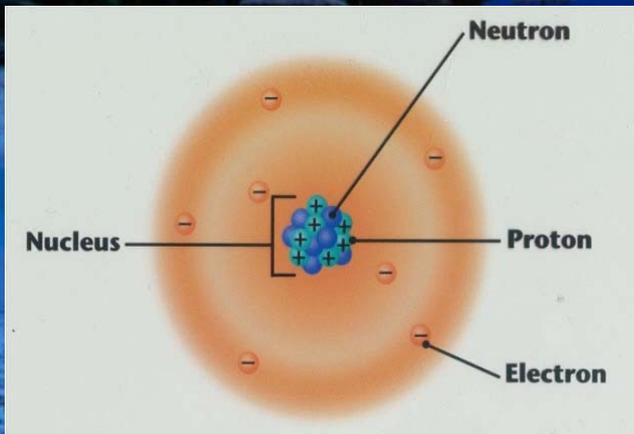
nucleo



Un nucleo atomico è caratterizzato da:

- **numero atomico (Z)** che indica il numero di protoni
- **numero di massa (A)** che rappresenta il numero totale di nucleoni presenti nel nucleo atomico.

Se indichiamo con **N** il **numero di neutroni**, possiamo scrivere:  $A=N+Z$ .



Per nuclei leggeri la configurazione nucleare risulta stabile quando  $Z = N$ .

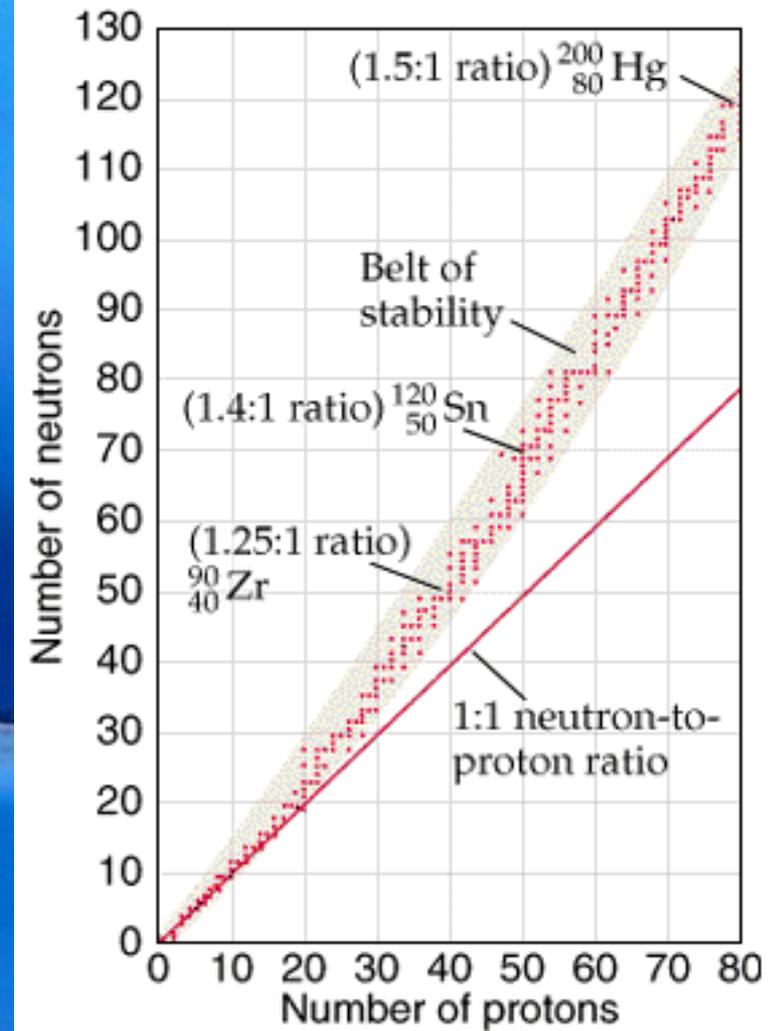
Al **crescere di Z** il numero di neutroni necessari a garantire la stabilità **aumenta**.

Tale andamento è ben descritto dalla così detta **curva di stabilità**

**ISOBARI** Nuclidi con eguale numero di massa  $A$

**ISOTOPI** Nuclidi con eguale numero atomico  $Z$

**ISOTONI** Nuclidi con eguale numero di neutroni  $N$



**Grafico dei nuclei.** Ciascun puntino rappresenta un nucleo, **avente Z** protoni e  $A - Z$  neutroni. Per **piccoli valori di Z**, i **nuclei** si trovano all'incirca sulla bisettrice degli assi (quindi è, all'incirca,  $A = 2Z$ ). Per **grandi valori di Z**, i **nuclei** hanno chiaramente un eccesso di neutroni rispetto ai protoni. I puntini neri si riferiscono agli isotopi più **stabili**

# I RADIOISOTOPI e le RADIAZIONI

- NUCLEO STABILE

- Le forze repulsive tra i protoni nel nucleo vengono neutralizzate dai neutroni (il rapporto ottimale neutroni /protoni è 1, al massimo 1,5) Sono stabili i primi venti elementi v grafico

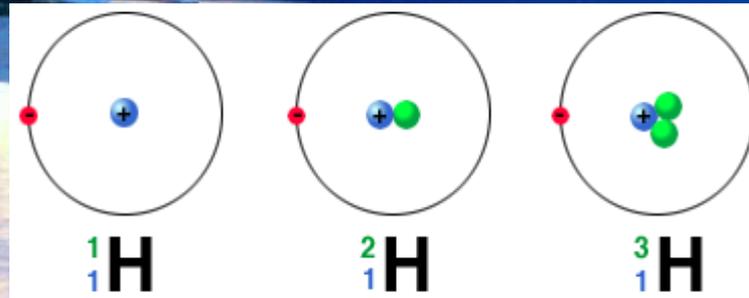
- NUCLEO INSTABILE

- Se un atomo ha un rapporto tra neutroni e protoni  $> 1,5$  è instabile e tende ad emettere delle radiazioni per stabilizzarsi

# Isotopi

Sono isotopi due o più forme di uno stesso elemento, che presentano quindi lo stesso numero atomico [Z], con diverso numero di massa [A]; in altre parole, hanno lo stesso numero di protoni ma diverso numero di neutroni. Tra loro **gli isotopi** presentano le stesse caratteristiche chimiche, anche se possono essere :

- fisicamente **stabili** (ossia non radioattivi) o
- **instabili (radioattivi)** (che a loro volta possono essere **naturali o artificiali**)
- Ad esempio, gli isotopi dell'idrogeno sono:
  - l'idrogeno comune ( $^1\text{H}$ ) che ha 1p ( $Z=1$ ) e 1e ( $A=1$ ) ed è il più abbondante in natura;
  - il deuterio ( $^2\text{H}$ ) che ha 1p ( $Z=1$ ) e 1n ( $A=2$ ) ed è presente in natura anche se raro (lo 0.8% dell'idrogeno naturale);
  - il trizio ( $^3\text{H}$ ) che ha 1p ( $Z=1$ ) e 2n ( $A=3$ ), esiste solo perché prodotto artificialmente ed è fisicamente instabile.



La Medicina Nucleare sfrutta le proprietà dei radioisotopi, a scopo diagnostico, terapeutico e di ricerca.

- Gli **isotopi presenti in natura sono quasi tutti stabili.**
- Tuttavia, alcuni isotopi naturali, e quasi tutti gli isotopi artificiali, **sono instabili**, a causa di un eccesso di protoni e/o di neutroni.
- Tale instabilità provoca la **trasformazione spontanea in altri isotopi accompagnata dall'emissione di particelle.**
- Questi isotopi sono detti **isotopi radioattivi.**
- La trasformazione di un nucleo radioattivo porta alla produzione di un altro nucleo, che può essere anch'esso radioattivo oppure stabile.
- Essa è chiamata **decadimento radioattivo.**

A tropical beach at dusk. The sky is a deep, dark blue. On the left, there are palm trees and a small hut with a thatched roof. A bright light source, possibly a lamp or a small fire, is visible near the hut, and its reflection is cast on the calm water of the lagoon. The water is a lighter shade of blue, and the beach is sandy and pebbly. The overall scene is peaceful and serene.

- Le Radiazioni Ionizzanti

Quando una radiazione ha energia sufficiente **può ionizzare** il mezzo attraversato ossia produrre cariche positive e negative.

A seconda che la ionizzazione del mezzo irradiato avvenga per via diretta o indiretta le radiazioni vengono distinte in

## 1. **radiazioni direttamente ionizzanti**

**Radiazioni direttamente ionizzanti sono particelle cariche elettricamente, come le particelle alfa e le particelle beta**

Particelle dotate di carica elettrica che cedono parte della loro energia cinetica alla materia attraverso l'interazione coulombiana

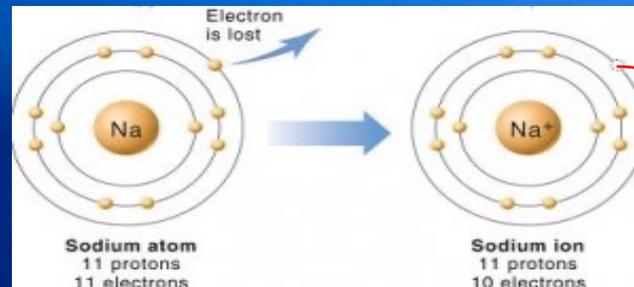
## 2. **radiazioni indirettamente ionizzanti.**

**Esempi di radiazioni indirettamente ionizzanti sono i fotoni X e gamma (e i neutroni).**

Radiazione elettromagnetica (**X o  $\gamma$** ), particelle neutre che attraverso vari processi di interazione con la materia, mettono in moto particelle cariche direttamente ionizzanti. la cessione di energia alla materia della radiazione indirettamente ionizzante è, quindi, un processo a due step :

1. **produzione di particelle cariche**
2. **ionizzazione da parte di queste ultime**

- Con il termine ionizzazione intendiamo la rimozione di elettroni da atomi o molecole con la conseguente creazione di ioni.



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

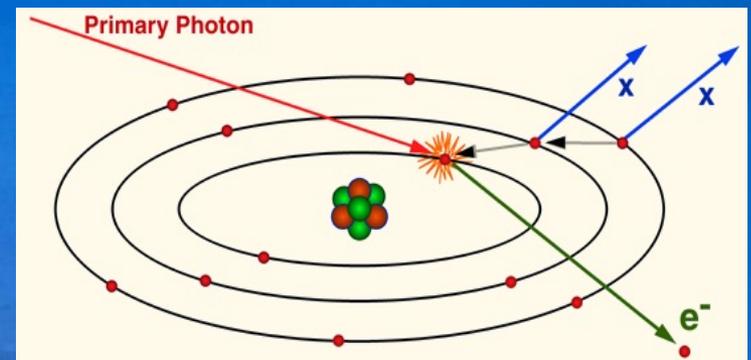
# INTERAZIONE RADIAZIONE-MATERIA

- Radiazioni ionizzanti
- Interazione di particelle cariche:
  - range
  - perdita di energia per ionizzazione
  - perdita di energia per radiazione
- Interazione di particelle neutre:
  - neutroni
  - fotoni:
    - effetto fotoelettrico
    - effetto Compton
    - produzione di coppie

# EFFETTO FOTOELETTRICO

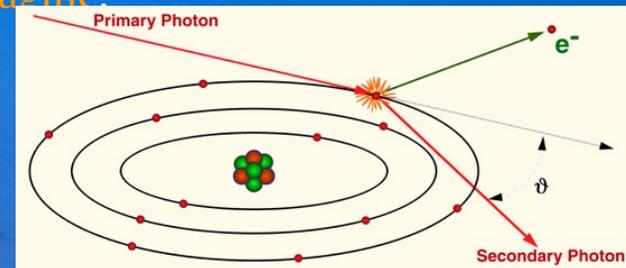
Accade quando un fotone, di energia **medio-bassa**, interagisce con un elettrone delle **orbite piu interne** (in genere dello strato K) cedendo tutta la sua energia.

- Il fotone scompare e l'elettrone acquista energia cinetica pari alla differenza dell'energia del fotone incidente con quella di legame dell'elettrone.
- **La ionizzazione provoca riassetamento degli altri elettroni con emissione di radiazioni X** caratteristiche o con l'emissione di un **elettrone di Auger** (piu probabile per elementi a basso Z).
- **L'effetto fotoelettrico e piu probabile per mezzi ad alto Z** e per fotoni a bassa energia ha importanti risvolti in medicina nucleare e in radiobiologia



# EFFETTO COMPTON –

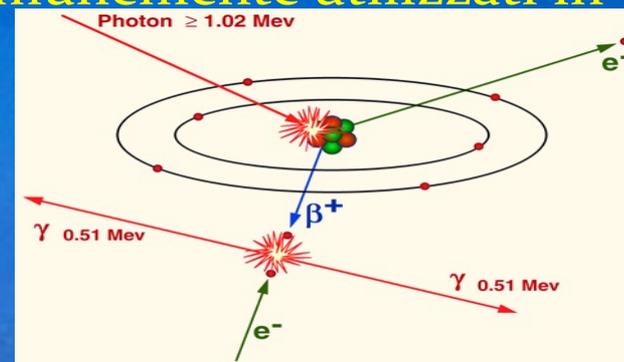
- Chiamato anche **scattering** ( **diffusione** ) si verifica quando **un fotone interagisce con un elettrone degli orbitali più esterni (debolmente legato al nucleo)** cedendo parte della sua energia.
- Come risultato si ha l'emissione di un elettrone con una sua energia cinetica e di un **fotone gamma secondario (gamma Compton)** di una certa energia che si propaga in direzione diversa rispetto a quella del gamma originario secondo un angolo di **scattering** che dipende dall'energia ceduta all'elettrone.
- L'elettrone e il fotone di scattering possono a loro volta interagire con la materia fino ad esaurire la loro energia.
- L'energia che viene dissipata è uguale all'energia necessaria per ionizzare l'atomo più l'energia cinetica che acquista l'elettrone. L'energia del fotone Compton è uguale alla differenza tra l'energia del fotone incidente e l'energia dissipata.
- Infine il fotone Compton può essere deviato in qualsiasi direzione, anche retrodiffuso; maggiore è l'energia ceduta all'elettrone, maggiore è l'angolo di deflessione (formato dalla traiettoria del fotone primario con quella del fotone secondario). Inoltre, maggiore è l'energia del fotone incidente, maggiore è l'energia ceduta all'elettrone.
- L'effetto Compton ha importanti risvolti in medicina nucleare e in radiologia perché, tra l'altro, è causa di degradazione della qualità dell'immagine.

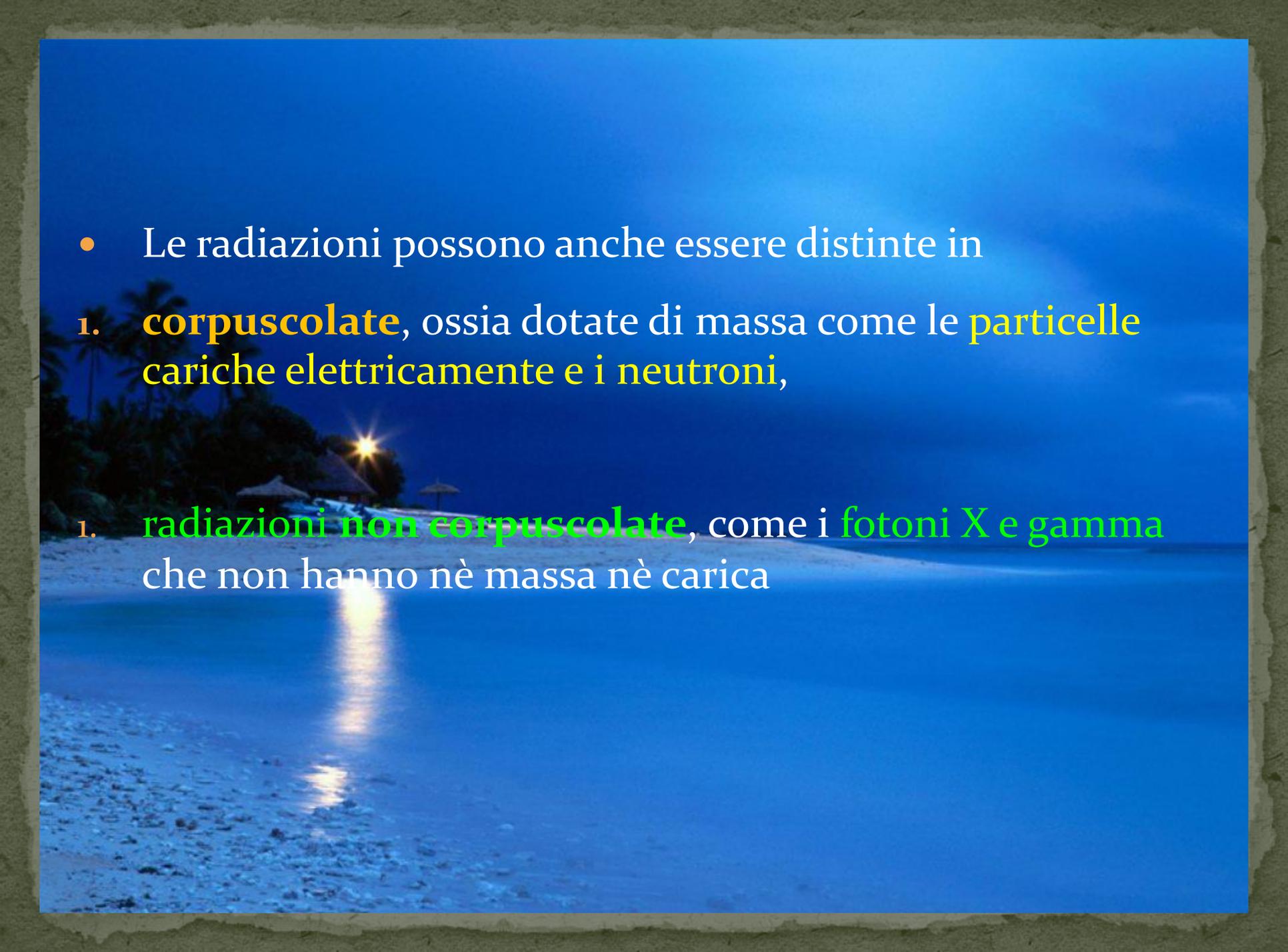


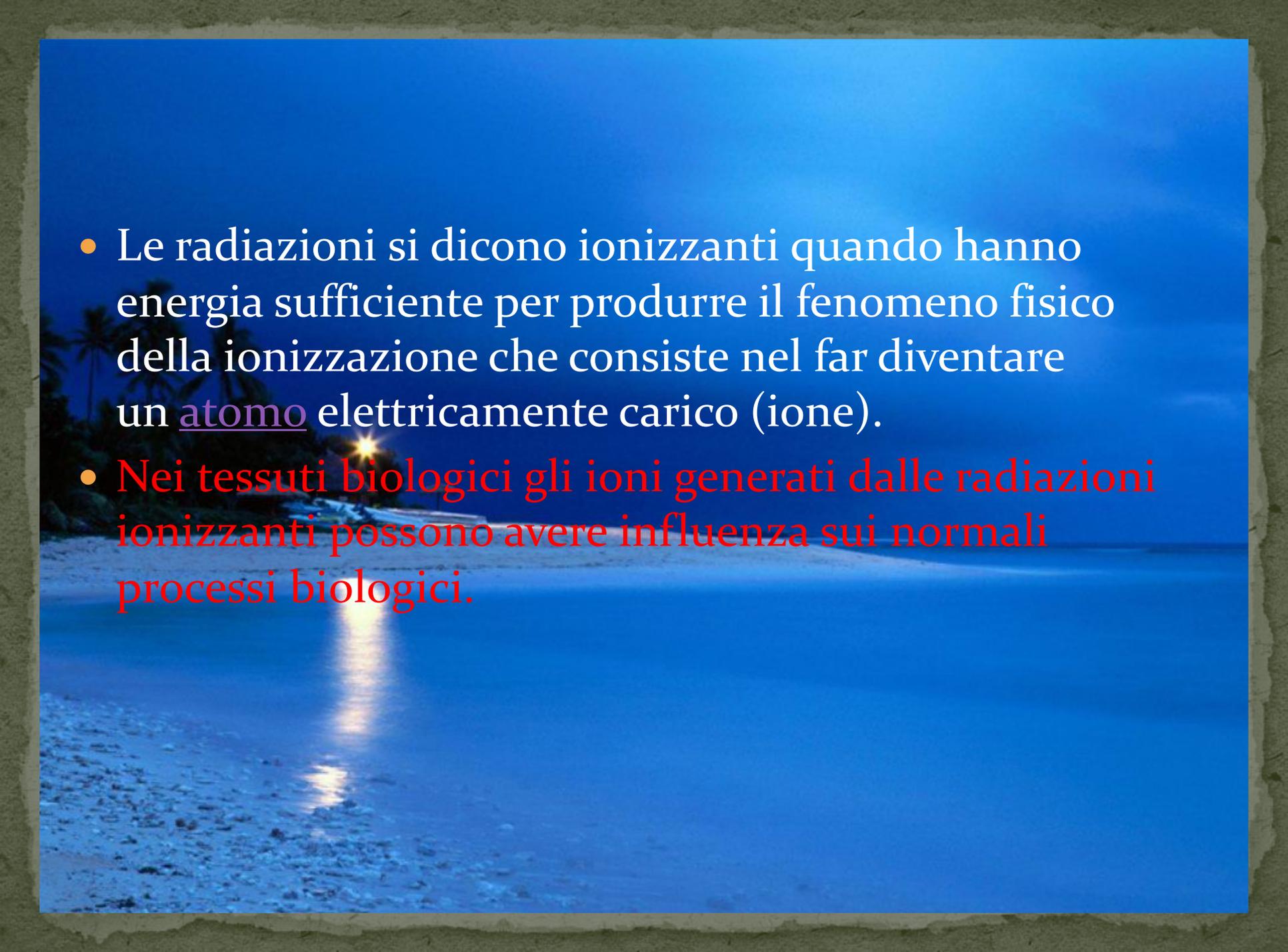
# PRODUZIONE DI COPPIE

Detto anche **effetto fotonucleare**, accade per **fotoni di energia superiore a 1.022 MeV**, corrispondente alla massa delle due particelle che vengono generate dal fenomeno.

- Il fotone, interagendo col campo di forza del nucleo, scompare con la contemporanea creazione di 2 particelle: **un elettrone e un positrone**; tutta l'energia oltre la soglia **di 1.022 MeV** è distribuita in ugual misura tra le due particelle sotto forma di energia cinetica.
- L'elettrone così prodotto può provocare ionizzazioni, mentre il positrone va incontro ad annichilazione, con la conseguente produzione di 2 radiazioni gamma di **0.511 MeV** dirette in direzioni diametralmente opposte.
- Questo fenomeno riveste poca rilevanza per la radiografia perché radiazioni di così alta energia non sono comunemente utilizzati in questa disciplina.

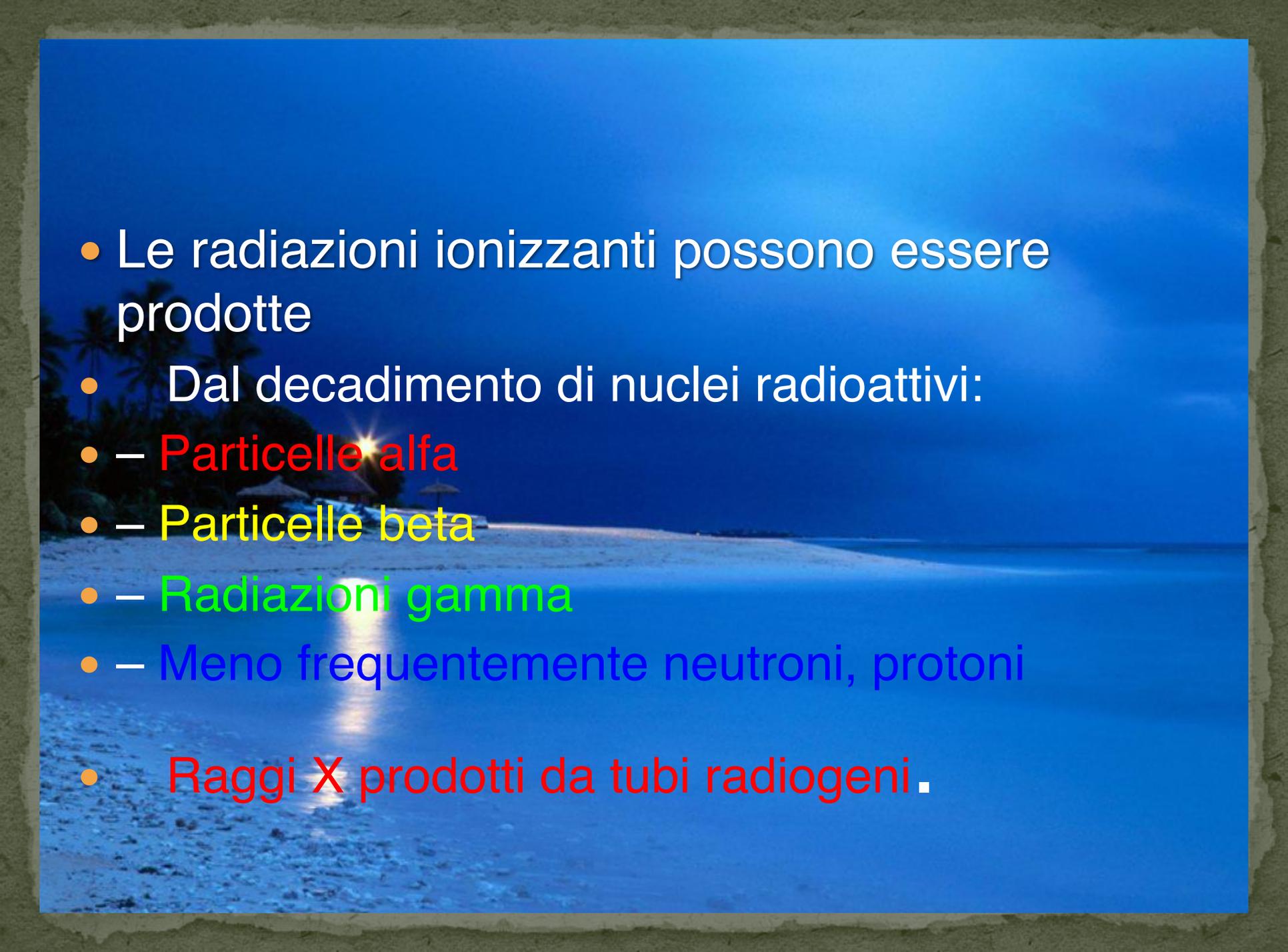


- 
- A tropical beach at dusk. The sky is a deep blue, and the water is calm, reflecting a bright light source on the shore. The beach is sandy and has some palm trees and a thatched hut in the background.
- Le radiazioni possono anche essere distinte in
    1. **corpuscolate**, ossia dotate di massa come le **particelle cariche elettricamente e i neutroni**,
    1. **radiazioni non corpuscolate**, come i **fotoni X e gamma** che non hanno nè massa nè carica

- 
- Le radiazioni si dicono ionizzanti quando hanno energia sufficiente per produrre il fenomeno fisico della ionizzazione che consiste nel far diventare un atomo elettricamente carico (ione).
  - Nei tessuti biologici gli ioni generati dalle radiazioni ionizzanti possono avere influenza sui normali processi biologici.

A tropical beach at dusk. The sky is a deep, dark blue. On the left, there are palm trees and a small hut. A bright light source, possibly a lamp or a fire, is visible on the beach, and its reflection is cast across the calm water. The overall scene is serene and peaceful.

- Decadimento Radioattivo

- 
- Le radiazioni ionizzanti possono essere prodotte
    - Dal decadimento di nuclei radioattivi:
      - – Particelle alfa
      - – Particelle beta
      - – Radiazioni gamma
      - – Meno frequentemente neutroni, protoni
    - Raggi X prodotti da tubi radiogeni.

- E' un processo casuale.
- Ogni nucleo instabile decade (si disintegra) con una probabilità per unità di tempo costante.
- Indicando con  $N_0$  il numero iniziale di nuclei radioattivi e con  $N(t)$  il numero di nuclei all'istante  $t$  la legge di decadimento è:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

nella quale:

$N_t$  = attività al tempo  $t$

$N_0$  = attività al tempo 0

$e$  = base dei logaritmi naturali

$\lambda$  = costante di decadimento.

- $\lambda$  = prende il nome di costante di decadimento

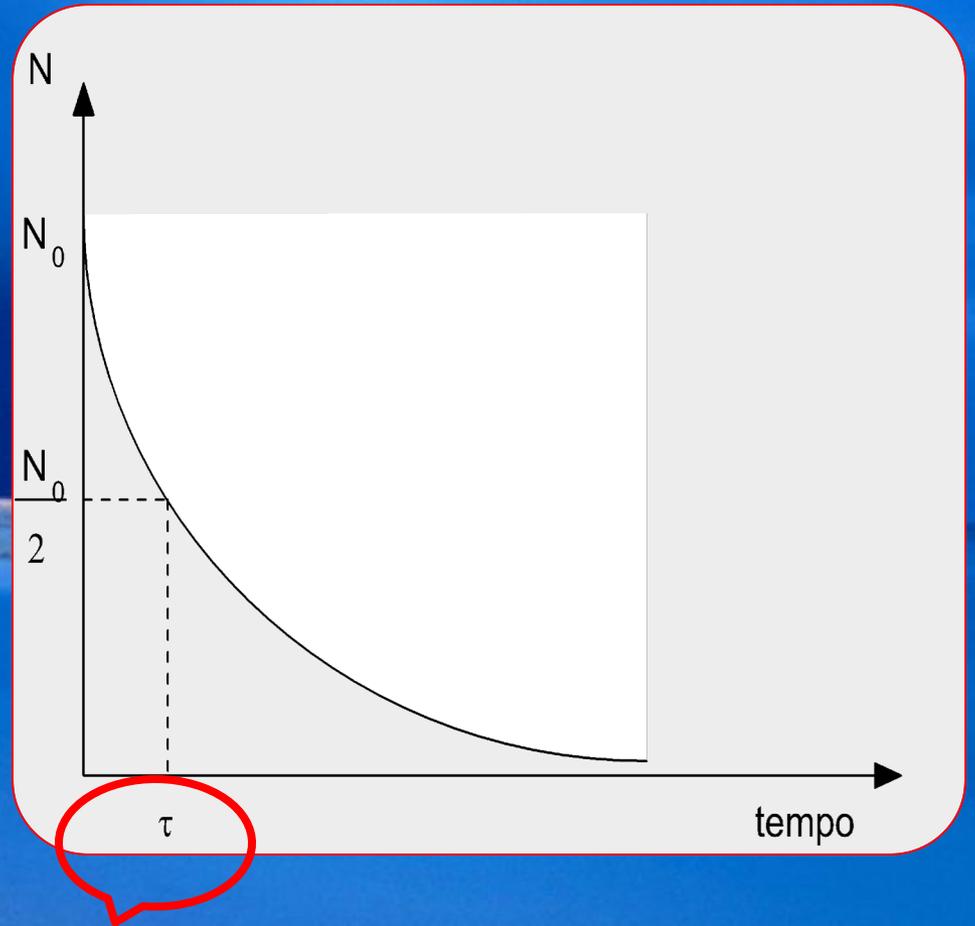
- $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

Moltiplicando per  $\lambda$  e ricordando che la quantità  $\lambda N$  rappresenta **l'attività della sostanza**, che indicheremo con **A**, avremo:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

- dove con  $A_0$  abbiamo indicato l'attività al tempo **t = 0**.
- L'attività di un radionuclide indica la velocità alla quale la sostanza radioattiva decade e si
- esprime con il **numero di disintegrazioni** che avvengono nell'unità di tempo (**dis/s**) che si esprime in **Bq (Bequerel)**

**Periodo di dimezzamento  $\tau_{1/2}$**  di una sostanza radioattiva è il tempo necessario affinché questa si riduca della metà.



**Tempo di dimezzamento  $\tau_{1/2}$**

- Grandezze che caratterizzano i radionuclidi

- **Attività**

- Rappresenta il numero di trasformazioni (disintegrazioni) nell'unità di tempo è data dalla relazione :  $A = \lambda N(t)$

- Si misura in:

- - Bequerel (Bq) = 1 disintegrazione al secondo
- - In Curie (Ci) =  $3.7 \times 10^{10}$  Bq

- **Tempo di dimezzamento**

- Tempo necessario per ridurre del 50% l'attività della sorgente  $T_{1/2} = 0.69 / \lambda$

- **Vita media**

- Reciproco della costante di decadimento, è il tempo necessario a ridurre del 37% l'attività della sorgente  $\tau = 1 / \lambda$

# DECADIMENTO ALFA ( $\alpha$ ):

- Le radiazioni (o particella) alfa ( $\alpha$ ):
- sono nuclei di elio  ${}_2\text{He}^4$  carichi positivamente con  $Z$ (numero atomico)=2 e  $A$ (numero di massa)=4; le particelle alfa hanno scarso potere penetrante e sono di solito emesse da nuclei di metalli pesanti (con elevato numero atomico  $84 < Z < 92$ ) che si trasformano in elementi più leggeri attraverso la perdita di 4 nucleoni
- Ad esempio:
- *Guardare nella tavola periodica quando un radioisotopo emette una particella alfa in cosa si trasforma*



*Nuclei pesanti*

# Decadimento Beta

- Una **particella beta è un elettrone** ad alta velocità che fuoriesce da un nucleo in disintegrazione.
- Tale particella può avere
- carica negativa unitaria ( $\beta^-$ , decadimento beta negativo), o
- carica positiva unitaria ( $\beta^+$ , decadimento beta positivo).
- In ogni caso la massa è identica a quella dell'elettrone

- Col termine **decadimento  $\beta$**  intendiamo l'emissione spontanea da parte di un nucleo di
  - un **elettrone** (decadimento  $\beta^-$ )
  - un **positrone** (decadimento  $\beta^+$ )
- Oppure la cattura di un elettrone atomico (Cattura Elettronica o E.C.)
- Quando il **nucleo è instabile per eccesso di neutroni**, un neutrone in eccesso si trasforma in protone secondo la formula:
  - **$n = p^+ + \beta^- + \text{antineutrino}$**
- Il **decadimento beta negativo** provoca una **transizione isobarica**: il numero **Z aumenta** di una unità e l'atomo si trasforma in un elemento chimico differente, situato a destra nella tavola di Mendelejev **mentre resta invariato il numero A**.

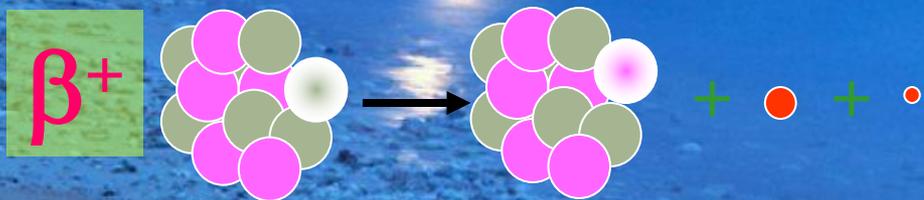


# Decadimento Beta positivo

- Quando il **nucleo è instabile per difetto di neutroni**, un protone in eccesso emette una particella  $\beta^+$ , chiamata **positrone**, e si trasforma in neutrone secondo la formula:

- $p^+ = n^0 + \beta^+ + \text{neutrino}$

Il decadimento  $\beta^+$  è più probabile rispetto alla cattura elettronica per gli elementi con basso numero atomico. Il **decadimento  $\beta^+$**  provoca una **transizione isobarica**: il numero **Z si riduce di una unità** e l'atomo si trasforma in un elemento chimico differente, situato a sinistra nella tavola di Mendelejev **mentre resta invariato A**.



*Nuclei con pochi neutroni*

# Cattura elettronica

- Quando il **nucleo è instabile per difetto di neutroni** un elettrone degli orbitali più interni può venire catturato dal nucleo dove un protone si trasformerà in neutrone secondo la formula:

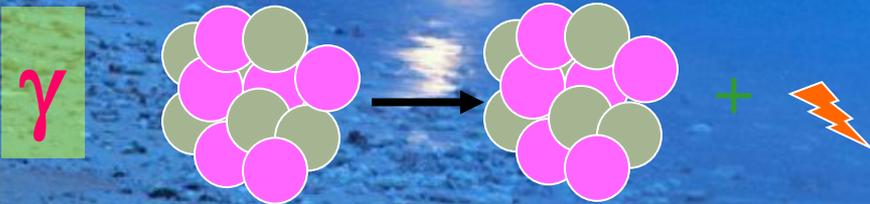


- La cattura elettronica è più probabile rispetto al decadimento  $\beta^+$  per gli elementi **con alto numero atomico**.
- • La cattura **elettronica provoca una transizione isobarica** identica a quella causata dal decadimento  $\beta^+$ : il numero  $Z$  si riduce di una unità e l'atomo si trasforma in un elemento chimico differente, situato a sinistra nella tavola di Mendelejev mentre resta invariato  $A$ .

# Emissione Gamma ( $\gamma$ )

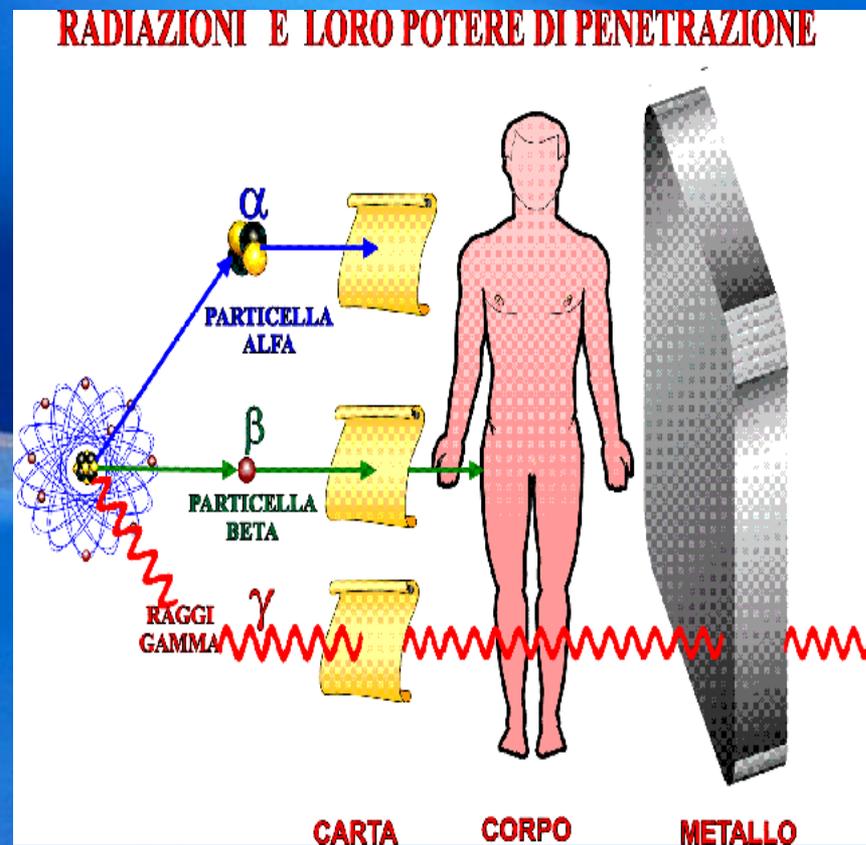
- Un nucleo formatosi in seguito ad un decadimento radioattivo può ritrovarsi nel suo stato fondamentale oppure trovarsi in uno dei suoi **stati eccitati**.
- Come avviene per l'atomo, anche il nucleo si porterà nella configurazione più stabile emettendo radiazione elettromagnetica corrispondente al salto energetico dei livelli interessati. A questa **radiazione elettromagnetica** viene dato il nome di **emissione gamma** (o raggi  $\gamma$ ).

- Per l'emissione gamma, sia la massa atomica  $A$  che il numero atomico  $Z$  rimangono **invariati**;
- si parla in questo caso di **isomeria nucleare**.
- Anche l'emissione dei **fotoni**  $\gamma$  obbedisce alla legge del decadimento esponenziale, ma a differenza dei decadimenti  $\alpha$  e  $\beta$ , i tempi in gioco sono dell'ordine di  **$10^{-15}$  secondi**.



*Spesso dopo decadimento  $\alpha$  o  $\beta$*

- **La radiazione alfa** presenta una basso potere di penetrazione, quindi viene facilmente fermata dallo strato superficiale della pelle, quindi non è pericolosa per l'uomo nei casi di irradiazione esterna.
- **Diventa invece pericolosa** nelle situazioni in cui la sorgente radioattiva viene inalata o ingerita perché in questo caso lede i tessuti interni come nel radon in cui l'isotopo radioattivo viene inspirato e decade nei polmoni.



- 
- Ogni radiazione, interagendo con la materia, **cede energia**
  - alla struttura atomica/molecolare del materiale attraversato
  - Le particelle  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  emesse dal nucleo interagiscono con la materia circostante depositando in essa la loro energia.
  - Come vedremo 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

# Come la radiazione causa danni biologici

- la radiazione di alta energia **rompe i legami chimici**.
- Le particelle  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  emesse dal nucleo interagiscono con la materia circostante depositando in essa la loro energia.
- **si creano radicali liberi, come quelli prodotti o da altri agenti nocivi o nel corso dei normali processi cellulari all'interno dell'organismo.**
- **I radicali liberi possono modificare gli elementi**
- Queste modifiche sono in grado di danneggiare le funzioni cellulari e di distruggere le cellule stesse.

# Unità di misura della radiazione

- Vi sono molte unità di misura perché dipende da cosa noi vogliamo misurare:
- **Unità di misura di disintegrazioni nucleari:**  
Il **Curie (Ci)** è l'unità standard più vecchia, e corrisponde a  $3,7 * 10^{10}$  dps disintegrazioni nucleari per secondo.  
L'unità SI (Sistema internazionale di misura) è il **Becquerel (Bq)**, corrisponde ad 1 disintegrazione per secondo.
- **Unità di misura che indica la quantità di radiazione (X o gamma) necessaria a produrre un effetto nella materia**  
**Roentgen (R)** è definito come la quantità di radiazione X o gamma che produce in un campione di aria di 1mL a 0°C e 1 atm, una quantità di ioni corrispondente ad una carica elettrica di 1 ues. Poiché la carica elettrica è  $4,8 * 10^{-10}$  ues, 1 R corrisponde a  $2.1 * 10^9$  ioni con singola carica. Un orologio luminoso produce per esempio circa 5 milliroentgen (mR) per anno mentre **Una radiografia produce circa 500 mR.** Il Roentgen è riferito solo a radiazioni X e gamma.

# LA DOSIMETRIA

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto quando si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato.

In particolare il **danno subito dai tessuti biologici e legato all'energia assorbita per unita di massa**. Lo scopo della dosimetria è quello di individuare delle grandezze fisiche in maniera da creare la relazione

- quantitativa con gli effetti ( **deterministici e stocastici**) indotti dalle radiazioni ionizzanti.

# Grandezze Dosimetriche

- Le **grandezze radiometriche** danno informazioni circa il campo di radiazioni e **queste sono, il flusso di particelle, la fluenza di particelle, la fluenza di energia.**
- Le **grandezze dosimetriche** invece descrivono l'esito dell'interazione RI e materia e queste sono **l'esposizione e il Kerma in aria.**
- Le **grandezze protezionistiche** invece sono rappresentate dall'equivalente di dose e dalla dose efficace.

# Dose Assorbita

- La dose assorbita  $D$  è definita come il **quoziente** tra **l'energia media ceduta**
- dalle radiazioni ionizzanti alla materia in **un certo elemento di volume** e la **massa di materia contenuta in tale elemento di volume**:

$$D = d \epsilon / dm$$

- Anche se non vi è una distinzione netta, possiamo considerare il diverso tipo di
- informazione che forniscono le RI nell'interazione con la materia.

# GRANDEZZE DOSIMETRICHE E RADIOPROTEZIONISTICHE DOSE ASSORBITA

- Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto quando si verifica una
- cessione di energia al mezzo attraversato. Di conseguenza il danno subito dai tessuti
- biologici è in stretta relazione all'energia ceduta e assorbita per unità di massa.
- La grandezza dosimetrica **dose assorbita, D**, viene definita come il quoziente tra
- l'energia media  $\Delta E$  ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un certo elemento
- di volume contenente massa di materia  $\Delta m$ .
- La dose assorbita si misura in gray, Gy che ha sostituito la vecchia unità di misura che
- era il rad. Un gray corrisponde all'assorbimento di un joule in un kg di materia.
- **$D = \Delta E / \Delta m$  (J/Kg)**
- **1 Gray = 1 J/Kg = 100 rad**
- D = dose assorbita
- $\Delta E$  = energia ceduta
- $\Delta m$  = massa

# DOSE EQUIVALENTE (H)

- -
- Le RI hanno una **diversa capacità di interazione e di ionizzazione con la materia vivente** che dipende non solo dal tipo di energia impiegata ma anche dalle caratteristiche della stessa ( $\alpha$   $\beta$  X Y). **La dose D è pertanto insufficiente a predire sia la severità sia la probabilità degli effetti.**
- ICRP 60(1990) allo scopo introduce e raccomanda l'adozione della grandezza **Dose equivalente**, una grandezza radioprotezionistica ottenuta moltiplicando la dose
- assorbita ( $D_x$ ) per un **fattore di ponderazione** espressivo del tipo di RI ( $WR$ ) per cui:
  - **$H = D \times WR$**
- L'unità dosimetria introdotta è il **Sievert**, ( ma vengono molto usati i sottomultipli ) ha sostituito la vecchia unità di misura in **rem**.
  - **1 SIEVERT = 100 rem**
  - **1 mSIEVERT = 0,001 SIEVERT = 0,1 rem**
  - **1  $\mu$ SIEVERT = 0,000001 SIEVERT = 0,0001 rem**

# Fattori di ponderazione della radiazione Da NCRP

Tabella 4: fattore di ponderazione  $w_R$

Radiazione	Energia	$w_R$
Fotoni	tutte le energie	1
Elettroni e muoni	tutte le energie	1
Neutroni	< 10 keV	5
"	10 - 100 keV	10
"	100 keV - 2 MeV	20
"	2 - 20 MeV	10
"	> 20 MeV	5
Protoni (escluso rinculo)	> 2 MeV	5
alfa, frammenti di fissione, nuclei pesanti	tutte	20

Da NCRP (1967) e ICRP ( 1990 )

Per i fotoni il  $w_R$  è di 1, mentre per protoni e neutroni è 5 per radiazioni  $\alpha$  e di 20.

## DOSE EFFICACE (E) -

- Se a parità di dose equivalente si irradiano tessuti diversi si osserva che l'incidenza di leucemie e tumori solidi non è uguale per i diversi tessuti. Ciò è indicativo del fatto che i **diversi tessuti e organi hanno una diversa radiosensibilità**. Per ovviare a questo
- è stata creata una nuova grandezza denominata “**dose efficace**” che **si ottiene moltiplicando la dose equivalente per un fattore di ponderazione (WT)** caratteristico di ciascun tessuto o organo irradiato.
- Quindi in caso di distribuzione disomogenea di RI o a parità di distribuzione la **dose efficace rappresenta la somma delle dosi assorbite dai singoli organi e tessuti**
- **moltiplicate per i rispettivi fattori di ponderazione:**
  - **$E = \sum WT \times HT (Sv)$  dove:**
  - **HT:** è la dose equivalente media all'organo o tessuto  $T_n$  (espressa in Sievert)
  - **WT:** è il fattore di ponderazione per l'organo o il tessuto

Organo o tessuto	Fattore di ponderazione $w_T$
Gonadi	0,20
Midollo osseo (rosso)	0,12
Colon	0,12
Polmone (vie respiratorie toraciche)	0,12
Stomaco	0,12
Vescica	0,05
Mammelle	0,05
Fegato	0,05
Esofago	0,05
Tiroide	0,05
Pelle	0,01
Superficie ossea	0,01
Rimanti organi o tessuti	0,05

ICRP ( 1990 )

Se quindi **la tiroide** che ha un fattore di ponderazione di **0,05** viene irradiata con una certa dose, se  $H_{\text{tiroide}}$  (Sv) e la dose equivalente alla tiroide, risulta che la dose efficace alla tiroide e data da:  **$E_{\text{tiroide}} = H_{\text{tiroide}} \cdot W_{\text{tiroide}}$** .

La dose equivalente che potrebbe essere causa di rischio in caso di irraggiamento per tutto il corpo per quel determinato tessuto e data dal rapporto  $E/W$ .

Se il limite per **irradiazione uniforme di tutto il corpo** e di **1 mSv** (in tal caso la dose equivalente = dose efficace), il limite per irradiazione della sola tiroide risulta:

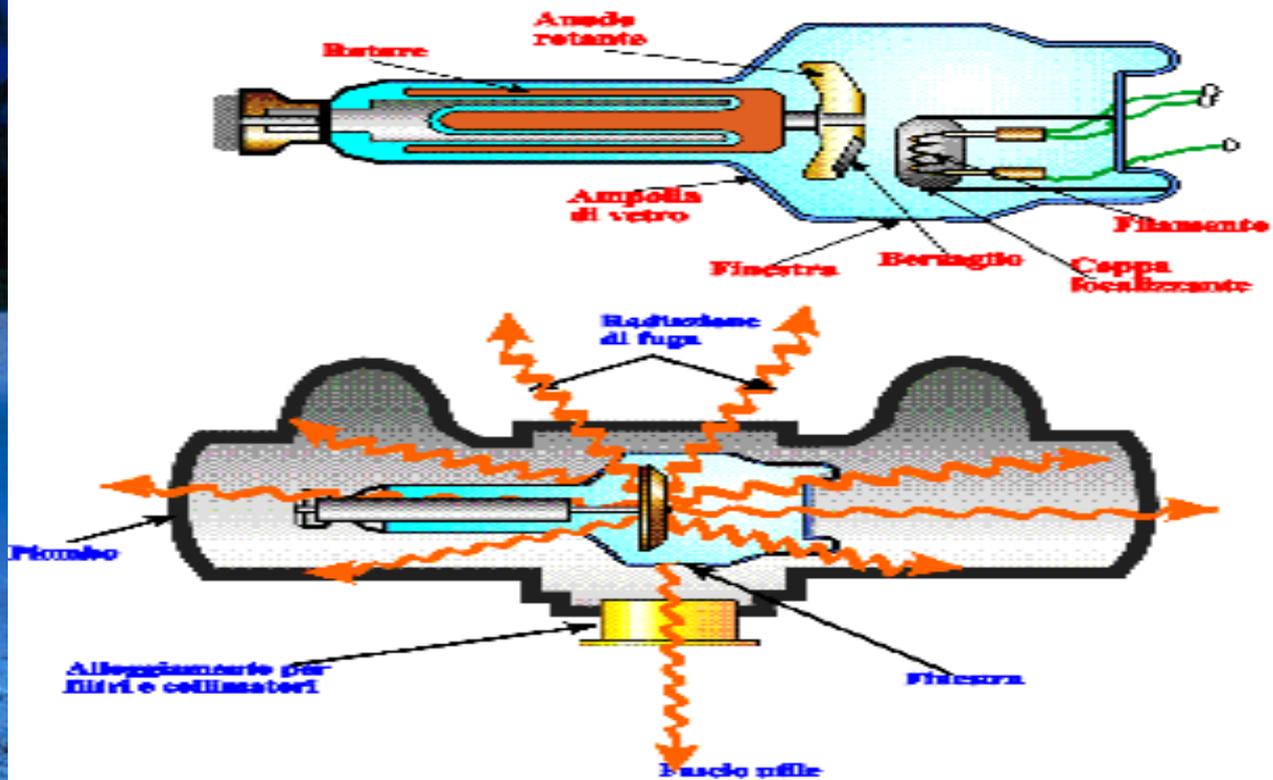
$$H_{\text{tiroide}} = E_{\text{tiroide}} / W_{\text{tiroide}} = 1 \text{ mSv} / 0,05 = 20 \text{ mSv}$$

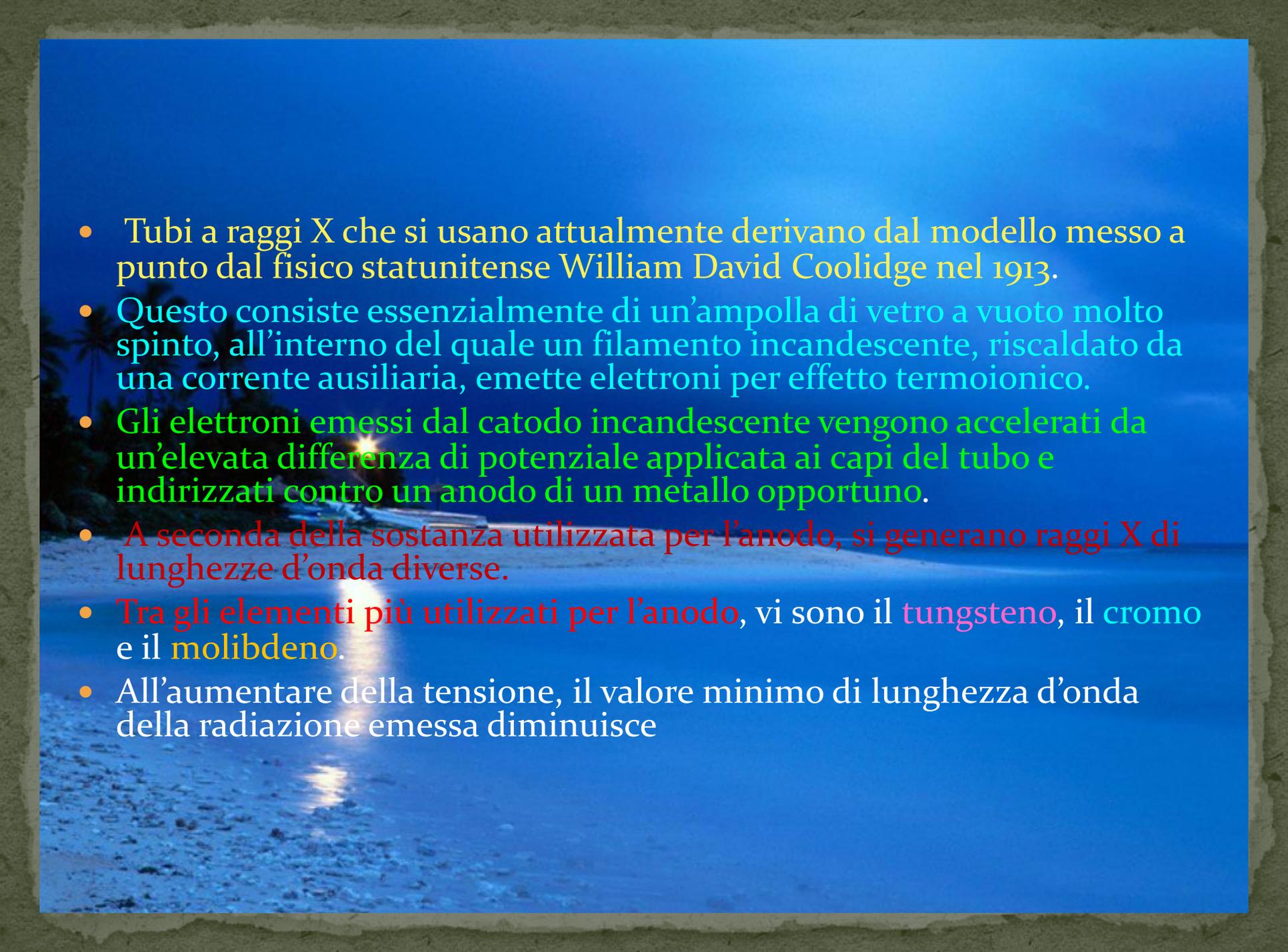
analogamente per es. sulle gonadi:  $H_{\text{gonadi}} = E_{\text{gonadi}} / W_{\text{gonadi}} = 1 \text{ mSv} / 0,20 = 5 \text{ mSv}$

# I Raggi X

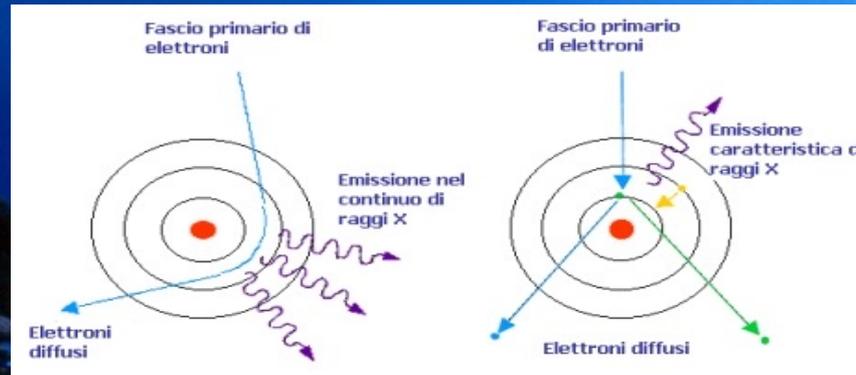
- Sia i raggi X che la radioattività possono essere prodotti artificialmente dall'uomo bombardando la materia principalmente con elettroni o con neutroni.
- La produzione dei raggi X si verifica nei tubi a raggi catodici con gli elettroni,
- mentre la produzione di radioattività artificiale si ottiene soprattutto nei reattori nucleari con i neutroni.

## PARTI PRINCIPALI DI UN MODERNO TUBO A RAGGI X AD ANODO ROTANTE



- 
- Tubi a raggi X che si usano attualmente derivano dal modello messo a punto dal fisico statunitense William David Coolidge nel 1913.
  - Questo consiste essenzialmente di un'ampolla di vetro a vuoto molto spinto, all'interno del quale un filamento incandescente, riscaldato da una corrente ausiliaria, emette elettroni per effetto termoionico.
  - Gli elettroni emessi dal catodo incandescente vengono accelerati da un'elevata differenza di potenziale applicata ai capi del tubo e indirizzati contro un anodo di un metallo opportuno.
  - A seconda della sostanza utilizzata per l'anodo, si generano raggi X di lunghezze d'onda diverse.
  - Tra gli elementi più utilizzati per l'anodo, vi sono il tungsteno, il cromo e il molibdeno.
  - All'aumentare della tensione, il valore minimo di lunghezza d'onda della radiazione emessa diminuisce

- Quando l'elettrone di un fascio interagisce con il campo elettrico del nucleo di un atomo (figura 3 a sinistra), subisce una brusca decelerazione e perde energia che viene emessa sotto forma di fotoni. Questo processo, chiamato "**radiazione di frenamento**" o "**bremsstrahlung**", è responsabile dello spettro continuo dei raggi X.



Se invece, l'interazione dell'elettrone incidente avviene con uno degli elettroni più interni dell'atomo bersaglio (figura 3 a destra), il processo di produzione dei raggi X prende il nome di "**radiazione caratteristica**". A seguito di questa interazione, entrambi gli elettroni sono diffusi fuori dall'atomo, così che nell'orbitale rimane un posto libero o "lacuna". Successivamente uno degli elettroni più esterni si sposta per colmare la lacuna. È durante quest'ultimo processo che l'atomo emette radiazione X con un'energia che individua in maniera esatta il materiale di cui è composto l'atomo bersaglio, da cui il nome "radiazione caratteristica".

# LA PENETRAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI NELLA MATERIA

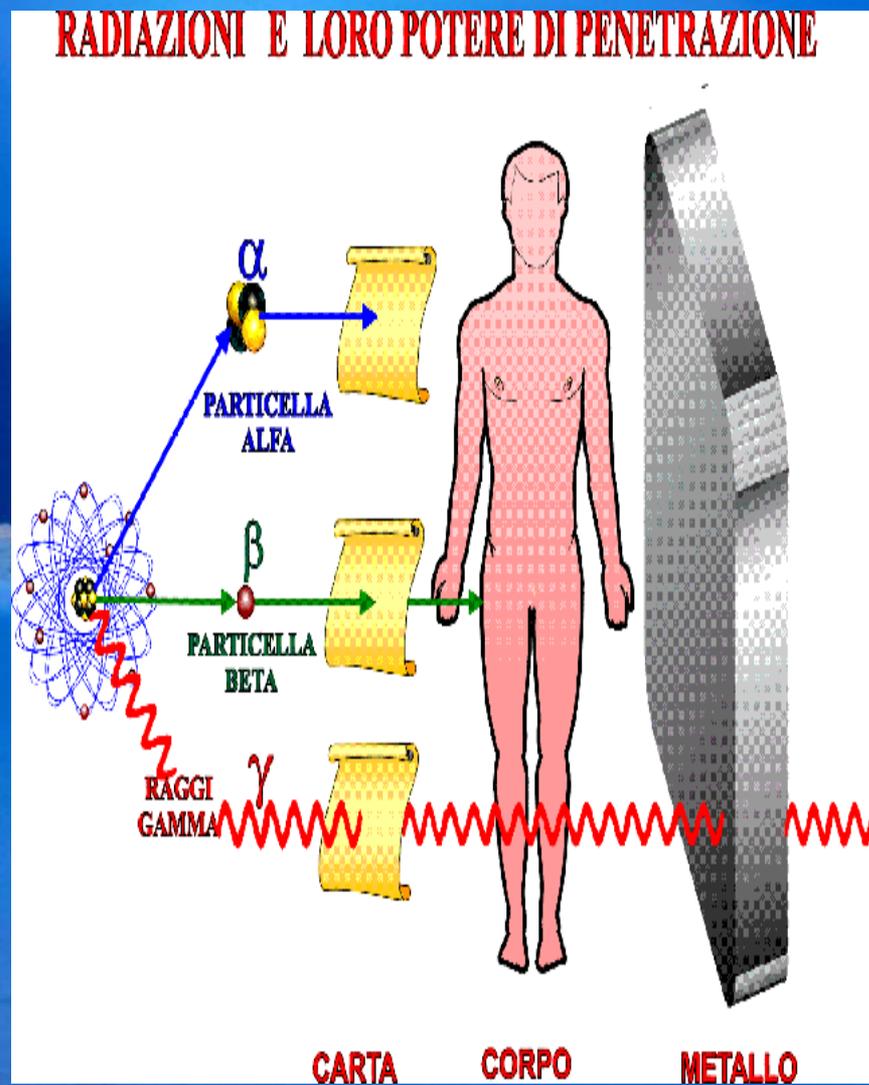
Le radiazioni ionizzanti propagandosi nello spazio possono incontrare materia vivente e non, con la quale interagiscono.

I meccanismi di interazione sono diversi a seconda del tipo di radiazione, della sua energia e delle caratteristiche del materiale attraversato.

Ne segue una diversa capacità di penetrazione dei vari tipi di radiazioni nei vari materiali

**Le particelle alfa** si caratterizzano per la produzione di una elevata densità di ionizzazione lungo le loro tracce.

**Il percorso nella materia di queste particelle è quindi sempre assai modesto. Esse possono essere arrestate in meno di 10 cm di aria oppure da un semplice foglio di carta.**



## Le particelle Alfa e Beta

- Non sono pertanto molto pericolose fin quando la sorgente resta al di fuori dell'organismo umano (irradiazione esterna), in quanto poco penetranti e facilmente schermabili. Diventano invece estremamente pericolose, una volta introdotte nell'organismo (irradiazione interna), in quanto tutta la loro energia viene allora ceduta agli organi e tessuti interni del corpo umano.
- Anche **le particelle beta** e gli elettroni hanno una modesta capacità di penetrazione nella materia, ma i loro percorsi sono comunque assai maggiori di quelli delle particelle cariche pesanti. Elettroni da 1MeV sono arrestati in **4 metri di aria o in 4 mm di acqua**. Solo particelle con energie maggiori di 70keV riescono a raggiungere lo strato germinativo della cute..

# Raggi X e Gamma

- Nel caso delle radiazioni indirettamente ionizzanti (le principali sono i raggi X e gamma e i neutroni), la cui penetrazione nella materia è assai maggiore delle particelle cariche, in considerazione della tipologia delle loro interazioni, non ha senso parlare di percorso nella materia
- Con i raggi X e gamma si suole piuttosto far riferimento agli spessori emivalenti (SEV), attraversando i quali si dimezza l'intensità primaria della radiazione incidente.
- Ad esempio, a 1 MeV gli spessori di dimezzamento in
- acqua, calcestruzzo e piombo sono rispettivamente di 10 cm, 4,5 cm e 0,9 cm, mentre espressi in g.cm<sup>-2</sup> risultano tra loro confrontabili (circa 10 g.cm<sup>-2</sup>)
- Per attenuare efficacemente le radiazioni X e gamma si devono usare materiali pesanti con elevato numero atomico Z, cioè ad alta densità elettronica, quali piombo, tungsteno, calcestruzzo baritico

# Raggi X e Gamma

- Raggi X e Gamma avendo un potere penetrante elevato sono pericolosi per **irraggiamento esterno**. E' importante quindi l'utilizzo di **schermature** che
- tengano conto anche della radiazione diffusa ( in particolare per i raggi X)
- L'esposizione riguarderà l'intero corpo, e bisognerà porre particolare **attenzione ai tessuti ed agli organi più radiosensibili**

# EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI

- Quando la **radiazione ionizzante** attraversa la materia biologica e non, **crea atomi ionizzati** ed elettroni veloci. Questi elettroni a loro volta produrranno ancora ionizzazione finché non avranno speso tutta la loro energia.
- In alcuni casi **cambiamenti chimici prodotti** in seguito a ionizzazione sono permanenti e possono comportare la **carcinogenesi o mutazioni**.
- Gli effetti biologici dipendono dalla quantità di energia depositata dalla radiazione per unità di massa nel tessuto.

# EFFETTI BIOLOGICI DA RADIAZIONI

- I danni prodotti dalle radiazioni ionizzanti sull'uomo possono essere suddivisi in tre categorie:
  - Danni somatici deterministici
  - Danni somatici stocastici
  - Danni genetici stocastici
- **Somatici** sono i danni che si manifestano nell'individuo irradiato
- **Genetici** quelli che si manifestano nelle progenie

## EFFETTI DETERMINISTICI e STOCASTICI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

- **effetti deterministici** (reazioni tissutali avverse) dovuti in grande parte alla **morte o a disfunzioni delle cellule**, conseguenti a esposizione a dosi elevate;
- **effetti stocastici**, come, per esempio, neoplasie ed effetti ereditari che possono **comportare lo sviluppo di un tumore negli individui esposti a causa della mutazione di cellule somatiche**, o malattie ereditarie nella loro progenie, a seguito di mutazione di cellule riproduttive (germinali).

# Effetti Deterministici

- Per **danni deterministici** si intendono quelli la cui frequenza e gravità variano **con la dose** e per i quali è individuabile **una dose-soglia**.
- Caratteristiche:
  - \* compaiono al superamento di una caratteristica di ogni effetto;
  - \* **il superamento della dose-soglia comporta l'insorgenza dell'effetto in tutti gli irradiati, sia pure nell'ambito della variabilità individuale;**
  - \* il valore della dose soglia è anche funzione della distribuzione temporale della dose;
  - \* **il periodo di latenza è solitamente breve (giorni o settimane); in alcuni casi l'insorgenza è tardiva (mesi o anni);**
  - \* **la gravità delle manifestazioni cliniche aumenta con l'aumentare della dose**

# Effetti Stocastici

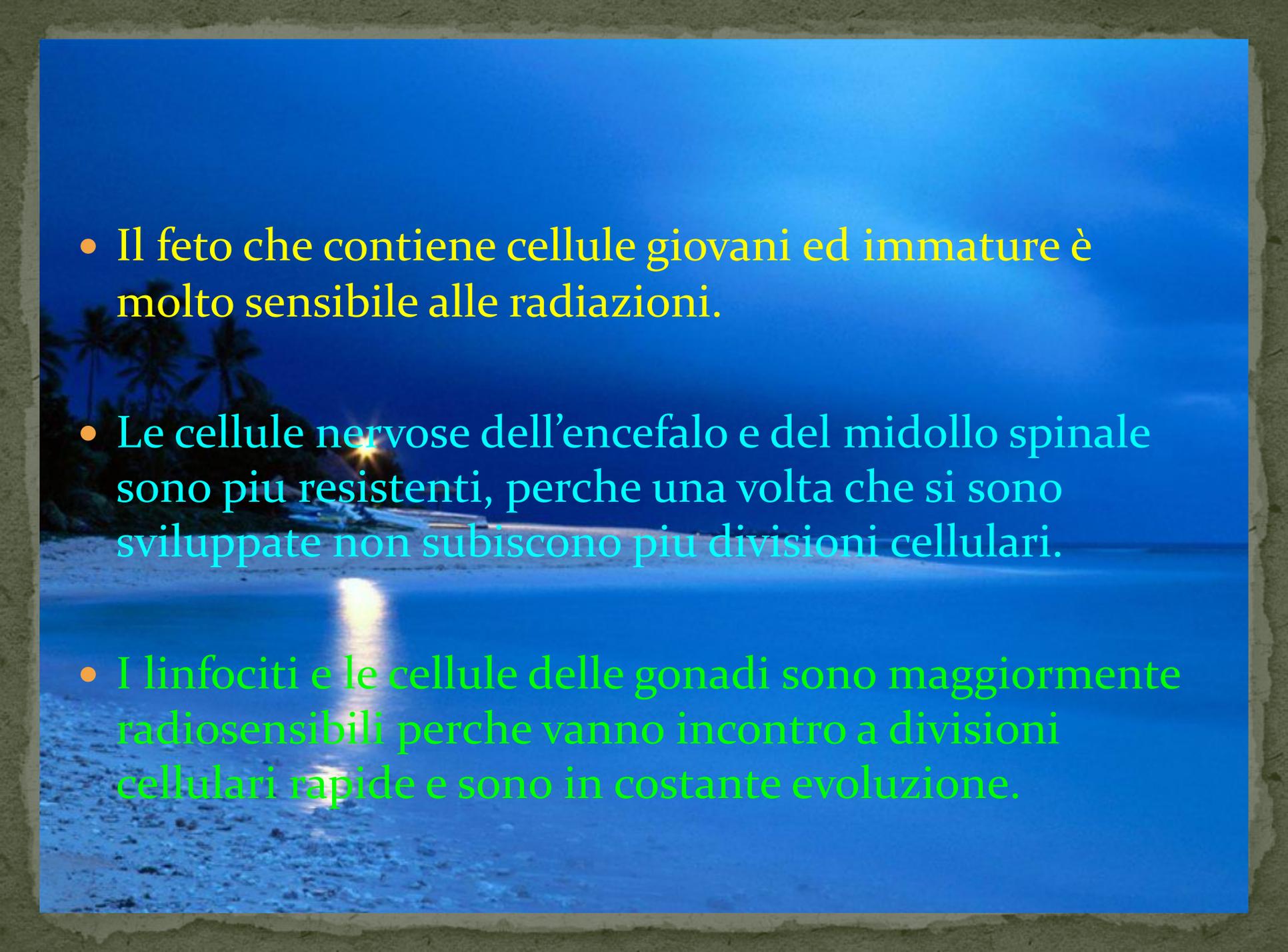
- I **danni somatici stocastici** comprendono le leucemie e i tumori solidi.
- In questa patologia **solo la probabilità di accadimento**, e non la gravità, è in funzione della dose ed è cautelativamente esclusa l'esistenza di una dose-soglia.
- Caratteristiche:
  - \* **non richiedono il superamento di un valore soglia di dose per la loro comparsa** (ipotesi cautelativa ammessa con gli scopi preventivi della radioprotezione);
  - \* **sono a carattere probabilistico**;
  - \* sono distribuiti casualmente nella popolazione esposta;
  - \* sono dimostrati dalla sperimentazione radiobiologica e dall'evidenza epidemiologica (associazione causale statistica);
  - \* la frequenza di comparsa è maggiore se le dosi sono elevate;
  - \* **si manifestano dopo anni, talora decenni, dall'irradiazione**;
  - \* non mostrano gradualità di manifestazione con la dose ricevuta, quale che sia la dose;
  - \* **sono indistinguibili dai tumori indotti da altri cancerogeni**.

# Irradiazione in utero

- Embrione e feto sono sensibili alle radiazioni ionizzanti e questa sensibilità è variabile in funzione dello stadio di sviluppo
- Prima dell'impianto dell'embrione ( 9°giorno dalla fecondazione) gli effetti possono determinare la morte dell'embrione o non avere conseguenze sullo sviluppo e sulla sopravvivenza postnatale.
- Nel periodo di morfogenesi ( dal 9°giorno al 2°mese) è presente un'elevata radiosensibilità e in questa fase l'irradiazione può indurre più facilmente malformazioni
- Durante la fase fetale (dal 3°mese fino al termine della gravidanza) diminuiscono la frequenza e la gravità delle malformazioni, ma è rilevante il rischio di uno sviluppo difettoso del sistema nervoso centrale. La radiosensibilità del cervello del feto è massima tra l'8a e la 15a settimana dal concepimento
- Nel periodo tra la terza settimana e la fine della gestazione appare probabile che l'esposizione possa determinare effetti stocastici che aumentano la probabilità di neoplasie in epoca post-natale

# EFFETTI BIOLOGICI DA RADIAZIONI

- Le cellule di un organismo umano, **mostrano una diversa sensibilità alle RI**; ciò è stato dimostrato attraverso una serie di ricerche che hanno portato alla **legge di Bergonie e Tribondeau**:
  - “la radiosensibilità di un tessuto è direttamente proporzionale all’attività mitotica ed inversamente proporzionale al grado di differenziazione delle sue cellule”.
  - Da questo si evince quanto segue:
    - **1. le cellule giovani o immature sono maggiormente radiosensibili; le cellule mature sono meno radiosensibili**
    - **2. Le cellule in rapida divisione sono maggiormente radiosensibili**
    - **3. Le cellule in rapida crescita sono maggiormente radiosensibili**

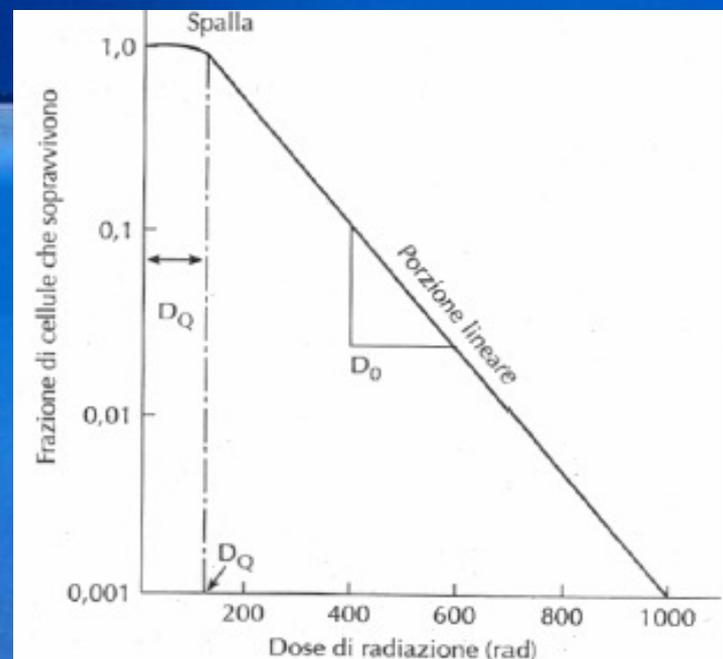
- 
- A tropical beach at sunset. The sky is a deep orange and red, with the sun low on the horizon. The ocean is a dark blue, and the beach is a light tan. Palm trees are visible on the left side of the image. A car is parked on the beach near the water's edge. The overall scene is peaceful and scenic.
- Il feto che contiene cellule giovani ed immature è molto sensibile alle radiazioni.
  - Le cellule nervose dell'encefalo e del midollo spinale sono più resistenti, perché una volta che si sono sviluppate non subiscono più divisioni cellulari.
  - I linfociti e le cellule delle gonadi sono maggiormente radiosensibili perché vanno incontro a divisioni cellulari rapide e sono in costante evoluzione.

# Tabella relativa sensibilita alle radiazioni di alcune cellule, tessuti ed organi

<b>Massima sensibilità</b>	Linfociti
	Gonadi
	Spermatogoni
	Ovogoni
	Tessuti emopoietici/eritroblasti
<b>Media sensibilità</b>	Intestino/cellule delle cripte intestinali
	Osso/osteoblasti
	Cute/cellule epiteliali
	Cristallino/cornea
	Tiroide
<b>Minima sensibilità</b>	Cellule muscolari
	Cellule nervose
	Midollo spinale
	Encefalo

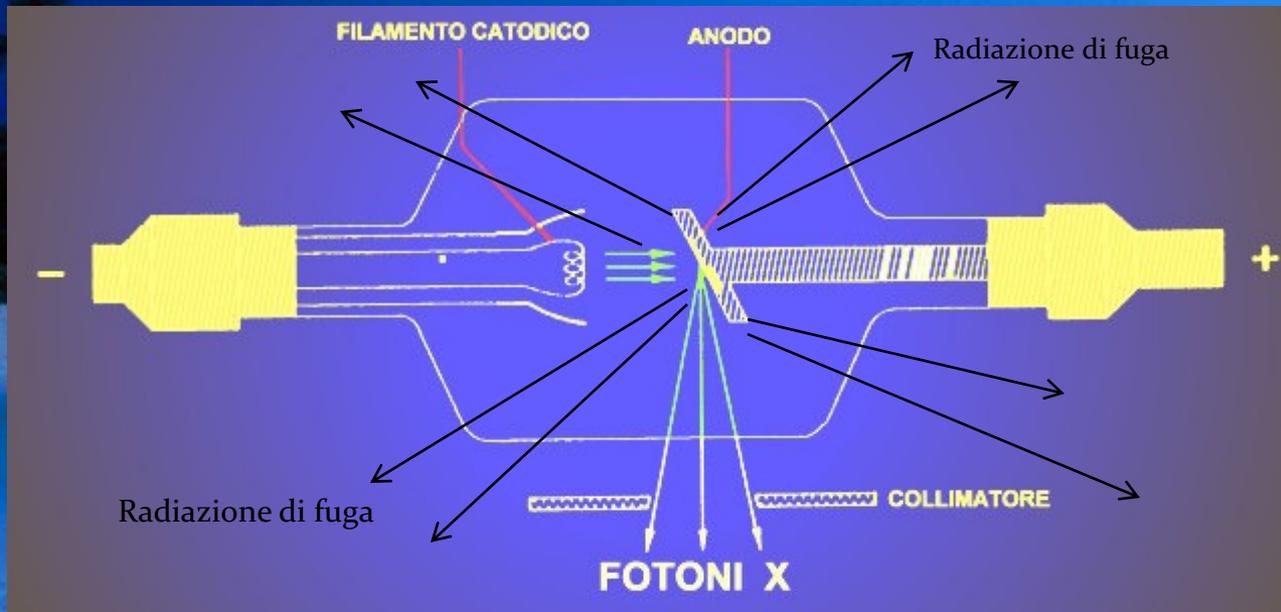
Il grafico successivo, rappresentante una curva, mostra l'andamento del numero di cellule che sopravvivono in seguito ad una esposizione a RI e come questo sia in stretta dipendenza dalla dose.

- La spalla, regione S, indica la quantità di riparazione cellulare
  - $DQ$  = dose soglia Radiazioni ad elevato LET determinano curve di sopravvivenza cellulare, quasi prive della regione S e con basso  $DQ$
  - Nella regione lineare L la sopravvivenza cellulare è inversamente proporzionale alla dose
  - $DO$  = dose letale media: dose necessaria per ridurre la popolazione sopravvivate di cellule ad un valore pari al 37%
- Cellule differenti presentano diversi valori di  $DQ$  e  $DO$



$$1\text{Gray} = 1\text{J/Kg} = 100\text{ rad}$$

# Fonti di rischio in radiodiagnostica



# Fonti di rischio in radiodiagnostica

## Radiazione primaria:

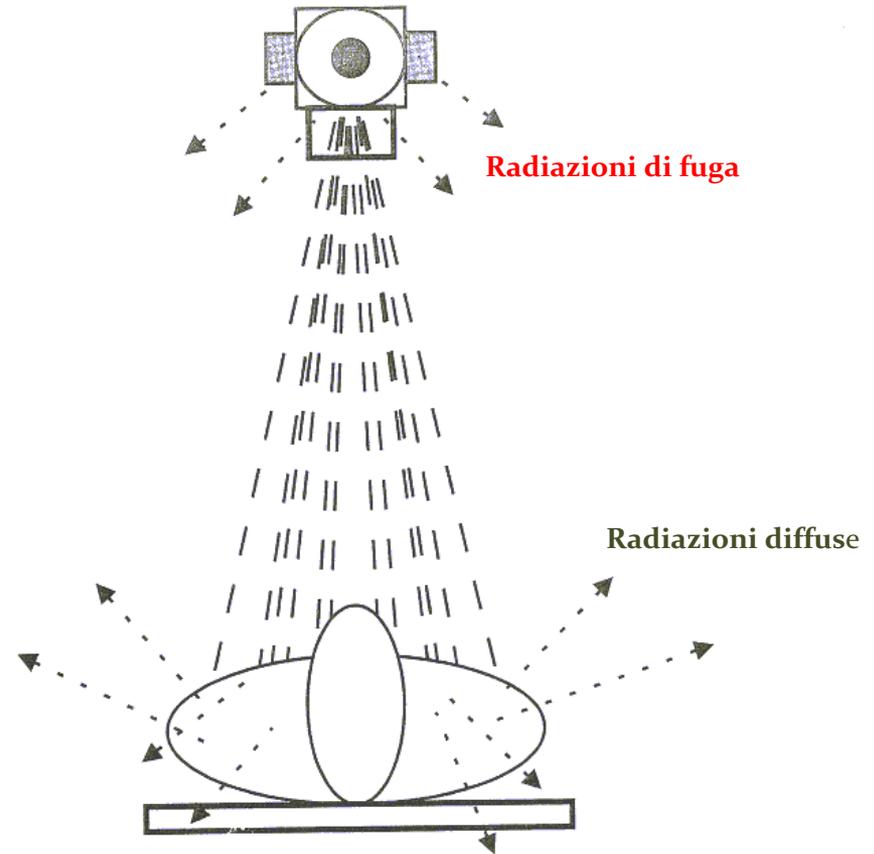
radiazione emessa direttamente dal tubo Rx utilizzata a fini diagnostici

## Radiazione diffusa:

radiazione diffusa dal paziente a seguito dell'interazione del fascio primario con il paziente stesso

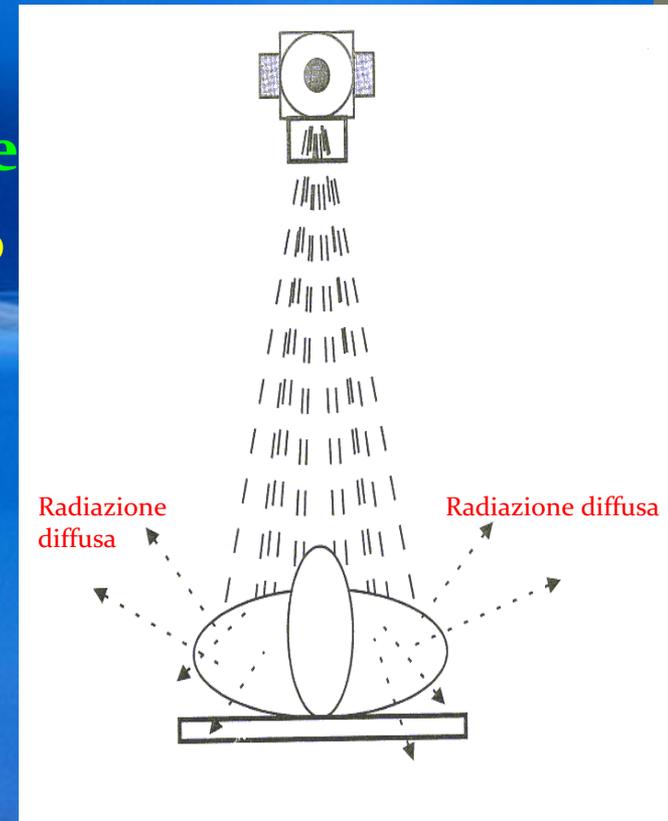
## Radiazione di fuga :

radiazione emergente dalla cuffia del tubo radiogeno al di fuori del fascio primario;  
per apparecchiature Rx utilizzate a scopo diagnostico: **< 1 mGy** per ora di funzionamento ad un metro



# Intensità della radiazione diffusa

- E' una piccola frazione della radiazione primaria
- Dipende da:
  - **Dimensioni del campo d'irradiazione**
  - **Tensione applicata al tubo radiogeno**
  - **Direzione considerata**



# Rischio da irraggiamento esterno

- La definizione e la quantificazione del rischio da irradiazione esterna non può prescindere da tre elementi fondamentali:
- **1. tempo** (durata dell'esposizione): determina in maniera lineare, a parità di condizioni di esposizione, l'intensità dell'esposizione e conseguentemente del rischio radiologico;
- **2. distanza**: la dose di radiazioni segue la legge dell'inverso del quadrato della distanza rispetto al punto di emissione:

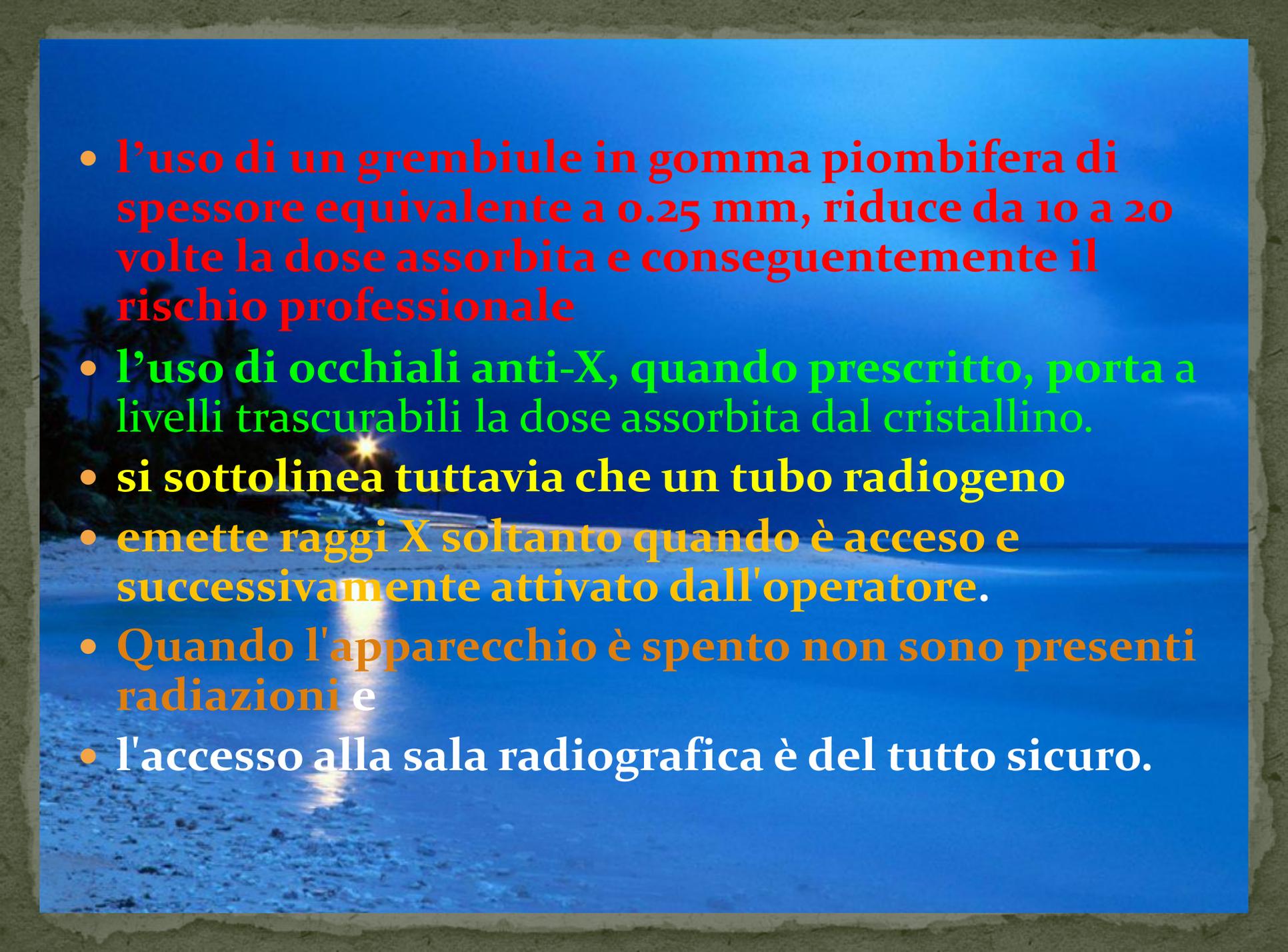
$$D_1 r_1^2 = D_2 r_2^2$$

- dove  $D_1$  è l'intensità di dose alla distanza  $r_1$  dalla sorgente e  $D_2$  è l'intensità di dose alla distanza  $r_2$  dalla sorgente (esempio: passando dalla distanza di 1 m a quella di 2 m, l'intensità di dose si riduce di un fattore 4)

- **3. disponibilità di schermature:** la radiazione viene attenuata a seguito dell'interazione con il materiale con cui interagisce; pertanto, la dose da radiazione in un punto viene ridotta interponendo del materiale tra la sorgente e il punto d'interesse. La quantità e il tipo di materiale necessario dipende dal tipo della radiazione:
- ad esempio le **radiazioni X sono penetranti** e, nel caso di energie elevate, **richiedono spessori considerevoli di piombo (Pb)**

Spessore in Pb	50 kV	75 kV	100 kV
0.25 mm	250	20	10
0.50 mm	10000	200	50
1 mm	>10000	3000	300
2 mm	>>10000	>>10000	5000

*Fattori di attenuazione della radiazione X per diversi spessori di Pb e diverse tensioni di lavoro*

- 
- **l'uso di un grembiule in gomma piombifera di spessore equivalente a 0.25 mm, riduce da 10 a 20 volte la dose assorbita e conseguentemente il rischio professionale**
  - **l'uso di occhiali anti-X, quando prescritto, porta a livelli trascurabili la dose assorbita dal cristallino.**
  - **si sottolinea tuttavia che un tubo radiogeno**
  - **emette raggi X soltanto quando è acceso e successivamente attivato dall'operatore.**
  - **Quando l'apparecchio è spento non sono presenti radiazioni e**
  - **l'accesso alla sala radiografica è del tutto sicuro.**

# Come ridurre la Dose assorbita

- la quantificazione del rischio da irradiazione esterna non può prescindere da tre elementi fondamentali
  - **Tempo di esposizione**
    - **Distanza**
    - **Schermature**



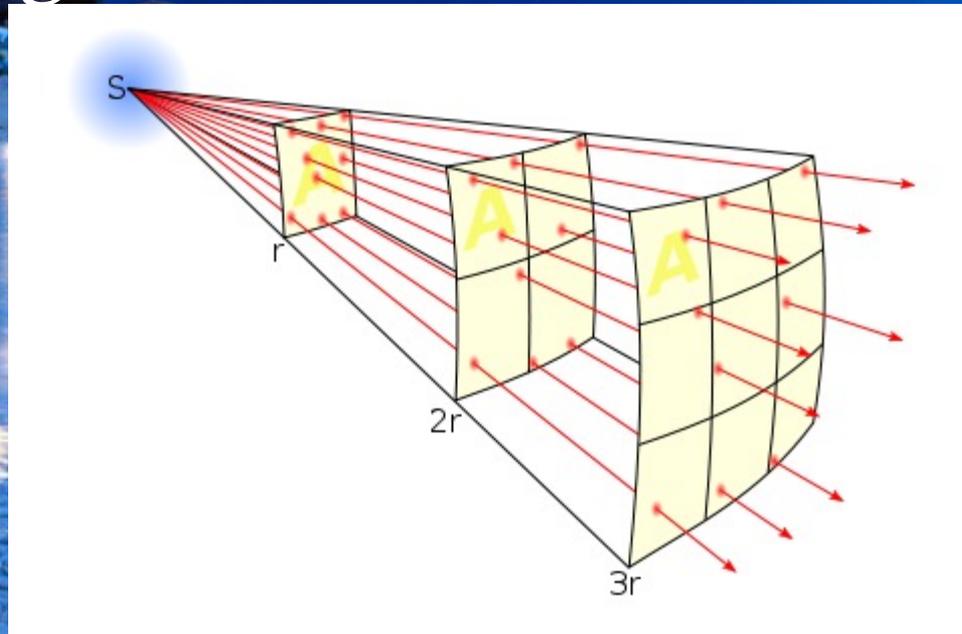
## IL TEMPO DI ESPOSIZIONE

- La dose di esposizione, e di conseguenza il rischio radiologico, è direttamente proporzionale al tempo.



# DISTANZA DALLA SORGENTE

- *la dose da radiazioni ricevuta da un individuo è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dell'individuo dalla sorgente*

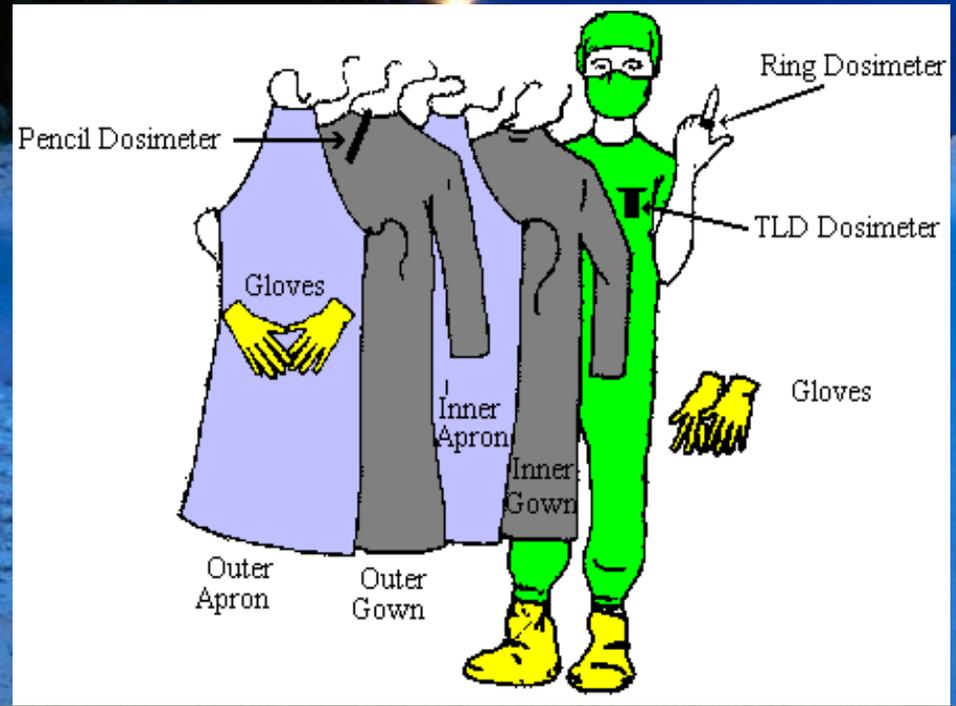


# DISTANZA DALLA SORGENTE

- distanza: il campo di radiazioni segue la legge dell'inverso del quadrato della distanza rispetto al punto di emissione
- Ogni volta che la **distanza raddoppia la dose diventa quattro volte inferiore**



# Dispositivi di protezione individuale



# Altri sistemi di sicurezza

- Un tubo a raggi X, emette raggi X soltanto quando è acceso e successivamente attivato dall'operatore.
- Quando l'apparecchio è spento non sono presenti radiazioni e l'accesso alla sala radiografica è del tutto sicuro.
- Per informare se il tubo radiogeno è in funzione o meno è installata una segnaletica luminosa di avvertimento al di fuori delle sale radiografiche, in aggiunta al contrassegno di pericolo di irraggiamento
- Tali luci indicano lo stato di funzionamento dell'apparecchiatura radiologica.
- **Impianto pronto all'emissione.**
- Di solito una luce di colore bianco segnala che la attrezzatura radiologica è accesa e quindi che è pronta in qualunque momento ad emettere i raggi. **Prima di accedere alla sala** occorre bussare e **attendere l'autorizzazione.**
- .



- **Emissione raggi.**
- Una **luce**, di solito **rossa**, segnala il momento in cui l'apparecchio emette i raggi X.
- **In questo caso è vietato entrare nella sala**



# La legislazione

- In Italia esiste un regime giuridico dell'impiego pacifico dell'energia nucleare, nel quale rientra come caso particolare, la detenzione e l'impiego di macchine generatrici di raggi X
- Il **testo fondamentale** in materia di protezione sanitaria contro il rischio derivante dall'impiego di sorgenti di radiazioni ionizzanti è **il D.Lgs 230/95**
- integrato dai **D.Lgs 241/00 e 257/01**. per quanto riguarda la **radioprotezione del paziente** la normativa di riferimento è il **d.Lgs 187/00**.

# Situazione legislativa



**D. Lgs. 17 marzo 1995, n. 230**  
aggiornato dal D.Lgs. n. 241/2000 e  
dal D.Lgs. n. 257/2001 recepisce  
Direttive in materia di protezione  
sanitaria della popolazione e dei  
lavoratori contro i rischi derivanti  
dalle radiazioni ionizzanti.

# Criteri di classificazione dei lavoratori e delle zone

- Secondo il **D.Lgs 230/95** si definisce **lavoratore esposto** chiunque sia suscettibile, durante l'attività lavorativa, di esposizione a radiazione ionizzanti superiore a uno qualsiasi dei limiti fissati per le persone del pubblico.
- I lavoratori che non superano detti limiti sono da classificarsi come **lavoratori non esposti**.
- I **lavoratori esposti**, a loro volta sono classificati in **categoria A** e **categoria B**

	Ctg A mSv/anno	Ctg B mSv/anno	Non esposti mSv/anno
Corpo Intero Dose Efficace	20	6	1
Cristallino Dose equivalente	150	45	15
Estremità Dose equivalente	500	150	50

- La normativa prescrive , inoltre, al **datore di lavoro** di classificare e segnalare gli ambienti in cui è presente il rischio di esposizione alla radiazioni ionizzanti e regolamentarne l'accesso.
- Viene definita **zona controllata** un ambiente di lavoro in cui sussiste per i lavoratori in essa operanti le condizioni per la classificazione dei lavoratori in **categoria A**
- Viene definita **zona sorvegliata** un ambiente di lavoro in cui può essere superato in un anno solare uno dei limiti fissati per le persone del pubblico e **che non è zona controllata**

- All'ingresso dei locali in cui sono installati gli impianti radiogeni e che sono classificati come **"zona controllata"** deve essere presente
- un cartello che segnala appunto il pericolo di radiazioni col simbolo internazionale.



- L'accertamento delle condizioni che portino alla classificazione dei lavoratori è competenza esclusiva dell' **esperto qualificato**.
- Il criterio di classificazione non è associato al tipo , al luogo e alle modalità di svolgimento del lavoro ma al **rischio effettivo di ricevere dosi superiori ai limiti prefissati** , in considerazione del rischio da irradiazione esterna o interna e anche in considerazione di esposizioni potenziali dovute a malfunzionamenti o eventi anomali.
- Ciò comporta che in zona controllata possono operare lavoratori non esposti

# lavoratrici in stato di gravidanza

- La normativa dedica particolare attenzione alle **lavoratrici in stato di gravidanza**, prescrivendo che tale lavoratrici **non possono svolgere attività in zone classificate 0**, **comunque attività che potrebbero esporre il nascituro a dosi superiore ad 1 mSv durante il periodo di gravidanza.**
- E' vietato inoltre adibire le donne che allattano ad attività comportanti rischio di contaminazione.
- *Per le donne in stato di gravidanza si fa comunque riferimento al D. Lgs.151/2001*

# Sorveglianza fisica

- Il Capo VIII del d.Lgs 230/95 prevede che i datori di lavoro, esercenti attività comportanti la classificazione in una o più zone controllate o sorvegliate, assicurino la sorveglianza fisica per mezzo di **esperti qualificati**.
- **L'Esperto Qualificato è**
- **persona che possiede le cognizioni e l'addestramento necessari per misurare le radiazioni ionizzanti,**
- **per assicurare l'esatto funzionamento dei dispositivi di protezione**
- **per dare le istruzioni e prescrizioni necessarie a garantire la sorveglianza fisica della protezione dei**
- **lavoratori e della popolazione.**

- • Tra i compiti dell'esperto qualificato ci sono:
- – La prima verifica e la verifica periodica delle installazioni
- – Sorveglianza ambientale delle zone classificate



# SORVEGLIANZA MEDICA

- L'art. 83 del D.Lgs 230/95 regola la sorveglianza medica della radioprotezione, che può essere così riassunta:
- *il datore di lavoro deve provvedere ad assicurare mediante uno o più medici la sorveglianza medica dei lavoratori esposti.*
- *Tale sorveglianza è basata sui principi che disciplinano la medicina del lavoro*

La sorveglianza medica è assicurata, nel caso di lavoratori esposti di **categoria A**, da **medici autorizzati**, iscritti in elenchi nominativi presso l'Ispettorato medico centrale del lavoro.

Nel caso di lavoratori esposti di **categoria B** per mezzo di **medici autorizzati o medici competenti**

# OBBLIGHI DEI DATORI DI LAVORO, DIRIGENTI E PREPOSTI - ART.61

- *I datori di lavoro, i dirigenti ed i preposti, ognuno per le*
- *rispettive competenze, devono in particolare attuare le cautele di protezione e di sicurezza*
- **provvedere affinché gli ambienti di lavoro in cui sussista un rischio**
- **da radiazioni vengano individuati, delimitati, segnalati, classificati in zone e che l'accesso ad essi sia adeguatamente regolamentato**
- **provvedere affinché i lavoratori interessati siano classificati ai fini della radioprotezione**
- **predisporre norme interne di protezione e sicurezza al rischio di**
- **radiazioni e curare che copia di dette norme sia consultabile nei**
- **luoghi frequentati dai lavoratori, ed in particolare nelle zone**
- **controllate**

# OBBLIGHI DEI DATORI DI LAVORO, DIRIGENTI E PREPOSTI - ART.61

- • fornire ai lavoratori, ove necessari, i mezzi di sorveglianza dosimetrica e di protezione, in relazione ai rischi cui sono esposti
- rendere edotti i lavoratori, nell'ambito di un programma di formazione finalizzato alla radioprotezione
- provvedere affinché i singoli lavoratori osservino le norme interne di sicurezza,
- usino i mezzi di protezione
- fornire al lavoratore i risultati della sorveglianza dosimetrica che loriguardano direttamente.

# Il D.Lgs. 26.05.2000 n.241

- Capo III bis
- novità introdotte dal D.Lgs. n. 241/2000
- attività lavorative con sorgenti naturali di radiazioni

Radon  
86

Rn

222,0176

Personale  
aeronavigante

# DECRETO LEGISLATIVO 26.05.2000 N.187

- *attuazione della direttiva 97/43/EURATOM in materia di protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse ad esposizioni mediche*
- *(in vigore al 01.01.2001)*
  - Il D.Lgs. introduce i principi di:
    - - **giustificazione**
    - - **ottimizzazione.**

# PRINCIPIO di GIUSTIFICAZIONE

- È vietata l'esposizione non giustificata
- Le esposizioni mediche devono essere sufficientemente efficaci mediante la valutazione dei potenziali vantaggi da esse prodotti rispetto al danno alla persona che l'esposizione stessa potrebbe causare.
- Deve altresì tener conto dell'eventuale ricorso a metodiche alternative
- **Pertanto tutte le pratiche mediche comportanti una esposizione devono essere giustificate**
- preliminarmente e deve essere valutata l'efficacia per la salute del paziente.
- **Particolare attenzione va riservata nei confronti dei minori e delle donne in età fertile e/o in stato gestazionale.**

# PRINCIPIO di OTTIMIZZAZIONE

- Le dosi ricevute a livello diagnostico devono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile con il raggiungimento dell'informazione diagnostica richiesta.
- noto anche come principio A.L.A.R.A. (“As Low Reasonably Achievable”)
- **L'ottimizzazione** riguarda la scelta delle attrezzature con la produzione di una appropriata informazione diagnostica in un programma di garanzia della qualità e la valutazione della dose al paziente.

# LIVELLI DIAGNOSTICI DI RIFERIMENTO

- • **I Livelli Diagnostici di Riferimento (LDR) sono**
- **essenzialmente dei vincoli di dose al paziente.**
- • **La normativa legislativa indica un elenco di esami standard ed impone che la dose al paziente non superi determinati LIVELLI (LDR)**



# Tabella – Livelli Diagnostici di Riferimento per gli esami radiografici più comuni

RADIOLOGIA TRADIZIONALE			
<i>ESAMI:</i>	<i>* DOSE D'INGRESSO (mGy)</i>	<i>ESAMI</i>	<i>* DOSE D'INGRESSO (mGy)</i>
<b>Addome</b>	<b>10</b>	<b>Urografia (per ripresa)</b>	<b>10</b>
<b>Torace PA</b>	<b>0.4</b>	<b>Cranio AP/PA</b>	<b>5</b>
<b>Torace Lat</b>	<b>1.5</b>	<b>Cranio Lat</b>	<b>3</b>
<b>Rachide lombare AP</b>	<b>10</b>	<b>Rachide Lombo Sacrale</b>	<b>40</b>
<b>Rachide lombare Lat</b>	<b>30</b>	<b>Pelvi AP</b>	<b>10</b>
<b>Mammografia CC</b>	<b>10 mGy (dose di ingresso con griglia)</b>		

\*Riferita alla superficie del paziente

## RADIOLOGIA PEDIATRICA

<i>ESAMI:</i>	<i>DOSE D'INGRESSO (<math>\mu</math>Gy)</i>	<i>ESAMI</i>	<i>DOSE D'INGRESSO (<math>\mu</math>Gy)</i>
Cranio PA/AP	1500(5 anni)	Torace PA/AP	100 (5 anni)
Cranio Lat	1000 (5 anni)	Torace Lat	200 (5 anni)
Pelvi AP	200 (neonati)	Torace AP	80 (neonati)
Pelvi AP	900 (5 anni)	Addome	1000 (5 anni) **

## TOMOGRAFIA COMPUTERIZZATA

<i>ESAMI</i>	<i>°CTDI<sub>w</sub> (mGy)</i>	<i>°DLP (mGy cm)</i>
Testa	60	1050
Torace	30	650
Addome	35	800
Pelvi	35	600

**\*\*Viene indicata l'età dei pazienti di riferimento per la determinazione della dose - °CTDI<sub>w</sub>: Indice di dose tomografica pesato - °DLP: Prodotto dose-lunghezza**

# CONTROLLI DI QUALITA'

- I controlli di qualità costituiscono una serie di
- operazioni che mirano a mantenere o migliorare una procedura diagnostica ossia a mantenere a **livelli ottimali le caratteristiche una determinata**
- apparecchiatura o impianto, al fine di esporre al**
- minimo (minima dose) il paziente compatibilmente con il quesito diagnostico.**
- Le prove di accettazione e di funzionamento su ogni apparecchiatura, descritte in appositi protocolli, sono effettuate a cura **dell'Esperto in Fisica Medica** e, in base ai risultati delle prove, il responsabile dell'impianto esprime il giudizio di idoneità all'uso clinico

# Norme di comportamento dei lavoratori

Gli obblighi cui sono tenuti i lavoratori possono essere così riassunti:

- **Art. 68 del D.Lgs 230/95**
- 1) I lavoratori devono:
  - a) **osservare le disposizioni impartite dal Datore di Lavoro, o dai suoi incaricati, ai fini della protezione individuale e collettiva e della sicurezza, a seconda delle mansioni alle quali sono addetti;**
  - b) **usare secondo le specifiche istruzioni i dispositivi di sicurezza, i mezzi di protezione e di sorveglianza dosimetrica predisposti o forniti dal Datore di Lavoro;**
  - c) **segnalare immediatamente al Datore di Lavoro, al dirigente o al preposto le deficienze dei dispositivi e dei mezzi di sicurezza, di protezione e di sorveglianza dosimetrica, nonché le eventuali condizioni di pericolo di cui vengano a conoscenza;**
  - d) **non rimuovere né modificare, senza averne ottenuta l'autorizzazione, i dispositivi e gli altri mezzi di sicurezza, di segnalazione, di protezione e di misurazione;**
  - e) **non compiere, di propria iniziativa, operazioni o manovre che non sono di loro competenza o che possono compromettere la protezione e la sicurezza;**
  - f) **sottoporsi alla sorveglianza medica.**
- 2) I lavoratori che svolgono, per più Datori di Lavoro, attività che li espongono al rischio da radiazioni ionizzanti, devono rendere edotto ciascun Datore di Lavoro delle attività svolte presso gli altri.

# I soggetti responsabili

- Il D.Lgs 187/00 individua i responsabili della predisposizione e attuazione delle misure generali e specifiche di radioprotezione del paziente.
- Prevede, inoltre, che gli operatori direttamente coinvolti nell'esposizione dei pazienti debbano possedere una **formazione specifica** e seguire, con periodicità quinquennale, corsi di formazione continua, affidati dalle autorità regionali, alle associazioni e alle società scientifiche accreditate.
- Gli attori del processo di ottimizzazione sono essenzialmente tre: **il responsabile dell'impianto radiologico**, **il medico specialista (radiologo, radioterapista o medico nucleare)** e **l'Esperto in Fisica Medica**.

## *Il responsabile dell'impianto radiologico*

- E' un **medico specialista** in radiodiagnostica, radioterapia o medicina nucleare, individuato dall'esercente.
- Quest'ultimo può rivestire la funzione di responsabile dell'impianto se è **abilitato a svolgere l'indagine clinica**. I suoi compiti sono molteplici:
- predispone il programma di garanzia della qualità, comprese le procedure di valutazione della dose e delle **attività somministrate ai pazienti**, e inoltre:
- provvede, per quanto di competenza e di concerto con l'esercente, **affinché lo specialista si avvalga dell'esperto in fisica medica** nelle pratiche di radioterapia e che lo stesso sia disponibile nelle attività di medicina nucleare

# ***Il responsabile dell'impianto radiologico***

- verifica, ogni due anni, i livelli diagnostici di riferimento, per ogni apparecchiatura e tipologia di pratica radiologica segnalando all'esercente gli eventuali superamenti dei livelli prefissati, per l'adozione degli interventi correttivi, per eventuali limitazioni o accantonamento delle apparecchiature;
- - **adotta misure ragionevolmente attuabili per ridurre la probabilità di dosi accidentali (es. ripetizione delle radiografie per sovra/sottoesposizione) o non intenzionali, mediante istruzioni e protocolli scritti, sulla base degli incidenti che avvengono;**
- - **provvede affinché i risultati delle prove siano registrati e conservati per almeno cinque anni;**
- - **esprime il giudizio sulla qualità della prestazione e il giudizio di accettabilità, anche sulla base di periodiche valutazioni dosimetriche con il supporto dell'esperto in fisica medica, con particolare attenzione verso esposizioni che riguardano: bambini, programmi di screening,**
- **radiologia interventistica, tomografia computerizzata e radioterapia**

# *L'Esperto in Fisica Medica*

- Oltre a valutare e verificare le dosi impartite nelle esposizioni mediche ed effettuare i controlli di qualità sulle apparecchiature radiologiche, i principali compiti dell'esperto in fisica medica sono:
  - - collaborare alla stesura del programma di garanzia della qualità e dei protocolli dei controlli di qualità;
  - - predisporre le procedure fisiche dosimetriche e informatiche per la protezione del paziente;
  - - valutare le dosi assorbite dai pazienti congiuntamente con il responsabile dell'impianto;
  - - offrire la propria consulenza sull'ottimizzazione delle procedure, la dosimetria dei pazienti e il programma di garanzia della qualità, compreso i controlli di qualità;
  - - verificare i livelli diagnostici di riferimento delle pratiche radiologiche, su richiesta del responsabile dell'impianto, seguendo le modalità indicate dalla Commissione Europea;
  - - collaborare con il medico specialista nei casi previsti.

# *Il medico specialista*

- La figura del medico specialista è individuata, di volta in volta, in uno dei vari soggetti in funzione dell'attività svolta: **specialista in radiodiagnostica, radioterapia, medicina nucleare** ovvero medico chirurgo specialista nella disciplina in cui rientra l'esposizione medica (attività radiodiagnostiche complementari all'esercizio).
- **Lo specialista è responsabile dell'esposizione medica del paziente, e**
- **inoltre:**
  - - **giustifica la necessità della singola indagine diagnostica o del trattamento e sceglie la**
  - **metodologia idonea a ottenere il miglior beneficio clinico e il minor detrimento per il paziente (ottimizzazione) anche attraverso l'uso di tecniche sostitutive;**
  - - **effettua le esposizioni mediche su richiesta motivata del medico prescrivente, tenendo conto dei principi di giustificazione e ottimizzazione;**
  - - **effettua una accurata anamnesi allo scopo di sapere se la donna è in stato di gravidanza o se**
  - **allatta al seno (in caso di somministrazione di radioisotopi);**
  - - **se la gravidanza non può essere esclusa, considera la dose prevista per la pratica radiologica e**
  - **cura particolarmente l'ottimizzazione e, se la dose al feto è stimata essere maggiore di 1mSv,**
  - **decide individualmente di procrastinare l'intervento ovvero di sospendere l'allattamento;**
  - - **nei casi previsti, giustifica la necessità che il paziente debba essere assistito da un volontario**
  - **durante l'esecuzione dell'esame o nelle varie fasi del trattamento;**
  - - **può delegare gli aspetti pratici dell'esecuzione dell'attività radiologica al tecnico sanitario di**
  - **radiologia medico (TSRM) e/o all'infermiere in funzione delle competenze;**
  - - **si avvale, per lo svolgimento dei suoi compiti, della consulenza dell'esperto in fisica medica per**
  - **le procedure fisiche, dosimetriche e informatiche connesse alla radioprotezione del paziente e**
  - **alla valutazione delle dosi ai pazienti.**

# Macchine radiogene

- Le macchine radiogene sono apparecchiature in grado di produrre ed emettere radiazioni ionizzanti, tipicamente raggi X.
- Analogamente ad una lampadina che emette luce solamente quando è accesa, le macchine radiogene emettono radiazioni solo quando sono in funzione.
- In campo medico queste macchine hanno trovato innumerevoli applicazioni, sia in ambito diagnostico sia in ambito terapeutico.
- Alcuni esempi di macchine radiogene
- sono presentati di seguito.

# Macchine radiogene



## Apparecchio Telecomandato per radiografia

l'apparecchio radiologico più utilizzato per effettuare radiografie e si trova nei reparti di diagnostica per immagini (Radiologia).



## Tomografo Computerizzato (TC)

Si trova solitamente nei reparti di diagnostica per immagini. Serve per acquisire immagini dell'anatomia del paziente.

# Macchine radiogene



## Apparecchio per procedure interventistiche

È impiegato durante le  
procedure interventistiche in sala  
operatoria.



## Apparecchio portatile per radiografia

È impiegato ad esempio  
per effettuare le radiografie di  
pazienti allettati che non possono  
essere spostati. Per questo motivo  
si può trovare in vari ambienti e  
reparti.



### **Mammografo**

È impiegato per eseguire le mammografie. Si può trovare nei reparti di Radiologia e Senologia.



### **Acceleratore lineare di particelle (LINAC)**

Produce intensi fasci di radiazione che vengono impiegati a scopo terapeutico. Si trova nei reparti di Radioterapia