

Le Radiazioni Ionizzanti

(sono + o - buone per l'uomo ?)

Leonello Servoli

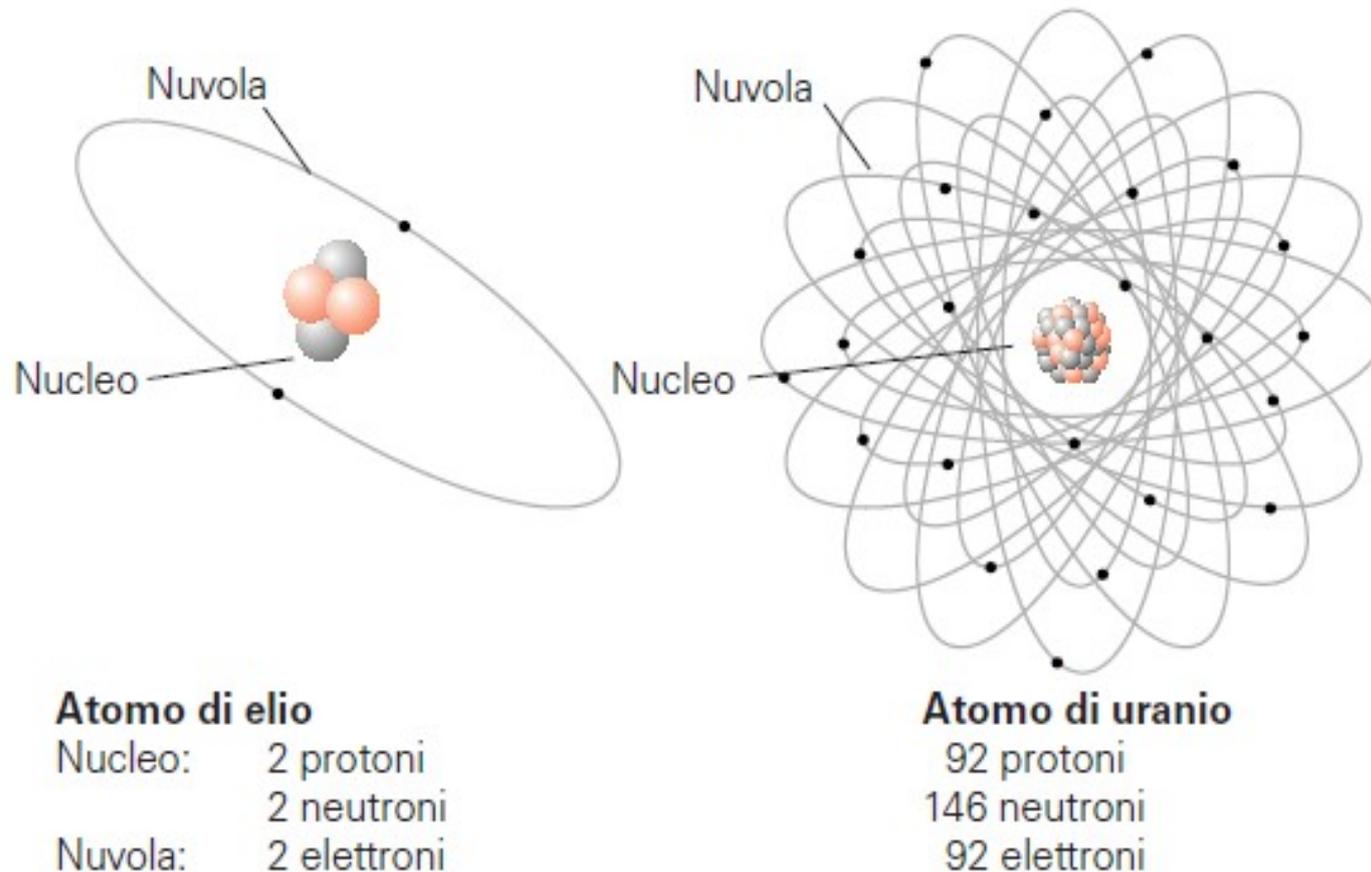
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare di Perugia

Sommario

- Che cosa sono le radiazioni ionizzanti
- Come interagiscono con la materia
- Effetti sulla materia vivente
- Utilizzazione delle radiazioni ionizzanti (soprattutto in ambito medico)

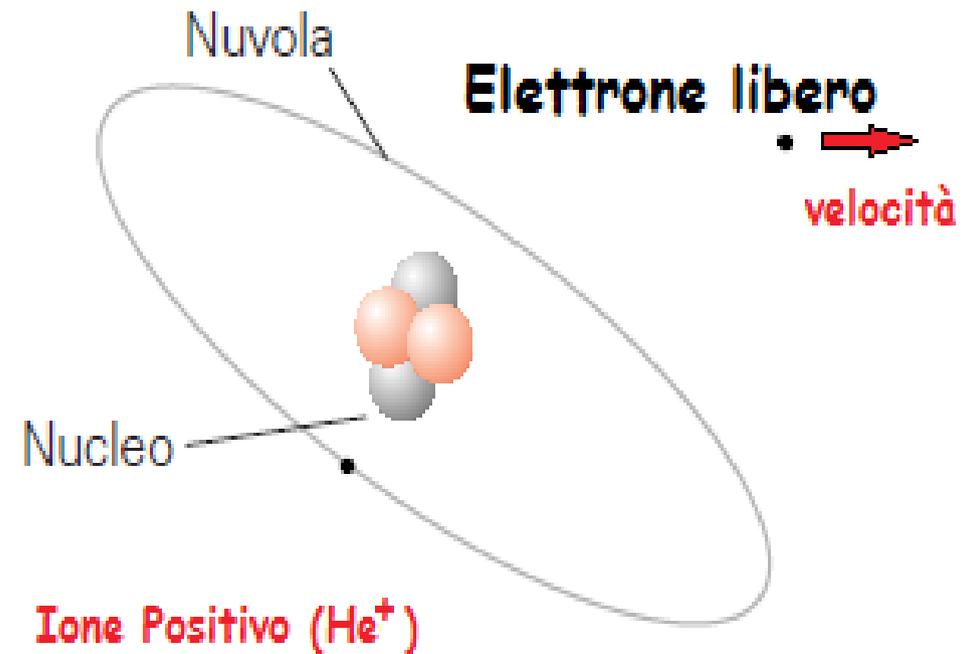
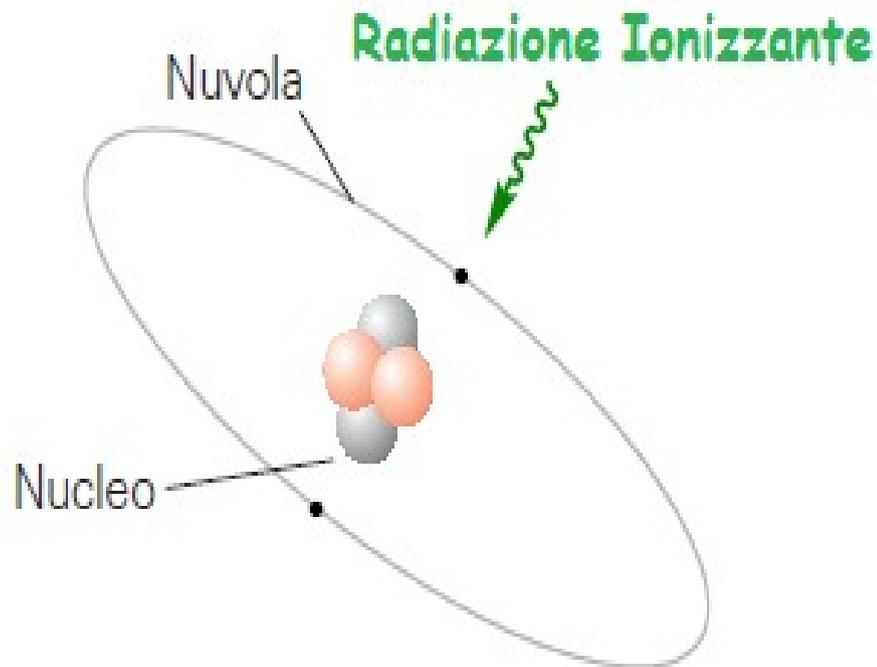
Che cosa sono?

Sono **"particelle"** che interagendo con un materiale sono capaci di rompere i legami atomici liberando elettroni.



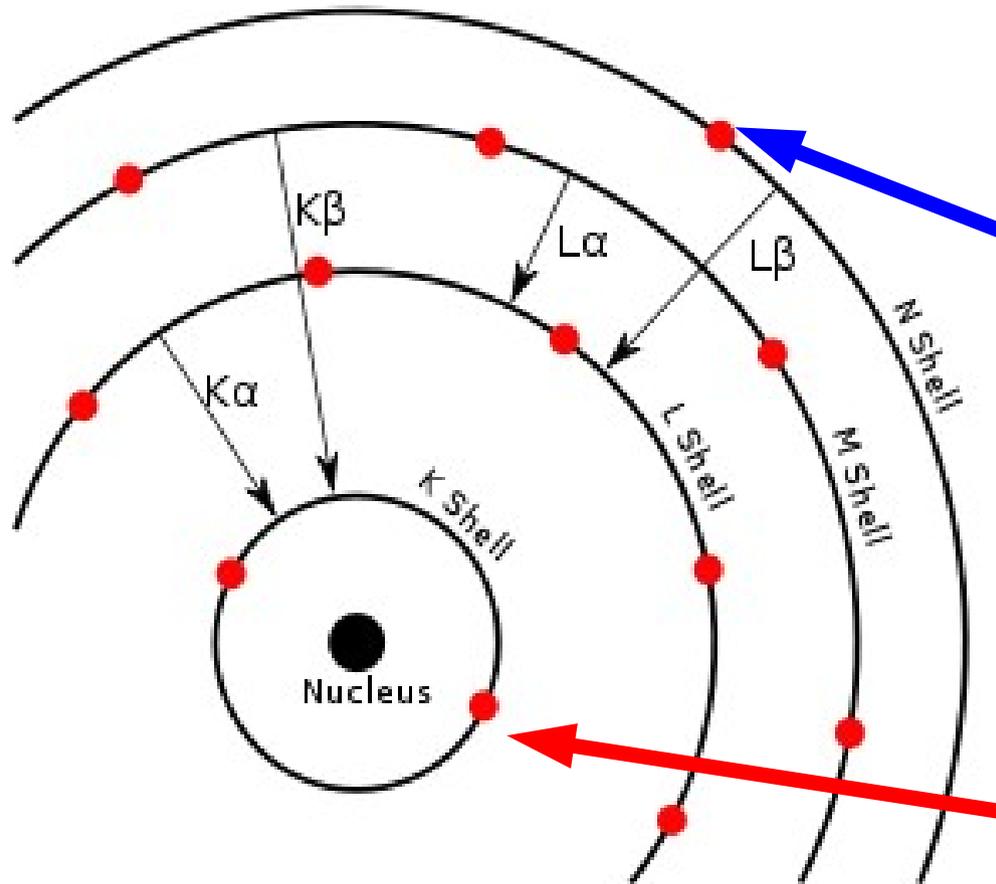
Che cosa sono?

Sono **"particelle"** che interagendo con un materiale sono capaci di rompere i legami atomici liberando elettroni.



Che cosa sono?

Importante: **per rompere il legame occorre SPENDERE energia**



A ogni elettrone corrisponde una **DISTANZA** dal nucleo
Ossia una **ENERGIA DI LEGAME**.

Si va da **< 1 eV** (i più lontani)

a **> migliaia di eV** (i più vicini)

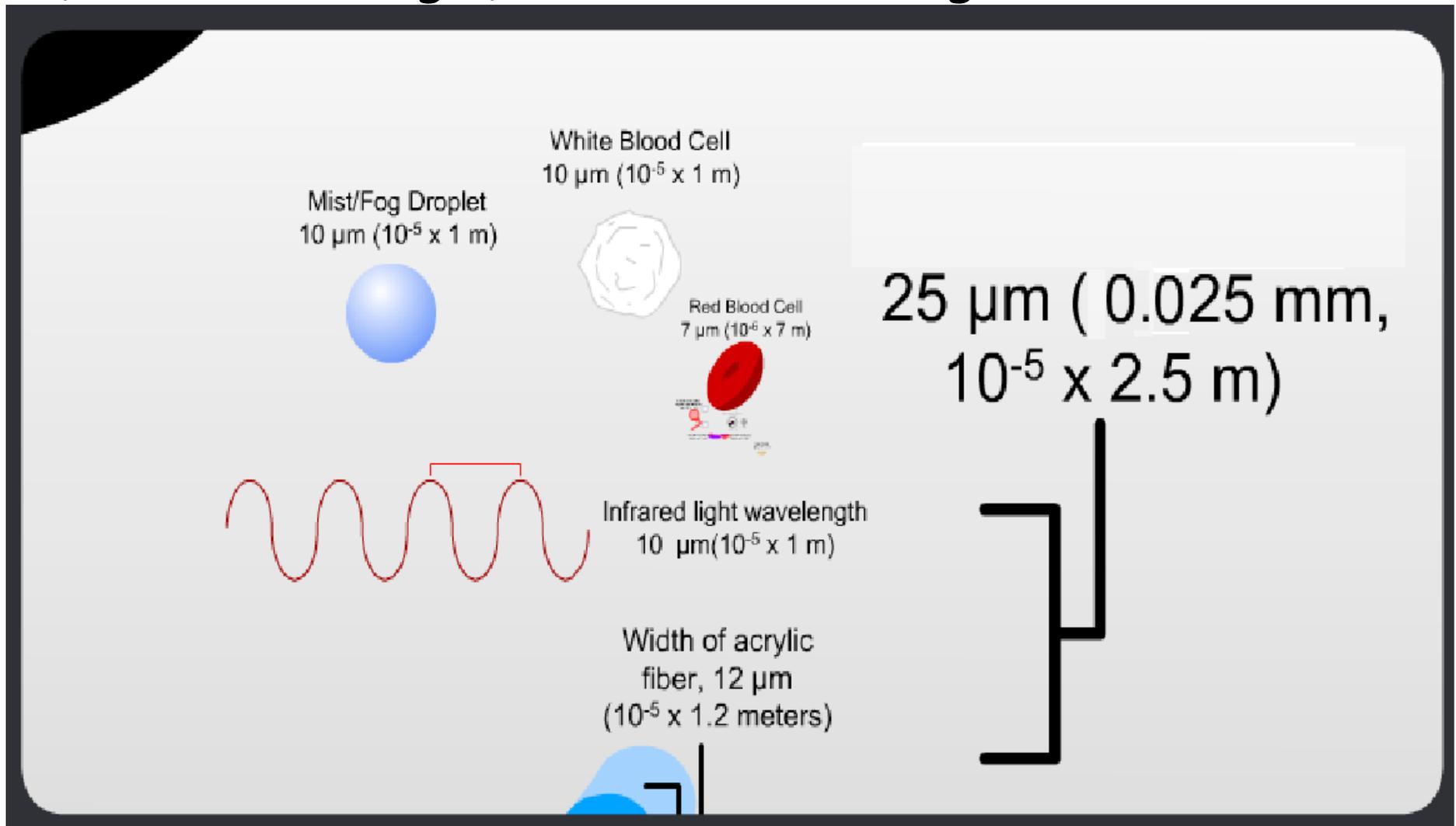
$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Che cosa sono? Es. Fotoni

Tipo di radiazione	(Lunghezza d'onda)	(Energia)
	λ →	$h\nu$ →
	$\lambda = c \cdot \nu$	$E = (h/c) / \lambda$
Onde elettriche	$> 3 \cdot 10^5$ cm	$< 4.1 \cdot 10^{10}$ eV
Radio-onde	da 10^{-1} cm a $3 \cdot 10^5$ cm	da $4.1 \cdot 10^{-10}$ eV a $1.24 \cdot 10^{-3}$ eV
Raggi infrarossi	da 0.78 μ m a 1000 μ m	da 0.00124 eV a 1.59 eV
Luce visibile	da 400 nm a 780 nm	da 1.59 eV a 3.10 eV
Raggi ultravioletti	da 100 nm a 400 nm	da 3.10 eV a 12.40 eV
Raggi X, γ	< 100 nm	> 12.40 eV

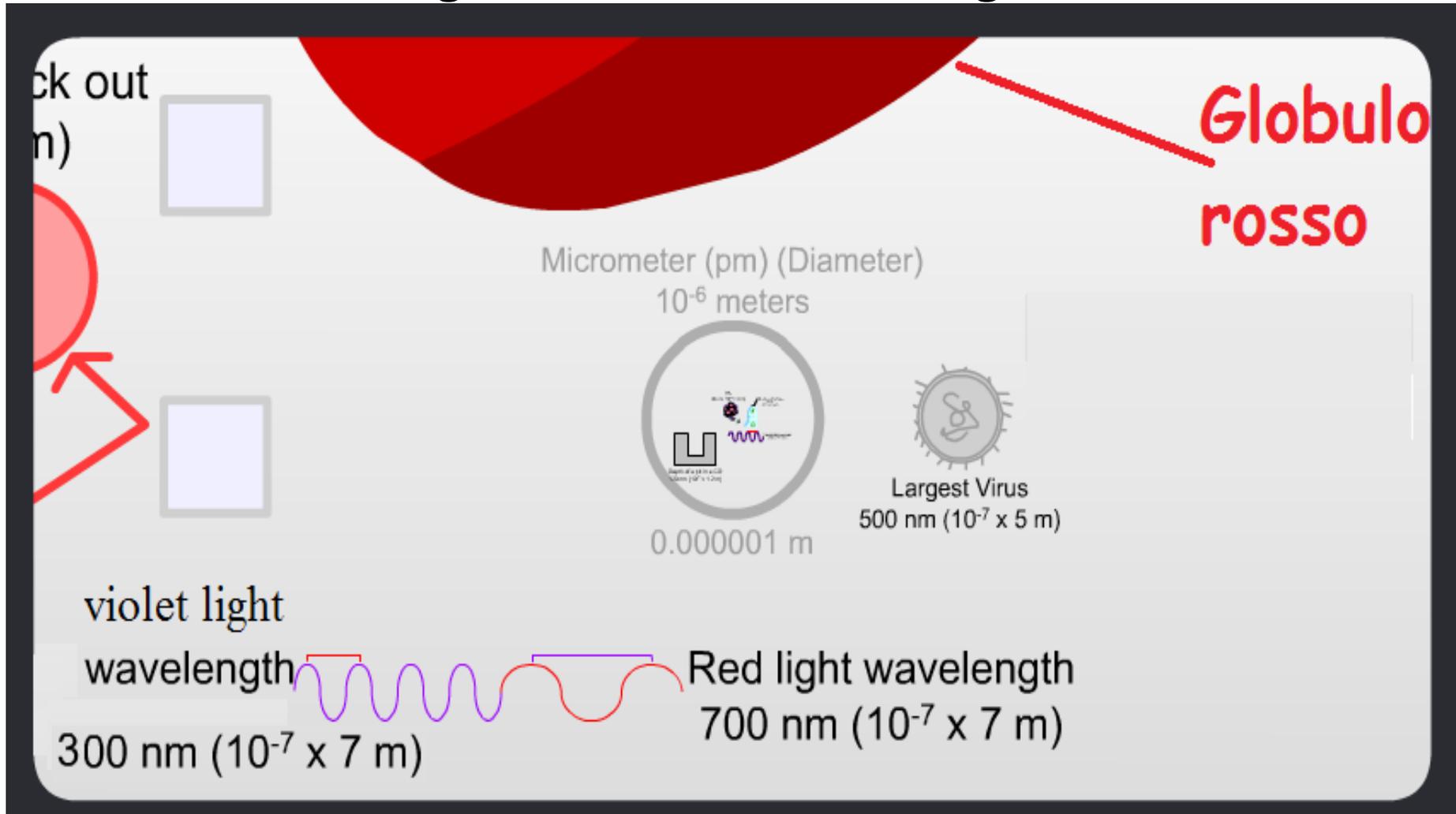
Quanto penetrano nel materiale?

Dipende (tra le altre cose) dalla lunghezza d'onda
(ossia dall'energia)..... l'ordine di grandezza è $\sim \lambda$



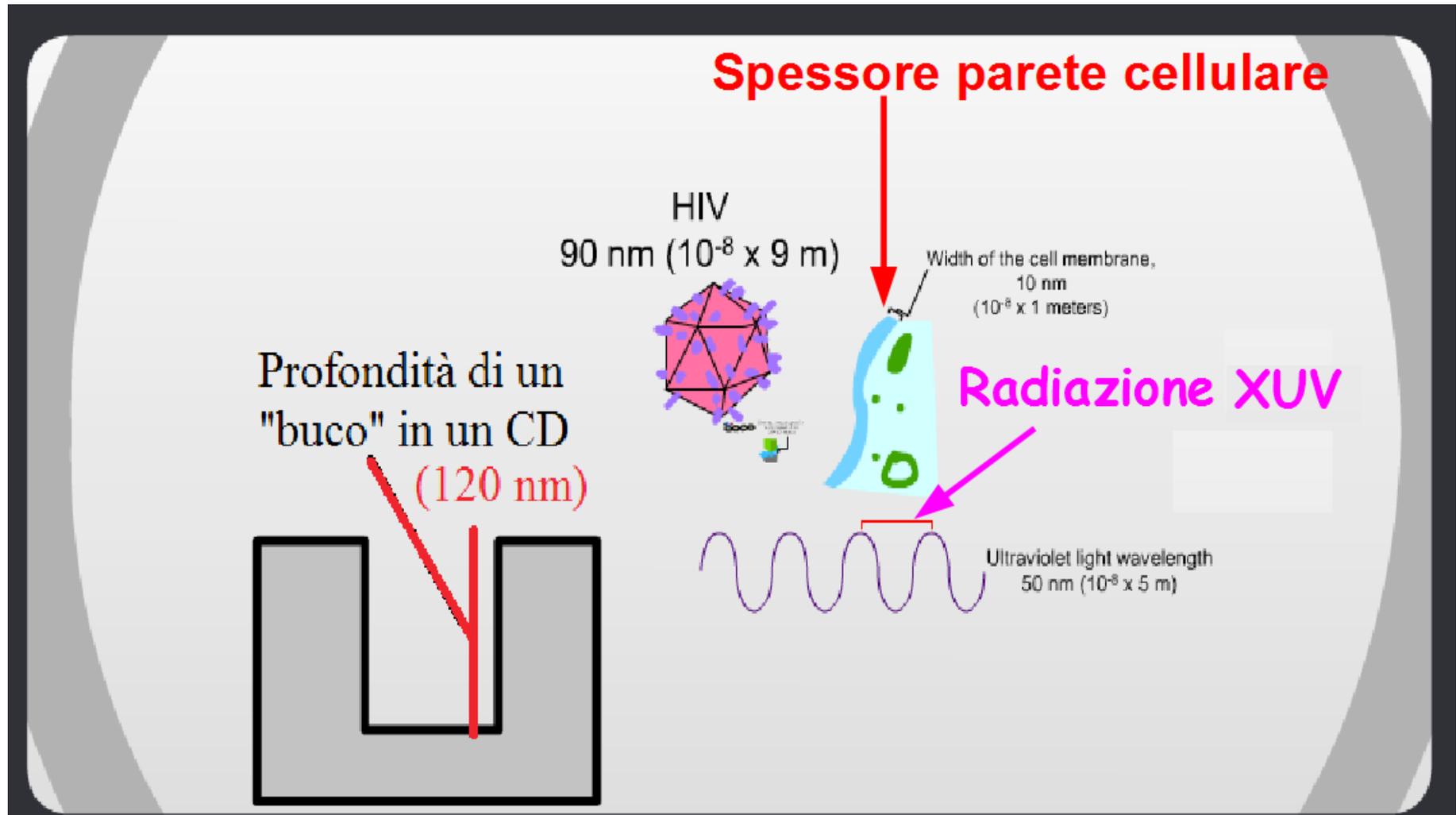
Quanto penetrano nel materiale?

Dipende (tra le altre cose) dalla lunghezza d'onda (ossia dall'energia)..... l'ordine di grandezza è $\sim \lambda$



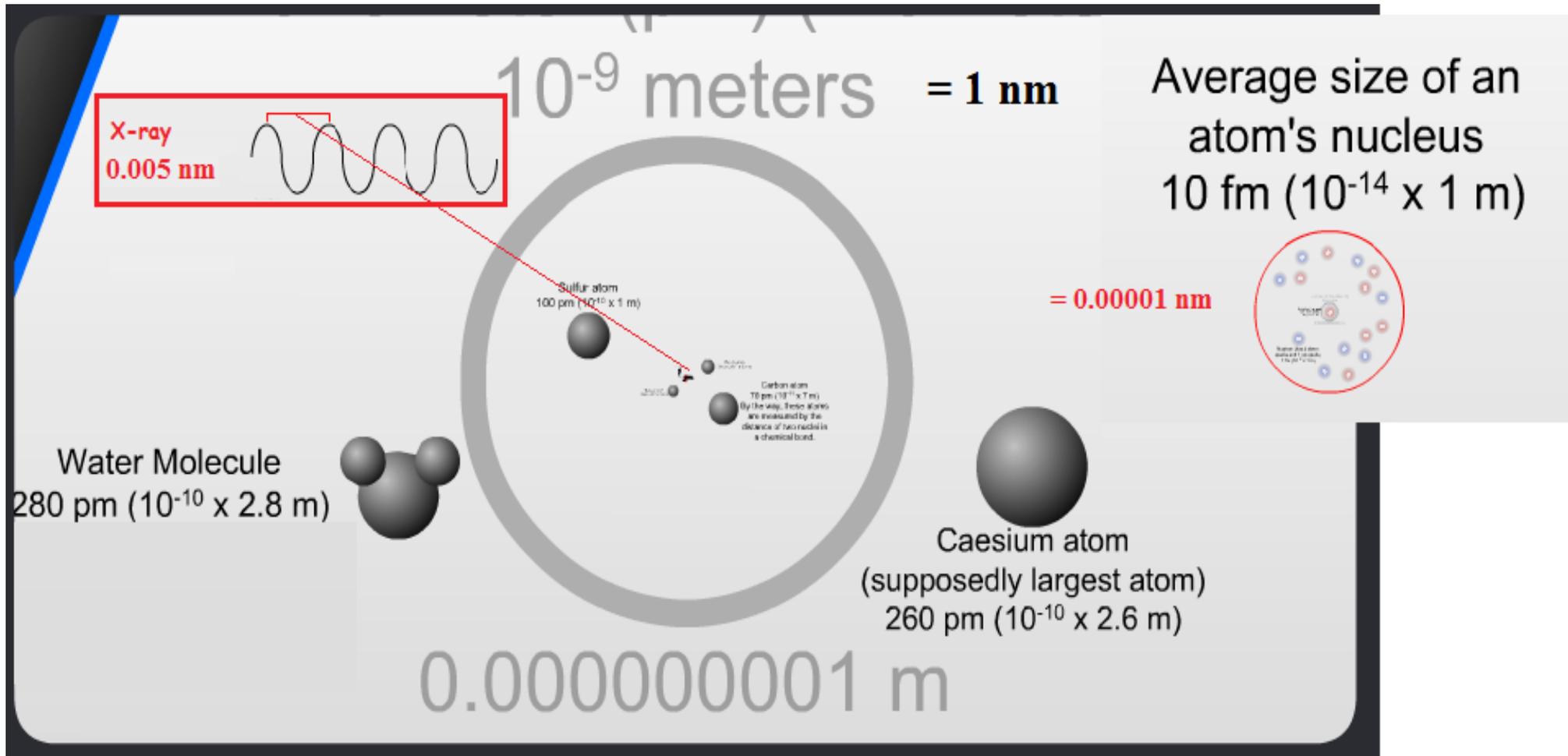
Quanto penetrano nel materiale?

Dipende (tra le altre cose) dalla lunghezza d'onda
(ossia dall'energia)..... l'ordine di grandezza è $\sim \lambda$

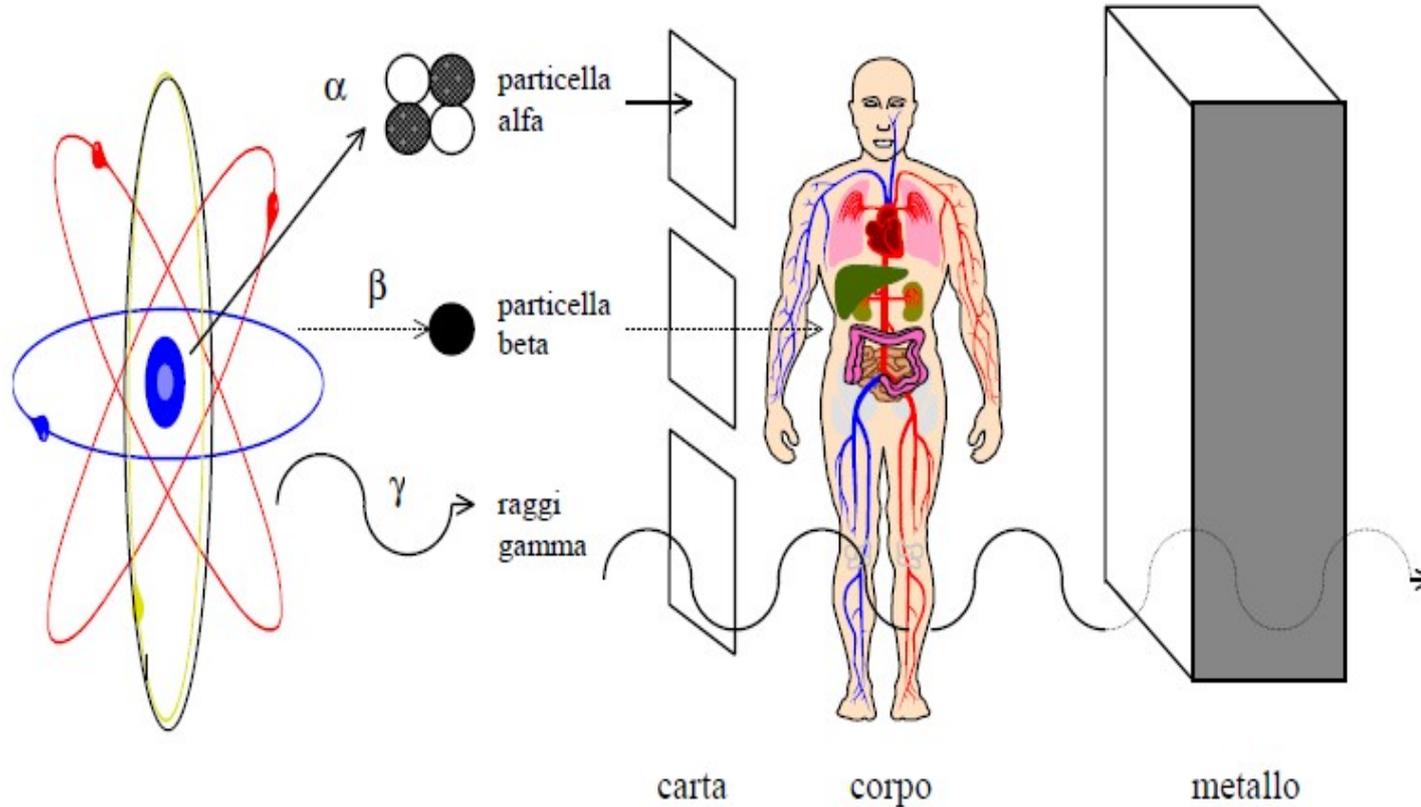


Quanto penetrano nel materiale?

Dipende (tra le altre cose) dalla lunghezza d'onda
(ossia dall'energia)..... l'ordine di grandezza è $\sim \lambda$



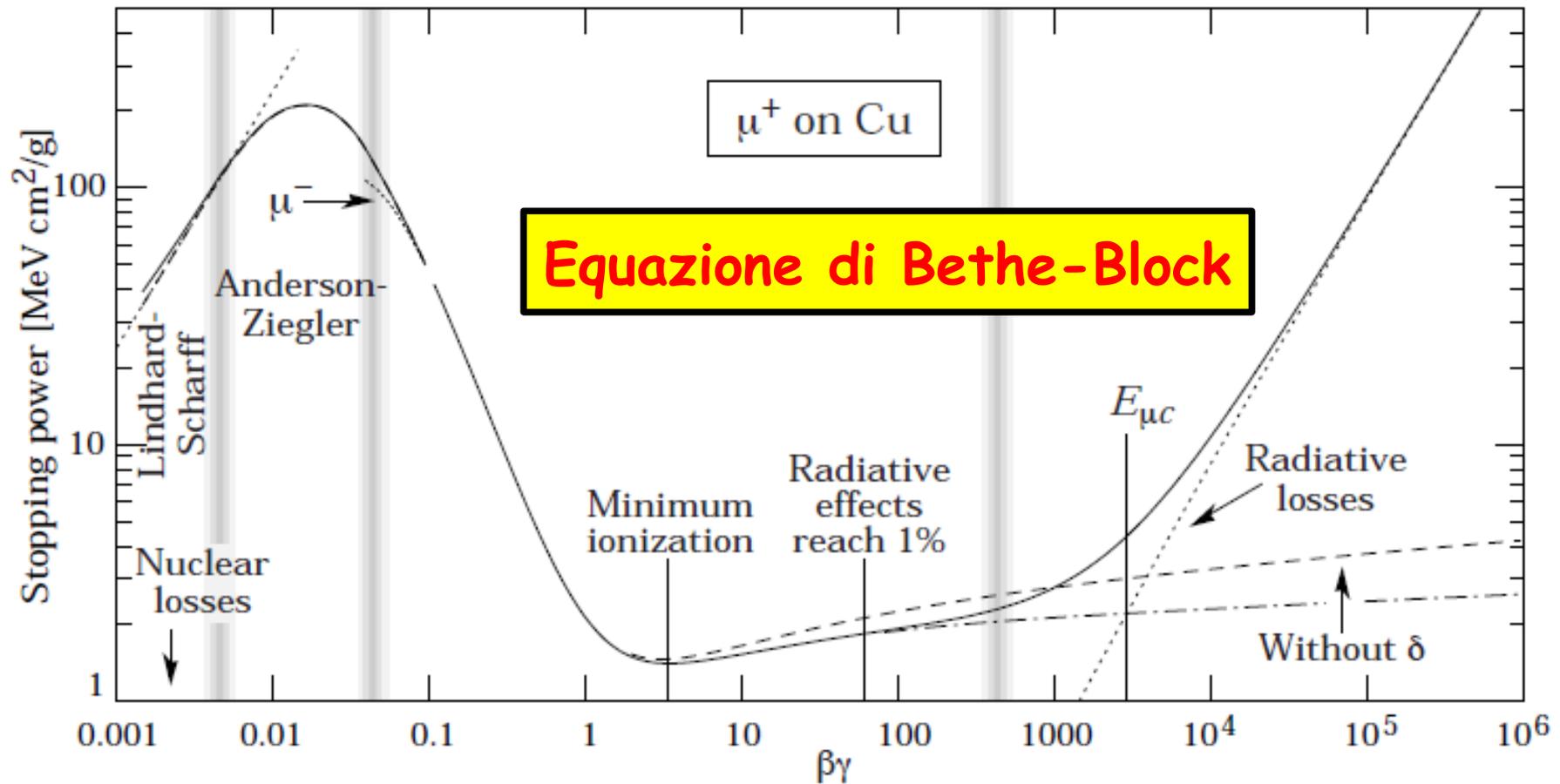
Quanto penetrano nel materiale?



Seguono le leggi di assorbimento.....

Quanto penetrano nel materiale?

Particelle cariche



$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Tipo di materiale

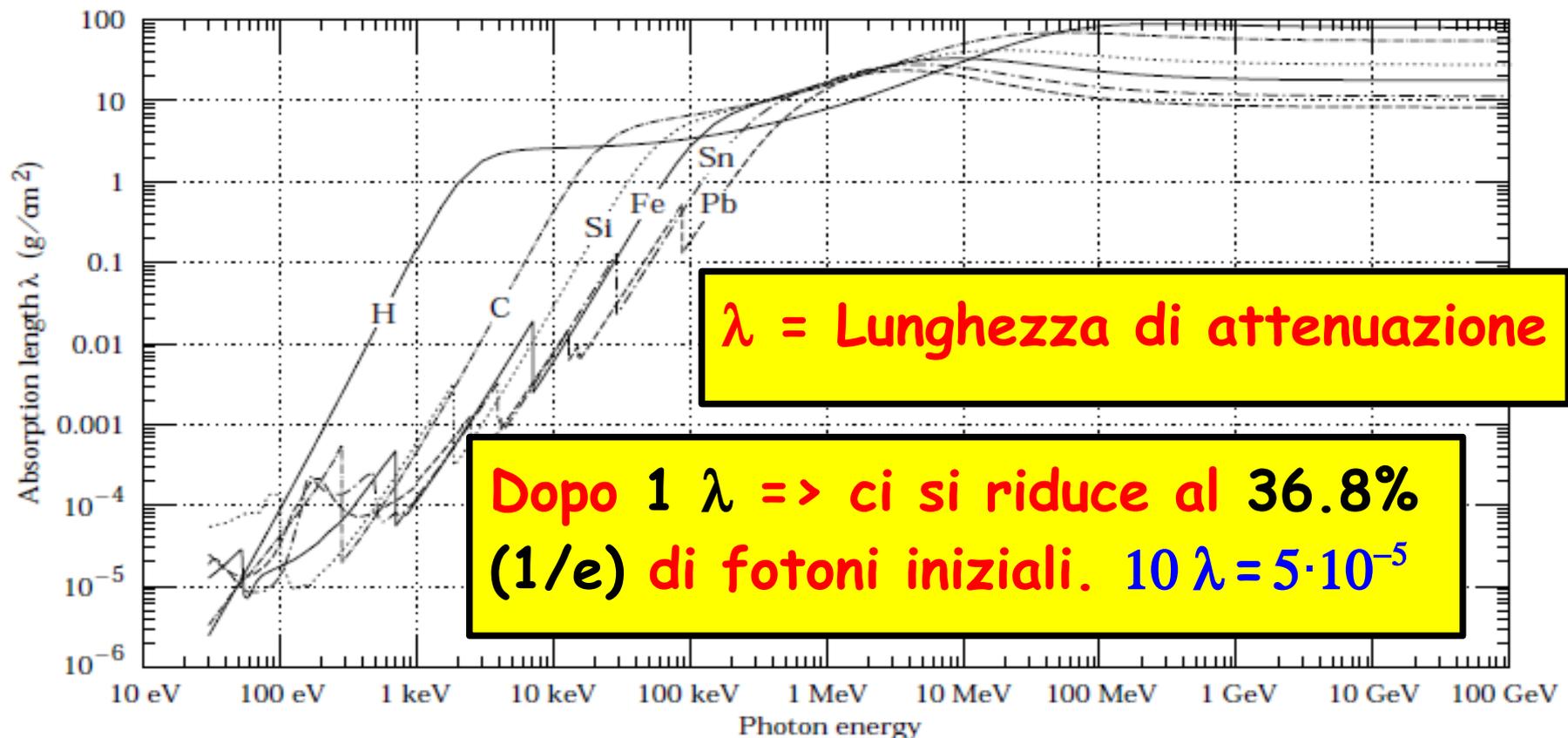
L. Servoli – Le Radiazioni Ionizzanti

Energia particella

Quanto penetrano nel materiale?

Legge di assorbimento esponenziale per **fotoni** in un materiale:

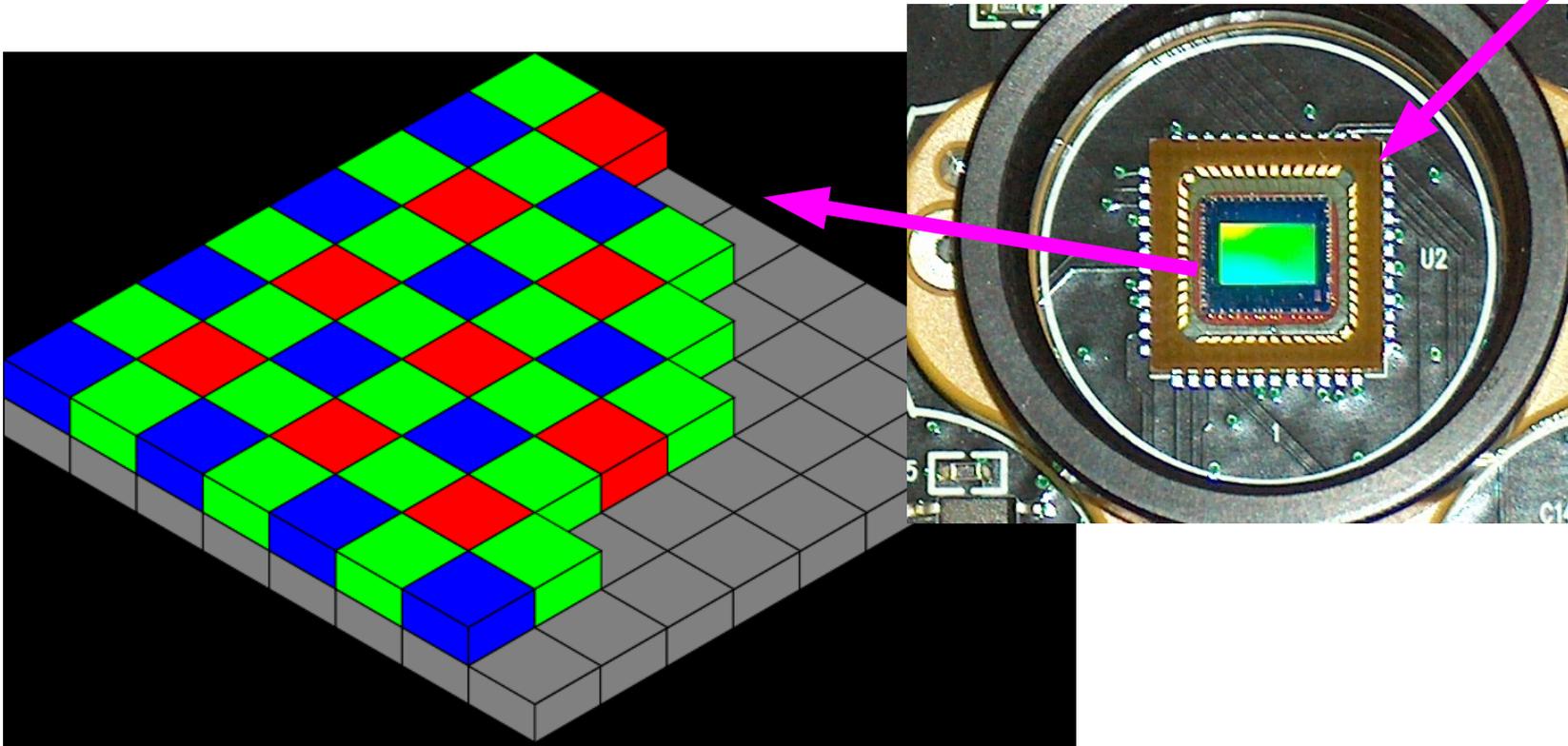
$$N_{\gamma} = N_{\gamma}(x=0) e^{(-x/\lambda)}$$



Le Radiazioni Ionizzanti si adoperano?

Si!!!! Lo fate tutti i giorni.....

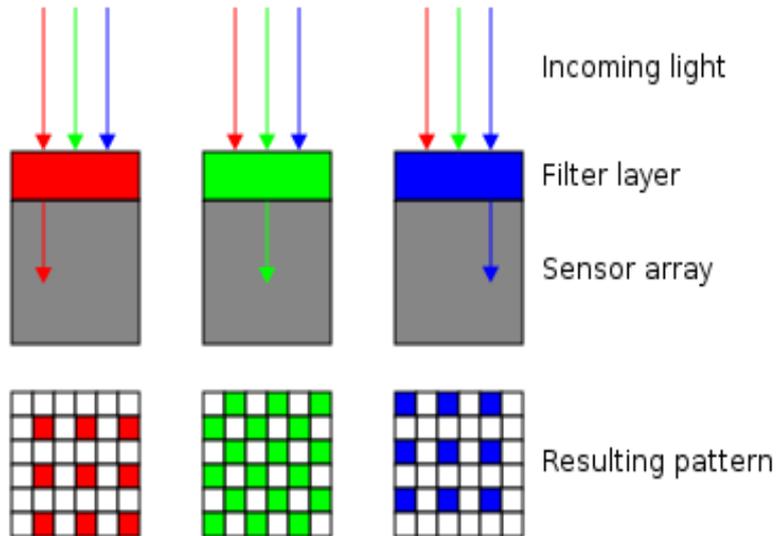
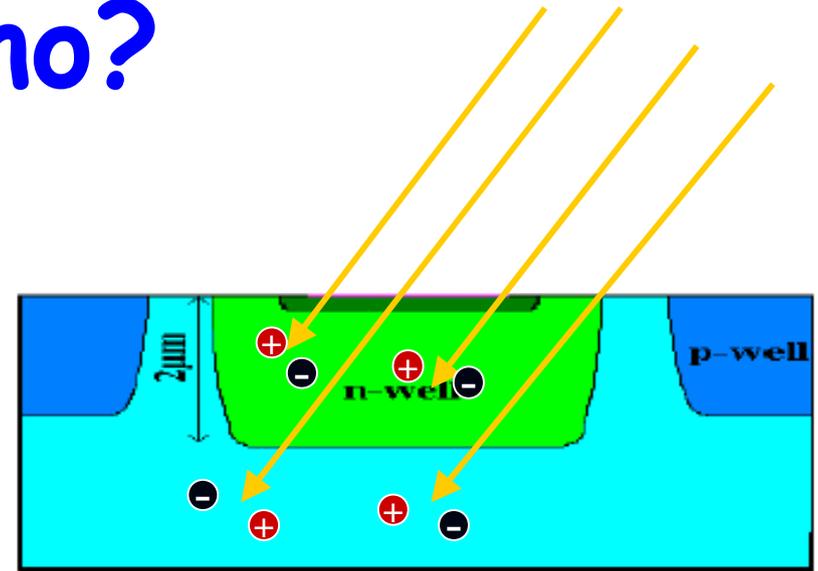
Es.: foto o filmati fatti col telefonino.....



Filtro Bayer: 50% verde, 25% rosso, 25% blu

Le Radiazioni Ionizzanti si adoperano?

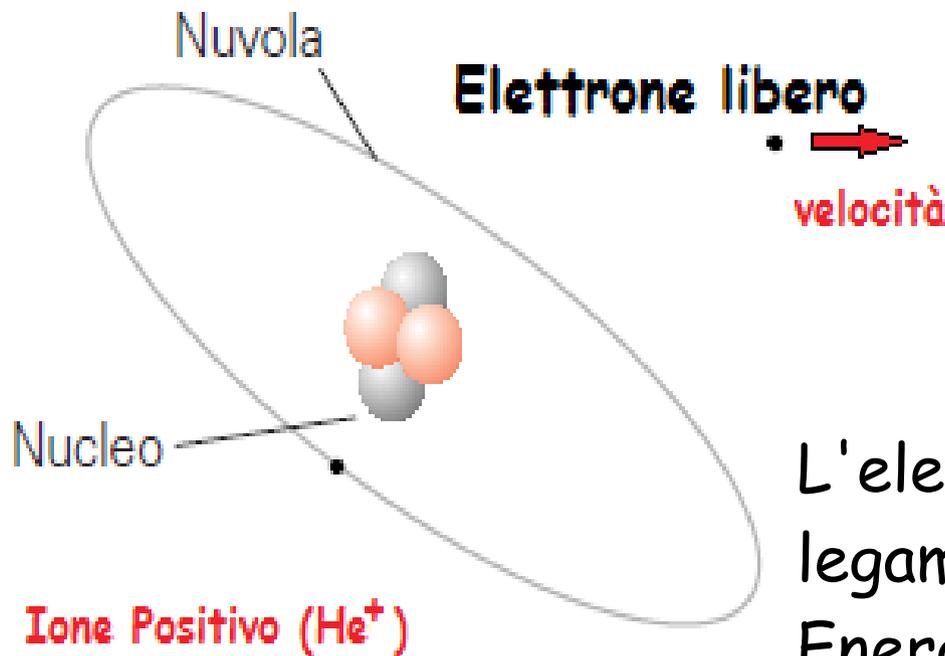
Si usa la luce visibile =>
1 fotone genera 1 elettrone nel
silicio; tanti fotoni su un solo
pixel generano una corrente
elettrica proporzionale alla
intensità luminosa.



La matrice di pixel è sensibile
selettivamente a diverse
componenti della luce
(RGB = Red, Green, Blue) e si
ricostruisce dopo il colore.

L'importanza dell'energia

L'energia è importante non solo per la penetrazione nel materiale.



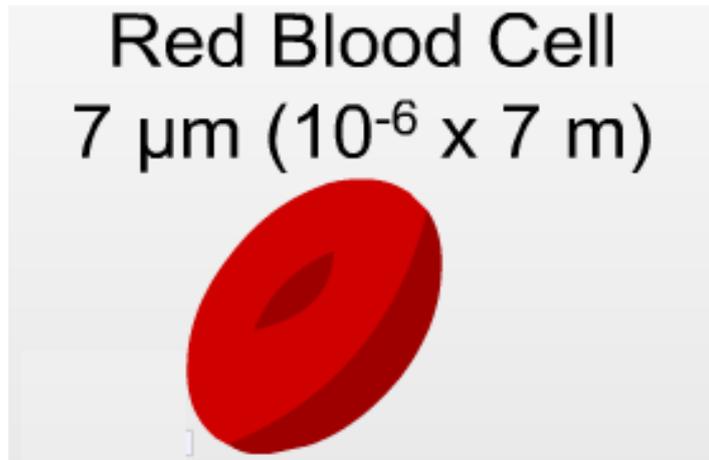
L'elettrone si porta via l'energia in eccesso rispetto a quella che serve per rompere il legame sotto forma di energia cinetica. (conservazione dell'energia)

L'elettrone muovendosi rompe altri legami perdendo progressivamente Energia.

Esempio: 1 fotone X da 6 keV produce circa 1700 rotture di legami all'interno di un pezzo di silicio, in un volume di circa $1 \mu\text{m}^3$.

L'importanza dell'energia

Supponiamo che invece il materiale sia biologico... tessuto umano.



**Stiamo modificando moltissimi legami
in un volume molto limitato.**

Qual'è l'effetto?

Si generano particolari composti chimici (**radicali liberi**) che se presenti in maniera squilibrata rispetto al normale fabbisogno dell'organismo possono generare alterazioni e danni.

Esempio: **danneggiamento del DNA ==> insorgenza di tumori.**

Meccanismi di alterazione dei radicali liberi



Non solo fotoni....

Anche particelle di altra natura possono ionizzare un materiale cedendo energia.

- Particelle cariche (elettroni, protoni, muoni....)
- Particelle neutre (neutroni)
- Frammenti di nucleo (deuterio, trizio, alfa,)

Meccanismi a volte leggermente diversi, ma che si traducono ***SEMPRE in un trasferimento di energia*** da quella cinetica della particella al materiale, sotto forma di ionizzazione e di vibrazione degli atomi.

Effetti su materia inanimata

*Se energia sufficientemente bassa (< 1 MeV) essenzialmente **danneggiamento della struttura cristallina** del materiale e/o alterazione delle proprietà chimiche del materiale (opacizzazione delle plastiche)*

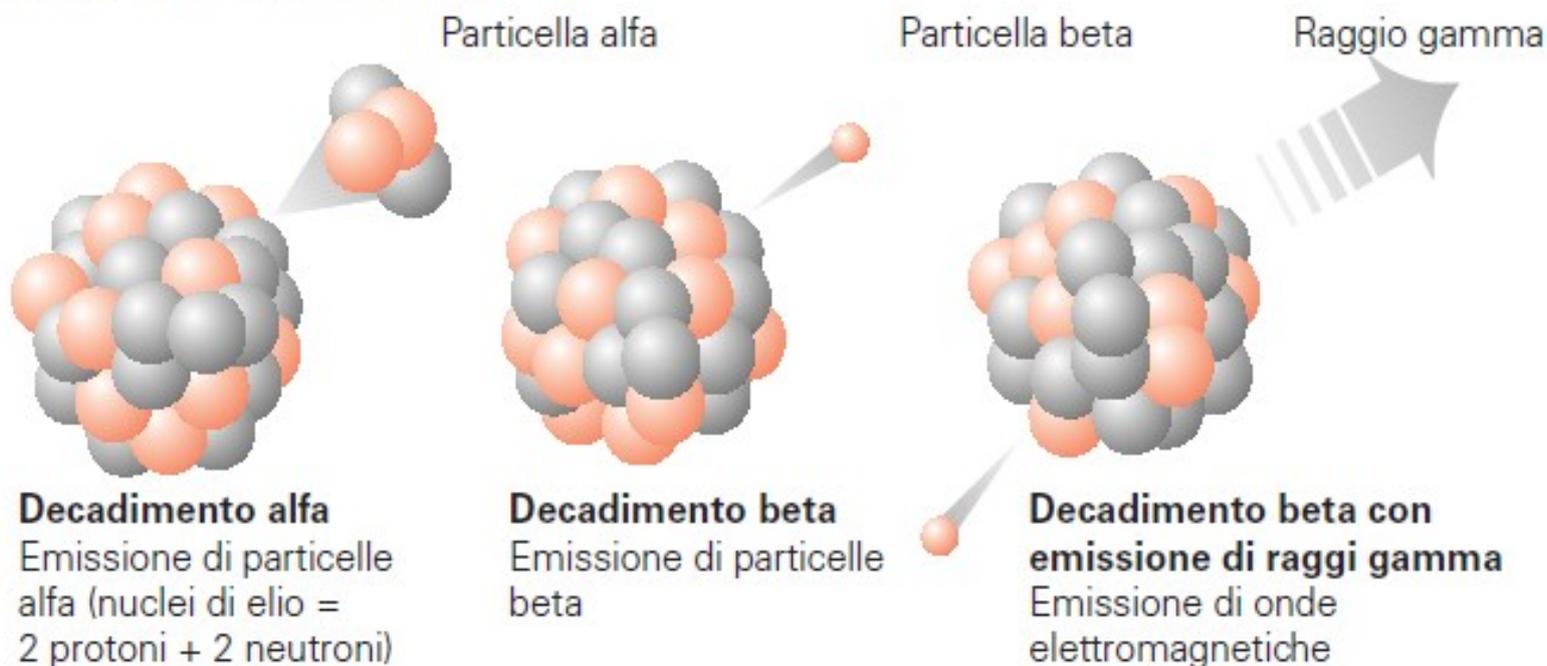
*Se energia sufficientemente alta (> 1 MeV) oltre al caso precedente è anche possibile la **formazione di radionuclidi**, tipicamente isotopi instabili provenienti dalla frammentazione dei nuclei già esistenti (fissione).*

Radionuclidi

Che cosa sono i radionuclidi?

Atomi con nuclei instabili che dopo un certo periodo di tempo emettono radiazione (alfa, beta o γ) eventualmente diventando un altro elemento.

Tipi di decadimento dei radionuclidi



Radionuclidi: attività

L'attività di una sorgente radioattiva è definibile come:

Il numero di disintegrazioni nucleari per unità di tempo (p. es. un secondo) definisce la radioattività di una sostanza. La sua unità di misura è il becquerel (Bq). 1 Bq corrisponde a una disintegrazione al secondo.

Disintegrazione di radionuclidi
1 Bq = 1 disintegrazione al secondo

La legge della disintegrazione

Non è possibile prevedere quando un nucleo radioattivo inizia a disintegrarsi. Si conosce invece il tempo necessario perché un elevato numero di nuclei di una sostanza radioattiva diminuisca della metà. Questo periodo, detto tempo di dimezzamento (fisico), è caratteristico di ogni radionuclide e oscilla tra poche frazioni di secondo e miliardi di anni.

Radionuclidi: dimezzamento

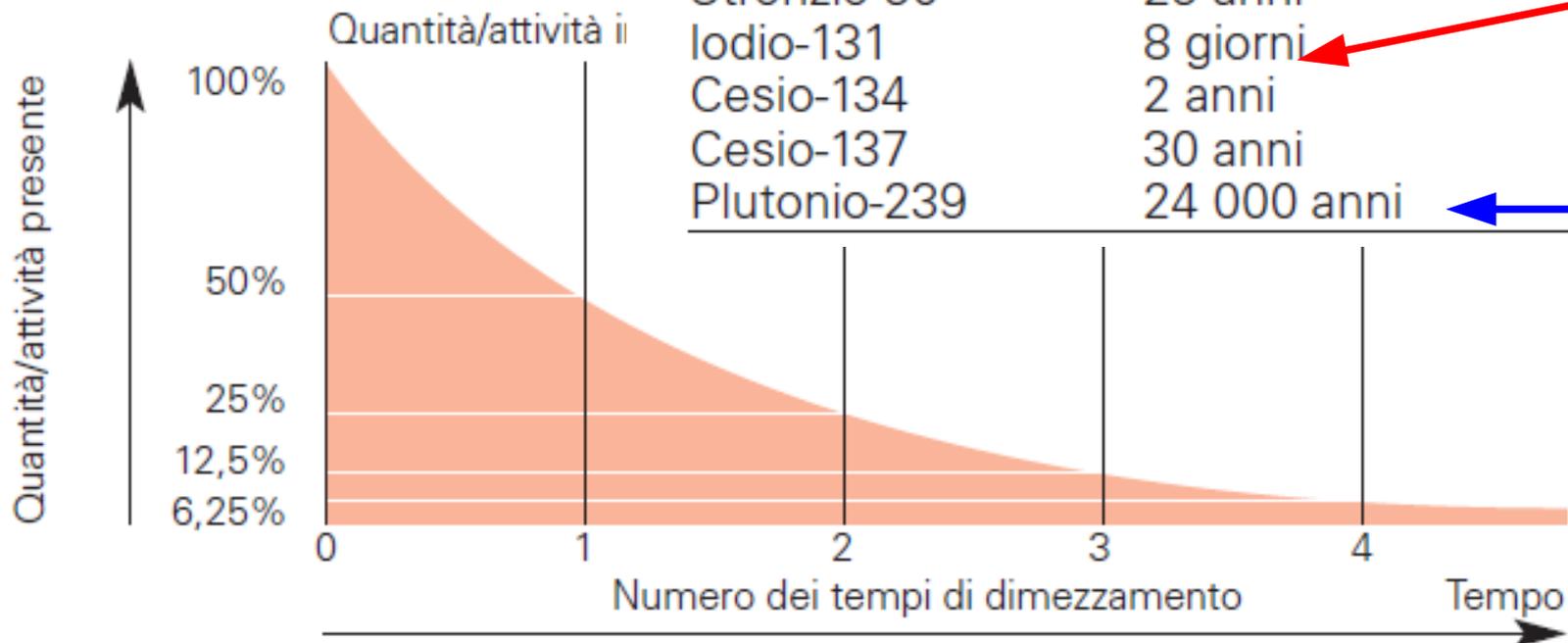
Esempi di radionuclidi e dei loro tempi di dimezzamento

Radionuclidi naturali

Carbonio-14	5730 anni
Potassio-40	1,3 miliardi di anni
Radon-222	3,8 giorni
Radio-226	1600 anni
Uranio-235	700 milioni di anni
Uranio-238	4,5 miliardi di anni

Radionuclidi artificiali

Stronzio-90	29 anni
Iodio-131	8 giorni
Cesio-134	2 anni
Cesio-137	30 anni
Plutonio-239	24 000 anni



Pericolosità dei radionuclidi



La pelle ci protegge dalla maggior parte dei danni....

Pericolosità dei radionuclidi

..... **MA** se la disintegrazione avviene all'interno i danni sono maggiori (potenzialmente) perché possiamo danneggiare cellule degli organi interni.

Esempi:

- Il corpo umano contiene potassio. Esso viene assunto con i cibi e poi eliminato dal corpo. Una piccola parte degli atomi di potassio è radioattiva: si tratta dell'isotopo potassio-40. La radioattività nel corpo umano è di ca. 5000 Bq: ciò significa che ogni secondo, nel nostro corpo, ca. 5000 nuclei di potassio-40 si disintegrano, emettendo raggi beta e gamma. In altre parole, subiamo per natura una radiazione interna.

La radioattività è presente nell'ambiente in modo naturale. Il nostro corpo, per esempio, contiene potassio-40 e l'aria che respiriamo contiene radon-222.

Pericolosità dei radionuclidi

Incidente ai reattori della centrale di Fukushima.

Problema:

la dispersione di polveri radioattive nell'aria, nell'acqua e nel suolo.



Perché? Perché gli atomi radioattivi possono entrare nel ciclo alimentare o fissarsi a micropolveri ed essere inalati e fissarsi all'interno del corpo umano.

Es. ^{131}I (iodio) che si fissa prevalentemente nella tiroide.

Sorgenti di radiazione ionizzante

- Raggi cosmici provenienti dallo spazio

Sono particelle cariche dai protoni ai nuclei fino al ferro, che interagiscono nell'atmosfera generando radiazione secondaria (raggi X, muoni, pioni, protoni, elettroni, neutroni, alfa)

- Sorgenti terrestri

Sono i prodotti dei decadimenti radioattivi degli atomi presenti sulla Terra (soprattutto potassio, uranio e torio). Producono essenzialmente radiazione gamma (fotoni con energia $> \text{MeV}$).

- Sorgenti artificiali

Tubi per raggi X, acceleratori di particelle cariche, macchine terapeutiche oncologiche, radionuclidi per protocolli medici, reattori nucleari, esplosioni di armi nucleari

Effetti: il concetto di dose

Gli effetti sull'uomo della esposizione a radiazioni ionizzanti vengono quantificati usando i concetti di **dose** e **dose efficace**.

- 1) si definisce la quantità di energia ceduta dalla radiazione ad un kg di massa; (unità di misura il Grey: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J}/1 \text{ kg}$)
- 2) si tiene conto del diverso tipo di danno legato alla diversa sorgente di radiazione ionizzante, attraverso un fattore moltiplicativo per ottenere **la dose**. Per i fotoni il fattore vale 1, per i neutroni 20. (unità di misura il Sievert: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J}/1 \text{ kg}$)
- 3) si tiene conto della maggiore o minore sensibilità dell'organo colpito a sviluppare un tumore e si calcola **la dose efficace**. (unità di misura il Sievert: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J}/1 \text{ kg}$).

Dose assorbita in un anno

A causa della esposizione a cause naturali (raggi cosmici, radioattività terrestre, etc.) ognuno assorbe in un anno una dose

Distribuzione per provenienza della dose media annua in Svizzera



1	Radiazione cosmica	0,35 mSv
2	Radiazione terrestre	0,45 mSv
3	Radiazione interna	0,4 mSv
4	Radon nelle abitazioni	1,6 mSv
5	Applicazioni mediche	1,2 mSv
6	Altre origini (fallout di bombe atomiche, Cernobyl, impianti nucleari, industrie e ospedali, sorgenti minori)	0,2 mSv
<hr/>		
Totale		4,2 mSv

Dosi assorbite per attività mediche

Esposizione alle radiazioni	Esempi di esami radiodiagnostici	Dose efficace
Molto bassa	Singoli denti, mano, gomito, piede, ginocchio	ca. 0,01 mSv (0,003–0,03)
Bassa	Scatola cranica, polmoni, anche	ca. 0,1 mSv (0,03–0,3)
Media	Bacino, ventre, colonna vertebrale, seno, tomografia computerizzata della testa e del collo	ca. 1 mSv (0,3–3)
Alta	Tomografia computerizzata della colonna vertebrale, del ventre o del bacino; angiografie; esami radiodiagnostici con mezzi di contrasto di reni, vie urinarie efferenti e apparato gastrointestinale	ca. 10 mSv (3–30)

Limiti sulla esposizione

Per i lavoratori esposti detti limiti sono:

- 20 mSv/anno per la dose efficace;
- 150 mSv/anno per la dose equivalente al cristallino;
- 500 mSv/anno per la dose equivalente alla pelle;
- 500 mSv/anno per la dose equivalente a mani, avambracci, piedi, caviglie.

Per i lavoratori non esposti e per le persone del pubblico:

- 1 mSv/anno per la dose efficace;
- 15 mSv/anno per la dose equivalente al cristallino;
- 50 mSv/anno per la dose equivalente alla pelle.

LE FASI DEI PROCESSI DI INTERAZIONE TRA RADIAZIONE E TESSUTI BIOLOGICI

FASE	TEMPO	EFFETTO
Fisica	10^{-13} secondi	ionizzazione-eccitazione
Fisico-chimica	10^{-9} - 10^{-6} secondi	formazione di radicali liberi
Biochimica	frazioni di secondi - settimane	inattivazione enzimi e organuli cellulari
Biologica	giorni-mesi-anni	inattivazione, riparazione, morte cellulare e tissutale
Clinica	giorni- mesi- anni	manifestazioni cliniche a carico dell'organismo

Effetti sul DNA

- *Le cellule subiscono un danneggiamento del DNA e sono capaci di localizzare e riparare il danno.*
- *Le cellule subiscono un danneggiamento del DNA e sono incapaci di localizzare e riparare il danno. Le cellule muoiono attraverso il meccanismo della "morte cellulare programmata" o **apoptosi**. L'organismo non subisce ulteriori danni.*
- *Le cellule subiscono una mutazione non-letale del DNA che è passata alle generazioni successive attraverso il meccanismo della replicazione cellulare. Questo meccanismo può contribuire all'insorgenza di un tumore.*
- *Le cellule subiscono un danneggiamento non-riparabile del DNA che porta alla replicazione e all'insorgenza di un tumore.*

Non ci sono solo aspetti negativi

Le radiazioni ionizzanti vengono usate dall'uomo in vari settori:

- 1a) settore medicale: **imaging per diagnostica;**
- 1b) settore medicale: **terapie oncologiche;**

- 2a) settore industriale: **imaging di manufatti;**
- 2b) settore industriale: **tecniche di sterilizzazione;**
- 2c) settore industriale: **produzione di energia;**

- 3) settore sicurezza: **scanner negli aeroporti;**

- 4) settore beni culturali: **analisi non distruttiva di manufatti**

- 5) settore forze armate: **armi atomiche (e non solo...)**

Settore industriale

Ci sono alcuni processi che necessitano di **tecniche di sterilizzazione**, quali quelli relativi a cibi e sementi, oppure quelli relativi al confezionamento di strumenti chirurgici.

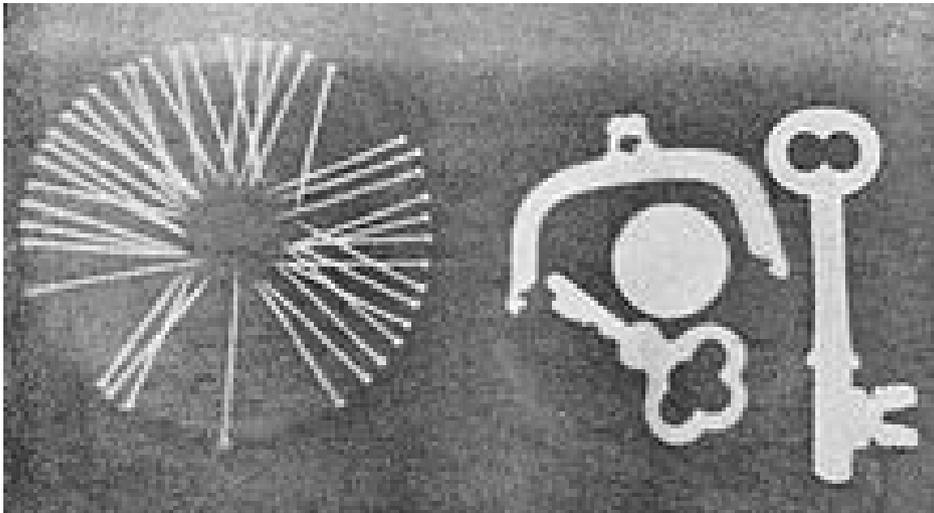
Le radiazioni ionizzanti, proprio per la loro capacità di danneggiare e distruggere cellule, possono essere impiegati per irraggiare un materiale e distruggere eventuali batteri e virus presenti.

Es. strumenti chirurgici, siringhe, etc.

Si usano: **sorgenti UV intense, raggi X, raggi γ .**

Settore industriale

L'**imaging** si basa sulla illuminazione omogenea di un bersaglio, l'assorbimento differenziale dei fotoni a seconda del materiale attraversato, la rivelazione dei fotoni uscenti dal materiale.



Radiografia di materiali metallici

Si usano: raggi-X e γ

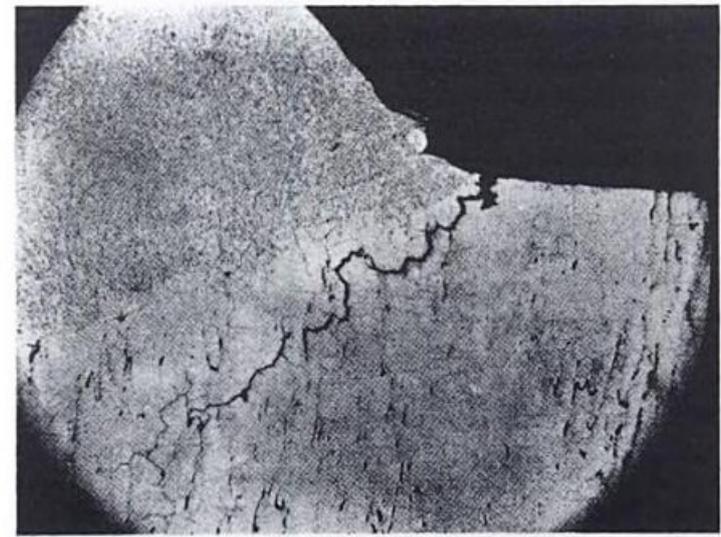


Fig. 17.8 — Cricatura originata presso la base della saldatura, da trattamento termico

Frattura in una saldatura.

IL problema dell'Imaging medicale

Come ottenere una immagine ben definita impartendo la minima dose di radiazione ionizzante?

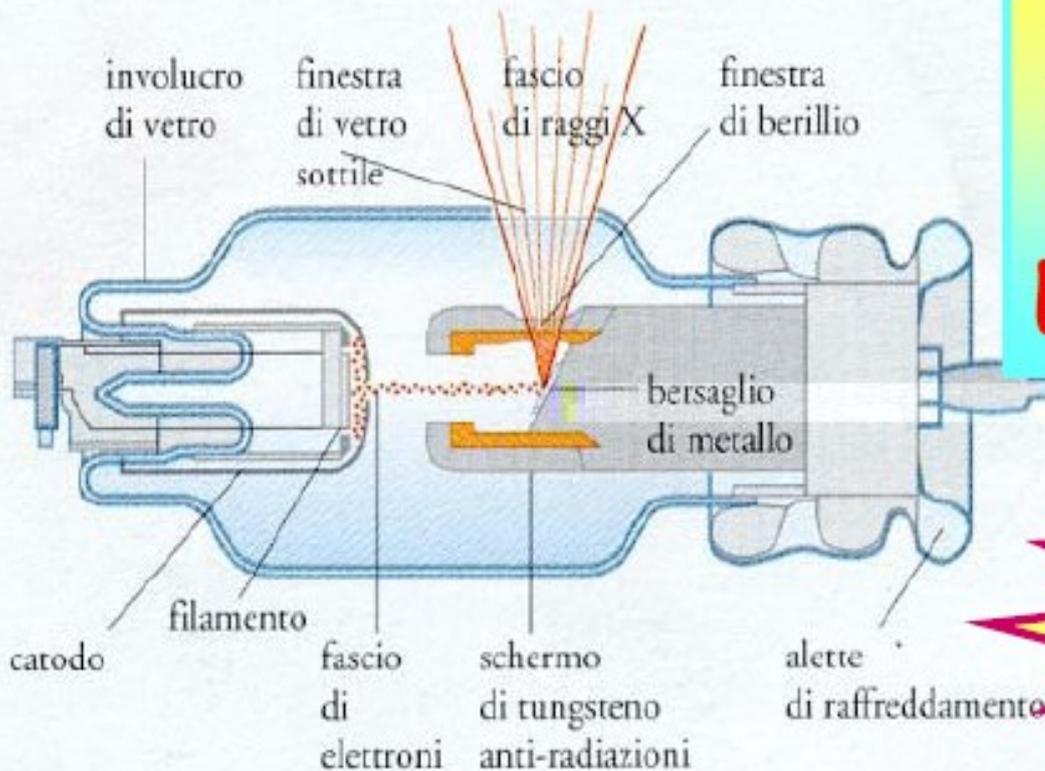


Prima radiografia eseguita da Roentgen alla mano della moglie.

L'immagine del corpo da studiare viene realizzata misurando l'attenuazione di un fascio di raggi X o γ che lo attraversa.

Questa varia in modo proporzionale alla densità elettronica dei tessuti attraversati, cioè alla distribuzione spaziale degli elettroni nello strato corporeo in esame.

Generazione di raggi X: Tubo-X



Energia degli elettroni
nel moto accelerato dalla d.d.p.
dal catodo all'anodo/anticatodo

$$E = T = \frac{1}{2}m_e v^2 = e\Delta V$$

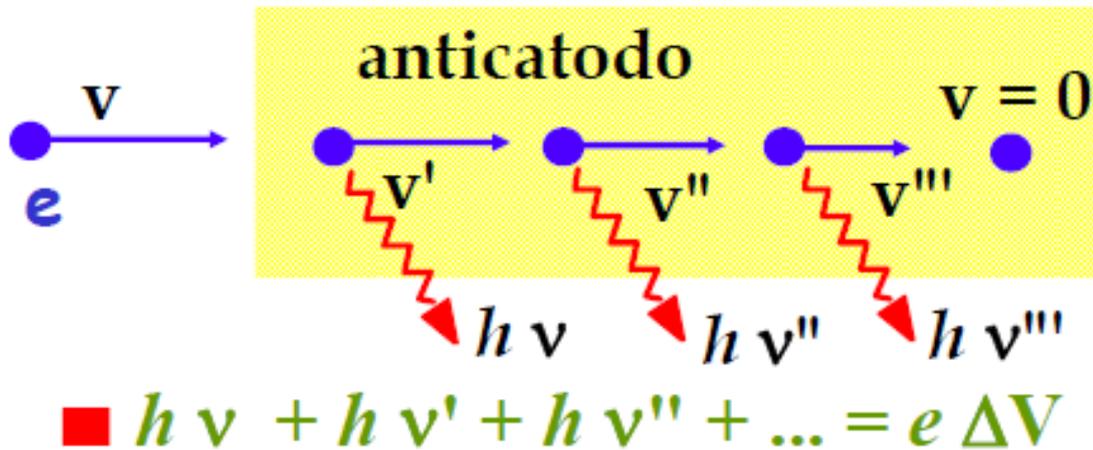
è l'energia totale massima
messa in gioco nel processo

Con questa energia gli elettroni urtano contro l'anticatodo di tungsteno e interagiscono (\rightarrow perdono energia) con la materia secondo i consueti processi (\rightarrow interaz. radiazione-materia)

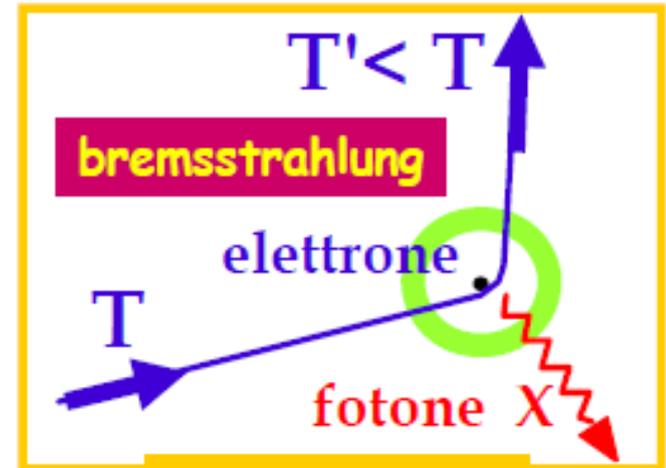
Generazione di raggi X: Turbo-X

Emissione di frenamento (bremsstrahlung)

Nell'attraversare gli atomi di anticatodo, l'elettrone diminuisce gradualmente la sua energia cinetica, emettendo fotoni di energia sempre minore.



Energia massima
dei raggi X emessi con una d.d.p. ΔV :



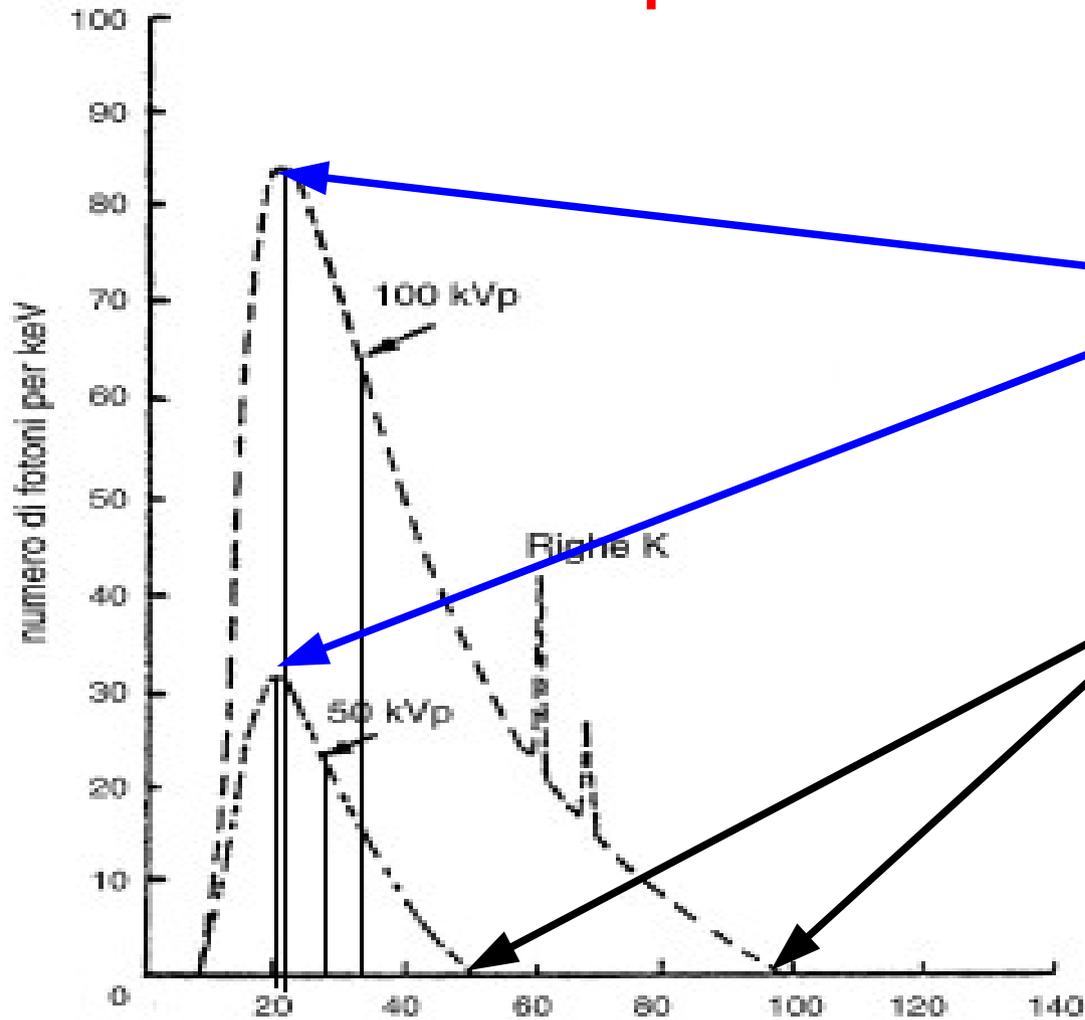
$$T - T' = h\nu$$

Se fosse emesso un unico fotone, la sua energia sarebbe:

$$e\Delta V = h\nu_{\max}$$

Generazione di raggi X: Turbo-X

Spettro di emissione



Massima probabilità di trovare un fotone di una data energia

Endpoint: massima energia del fotone emesso

Figura V-13: Spettro in funzione della tensione.

no i raggi X e γ ?

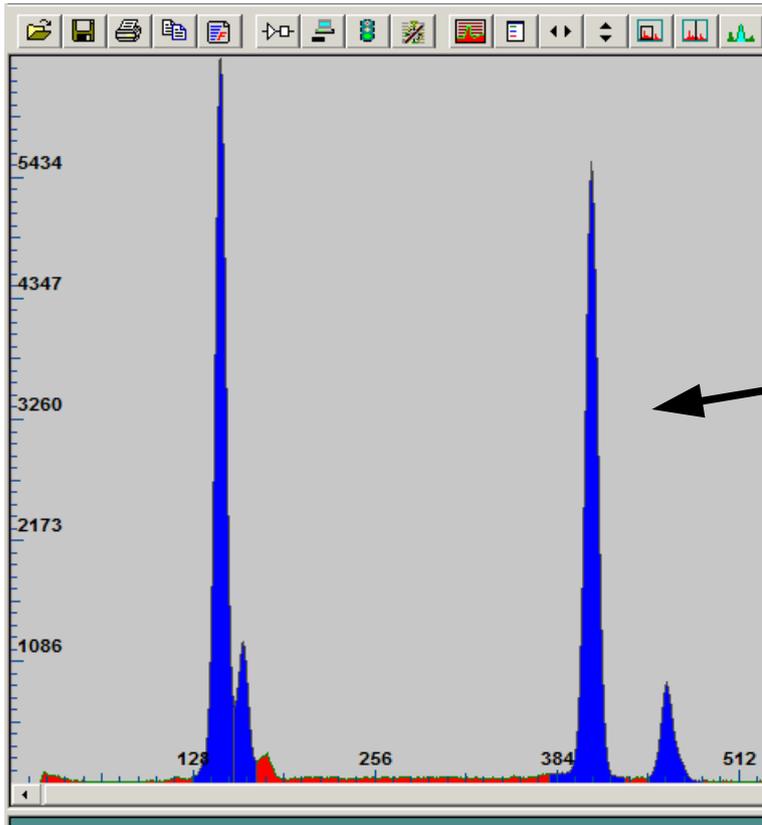
ale al
aging)



2) Rivelatori a cristalli. Il fotone produce una cascata di fotoni e elettroni, proporzionale alla sua energia, che generano luce visibile, che viene raccolta da contatori di singolo fotone. (soprattutto per fotoni molto energetici > 100 keV)

← Immagine da produzione interna di fotoni (decadimento di radioisotopi)

Come si rivelano i raggi X?



3) Rivelatori a stato solido (Silicio, Arseniuro di Gallio, etc.):

La ionizzazione è proporzionale alla energia del singolo fotone. **Misura di precisione dell'energia**

o **imaging** (rivelatori a pixel)

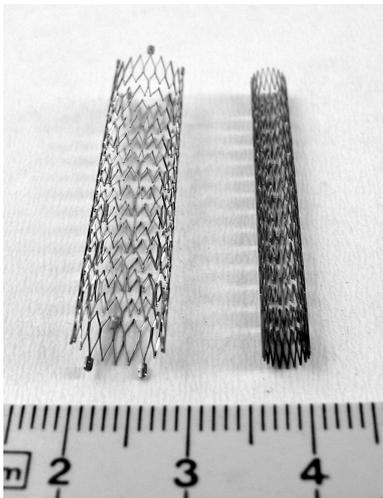


Es.: Radiologia Interventistica

Indicazioni cliniche

- ☢ Aneurismi dell'aorta addominale ed endoprotesi
- ☢ Coronarografie, PTCA
- ☢ Steno-ostruzioni e ricanalizzazioni arteriose

Stent vascolari



Posizionamento nella regione interessata all'intervento

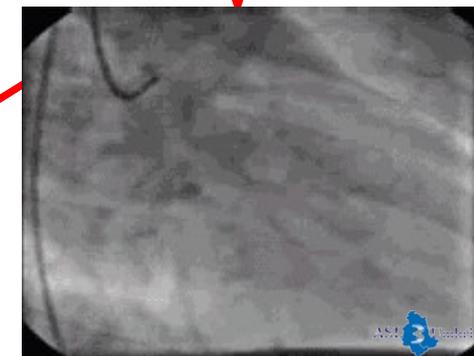
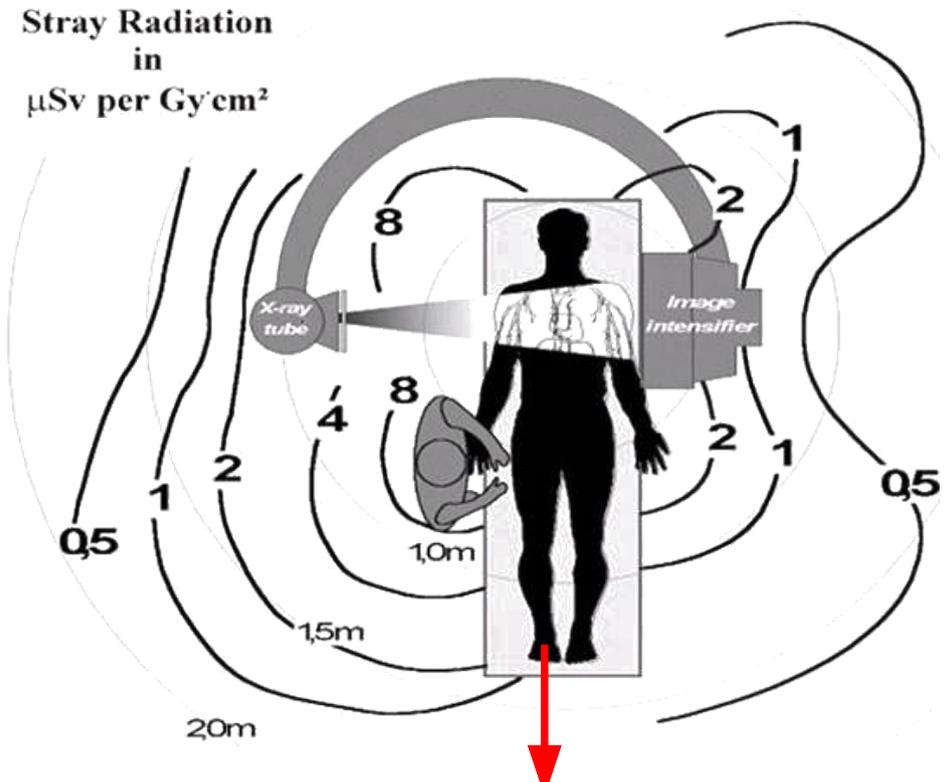


Immagine dei vasi

Settore medicale: lotta ai tumori

Le radiazioni ionizzanti aiutano moltissimo nella cura dei tumori:

- **DIAGNOSI:** permette di scoprire il tumore ad uno stadio precoce consentendo quindi una cura efficace.
- **TERAPIA:** consente di curare molti tipi di tumore, cercando il più possibile di risparmiare i tessuti sani.

Esempi:

- Tumore alla mammella: 85% di casi curabili oggi;
- Tumore alla prostata: 65% di casi curabili oggi;

IL problema della radioterapia

Come risparmiare i tessuti sani e distruggere quelli tumorali?

Ossia: minimizzare la dose impartita ai tessuti sani, e soprattutto agli organi adiacenti alla zona tumorale, e come massimizzare l'efficacia della dose impartita alla massa tumorale.

Come portare la radiazione sul tessuto tumorale?

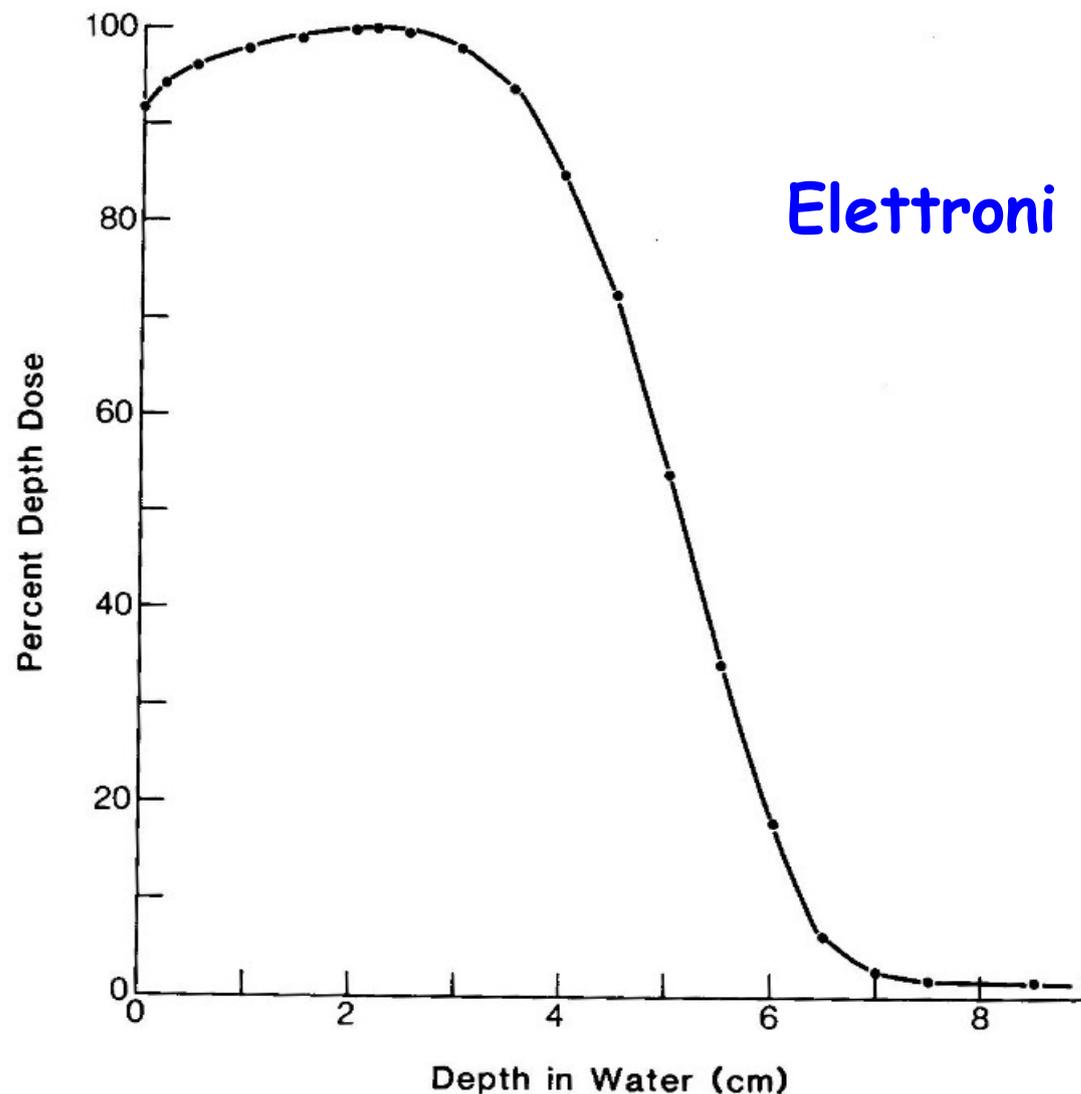
La deposizione in energia dei vari fasci terapeutici dipende dal tipo di radiazione ionizzante e dalla sua energia.

IL problema della radioterapia

La deposizione in energia dei vari fasci terapeutici dipende dal tipo di radiazione ionizzante e dalla sua energia.

Gli elettroni penetrano poco (qualche cm) e poi decrescono rapidamente, quindi non sono adatti per raggiungere zone in profondità.

Gli elettroni sono abbastanza facili da produrre!!!



Terapia oncologica IORT

Radioterapia Intraoperatoria :

- si esegue una incisione nel corpo del paziente in modo da esporre la massa tumorale;
- si punta l'acceleratore con il fascio di elettroni collimato sulla zona da colpire;
- gli elettroni penetrano fino ad un certo punto nel corpo del paziente (scegliendo opportunamente la loro energia).

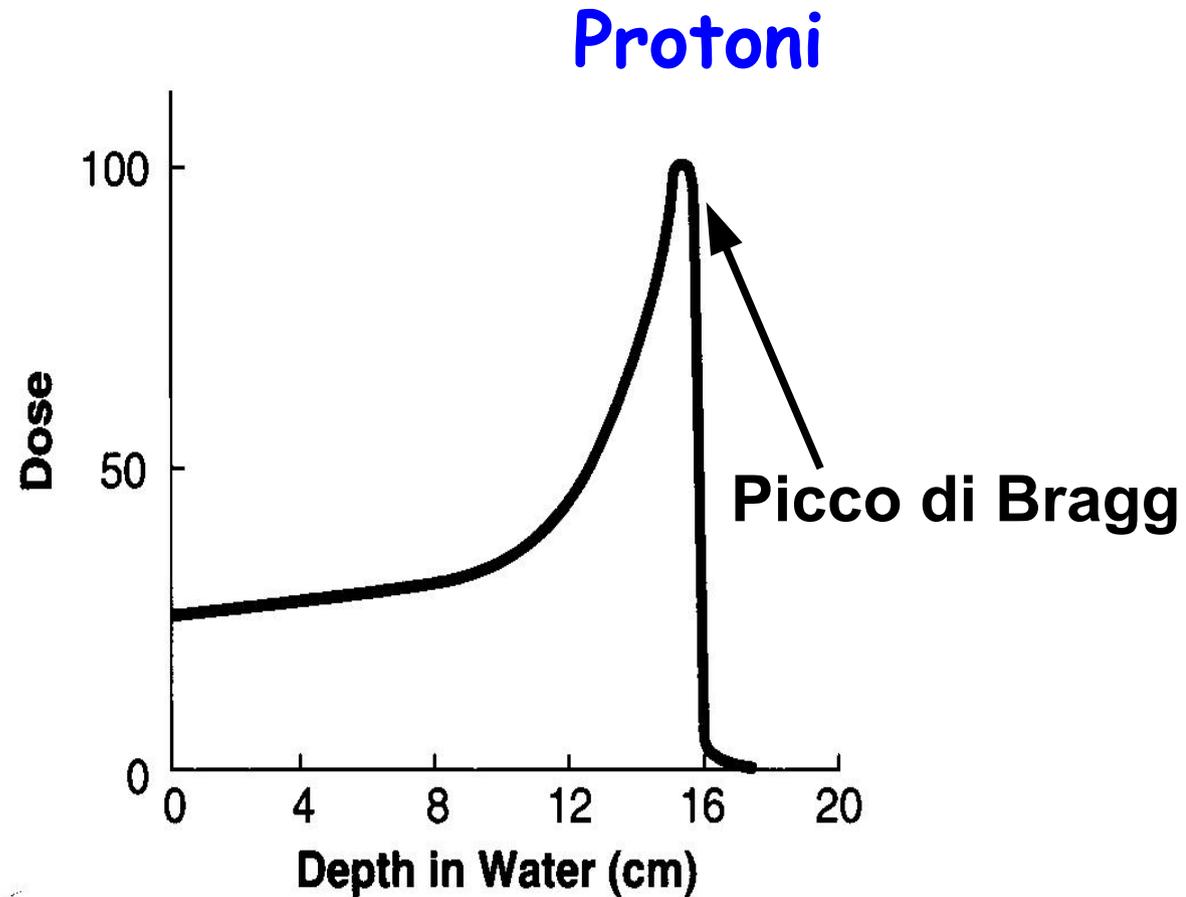
E quindi vengono risparmiati i tessuti confinanti col tumore.



IL problema della radioterapia

I protoni (e ancor più gli ioni pesanti) rilasciano poca energia nella prima parte della interazione con la materia, poi invece molto rapidamente perdono tutta la loro energia in poco spazio (qualche mm).

Sono adatti per terapie in profondità



I protoni sono più difficili degli elettroni da produrre e accelerare
Gli ioni pesanti molto molto di più.

Es.: Terapia del melanoma oculare

Melanoma della coroide: si localizza nel bulbo oculare, o, più precisamente nella membrana che copre il retro del bulbo oculare.

Si utilizza un fascio di protoni di media energia (62 MeV) che hanno il picco di Bragg alla distanza giusta perché l'energia venga rilasciata dove si situa il tumore, risparmiando il più possibile il resto del bulbo oculare.

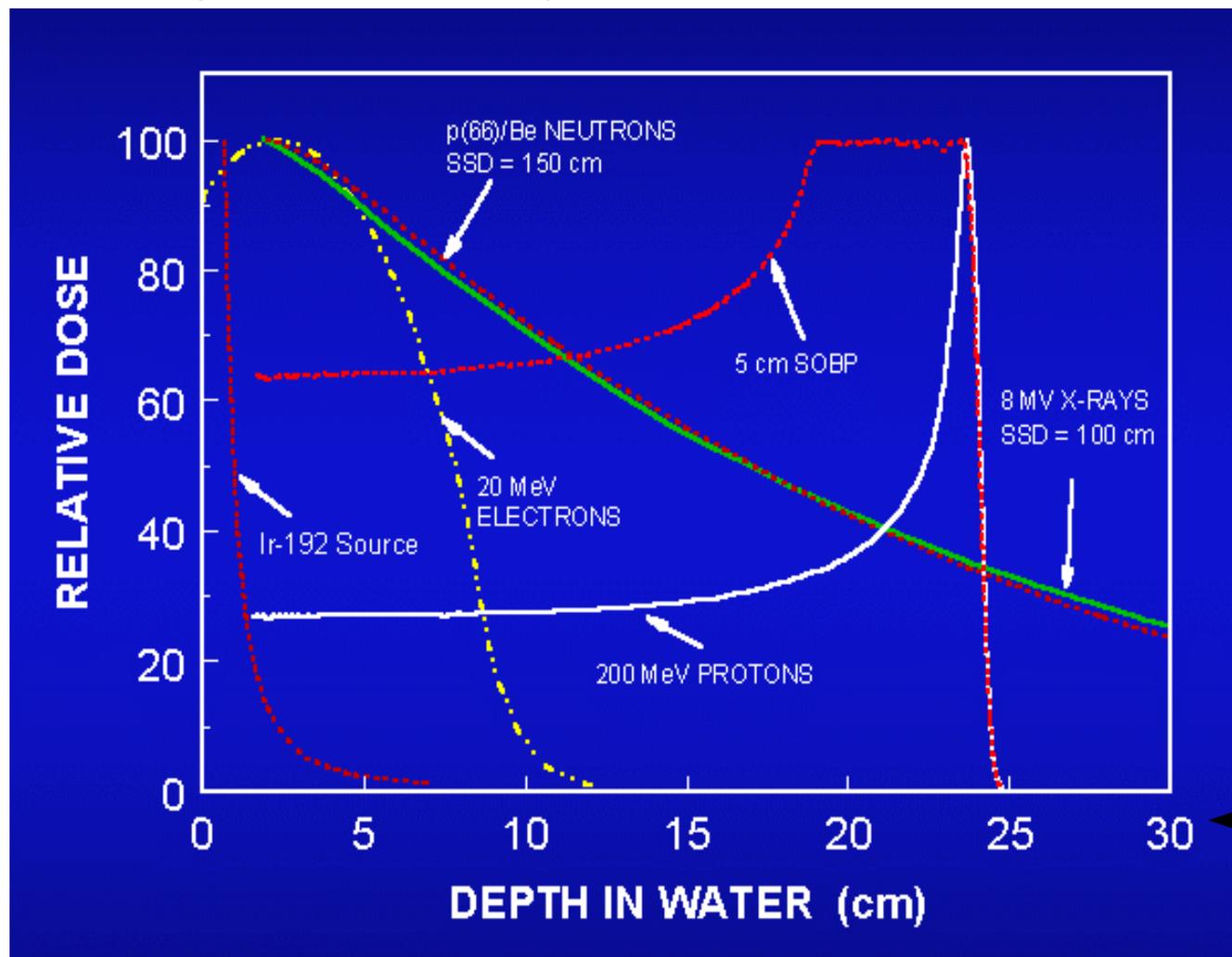
In Italia esiste un solo centro a Catania in collaborazione tra Ospedale, Università e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (che ha costruito ed opera l'acceleratore per i protoni).

300 pazienti trattati finora.

Nuovo centro a Pavia (CNAO): a settembre primi pazienti

IL problema della radioterapia

Fotoni: hanno un massimo di assorbimento nella prima parte del corpo umano e poi decrescono abbastanza lentamente.



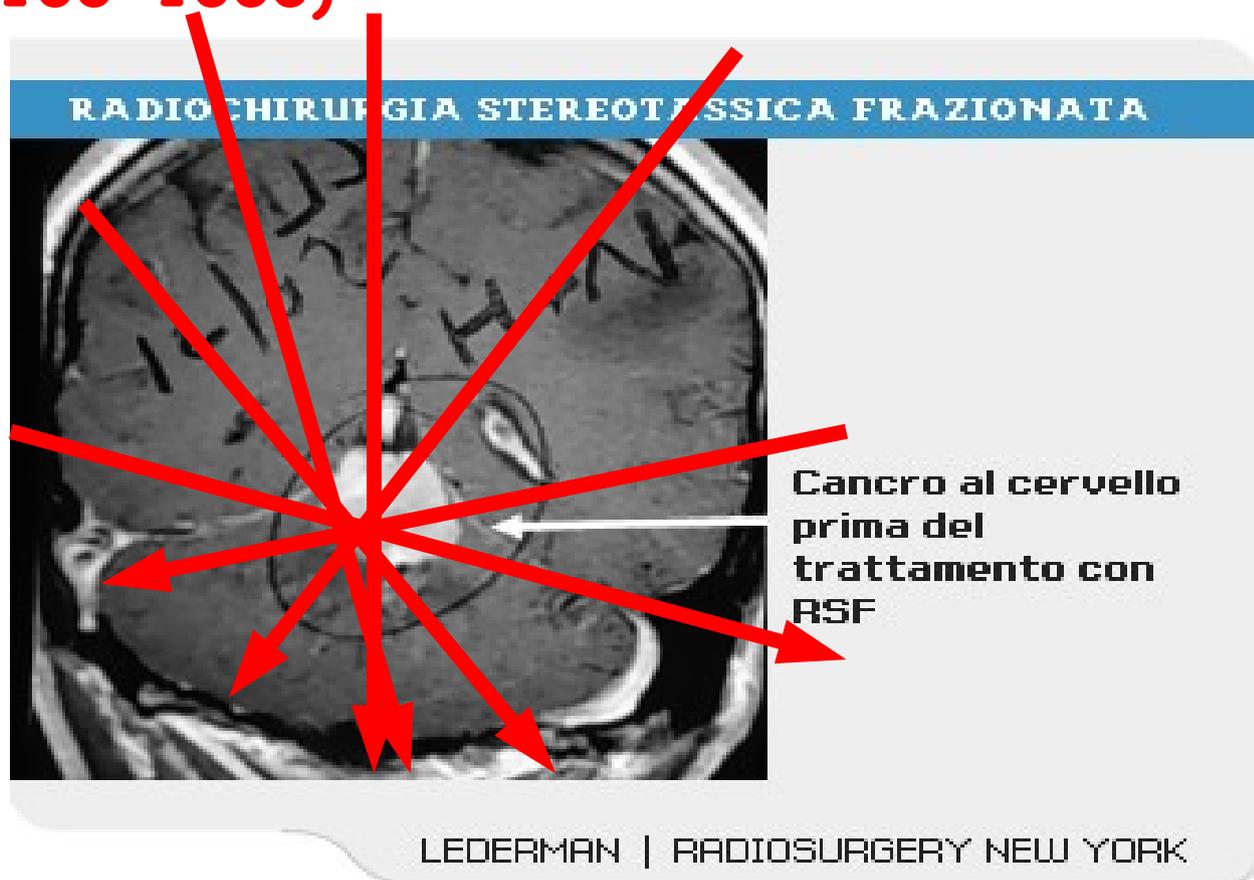
30 cm = spessore corpo umano

IL problema della radioterapia

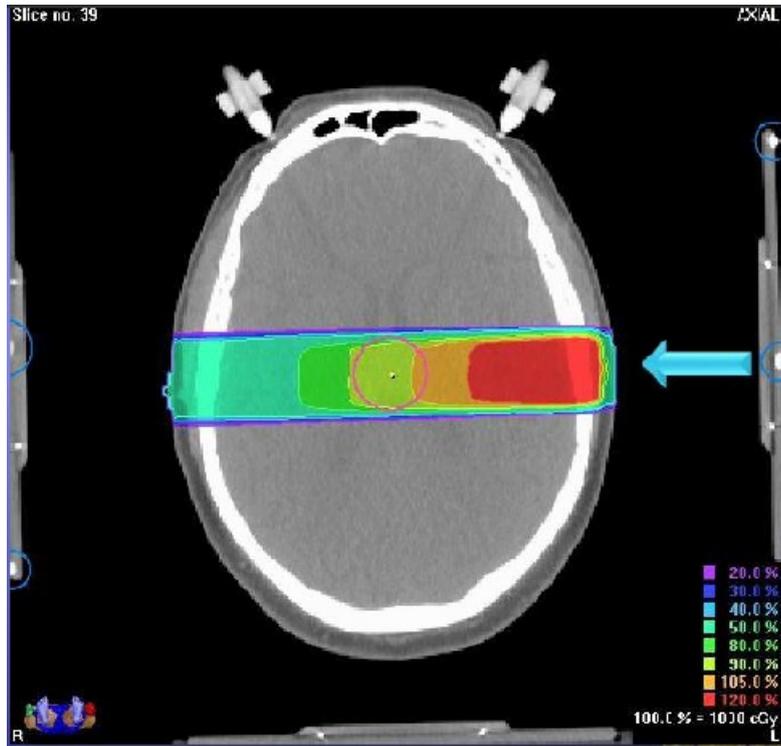
Esempio: tecnica stereotassica: piccoli fascetti di raggi X, molto focalizzati e a bassa dose, che proveniendo da direzioni diverse (anche 100-1000) sommano la dose solo nella zona interessata.

Molta dose nella zona
Tumorale.

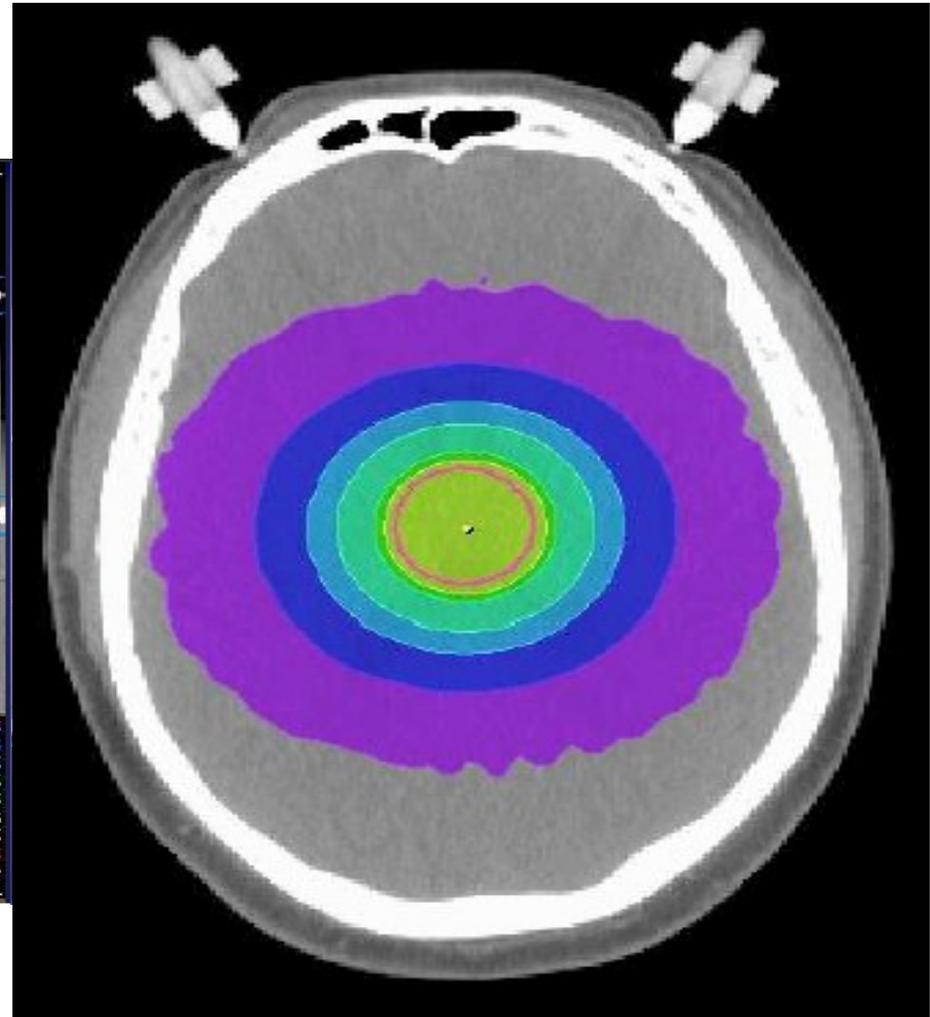
Piccola dose nelle zone
non-tumorali circostanti.



Tecnica stereotassica



1 fascio



Fascetti che arrivano a 360°

Radioterapia Interna

La **brachiterapia**, conosciuta anche come radioterapia interna, è una forma di radioterapia in cui una sorgente di radiazioni è collocata all'interno o vicino alla zona da trattare.



Ossia si impiantano in maniera temporanea o permanente i radionuclidi, spesso sotto forma di barrette o sferette metalliche presso o all'interno del tumore. Vengono rimosse dopo che è stata impartita la dose desiderata.

Medicina Nucleare

L'approccio è ancora diverso:

La radiazione ionizzante viene prodotta vicino o all'interno della singola cellula tumorale, per massimizzare la probabilità di danneggiamento dei tessuti malati, risparmiando il più possibile quelli sani.

- *si ingloba un radionuclide in una molecola adatta;*
- *la si lega ad un vettore che la possa trasportare attraverso il sangue verso le cellule tumorali;*
- *il tutto deve essere legato ad una molecola che viene catturata dal tumore per essere utilizzata.*

Medicina Nucleare: un esempio: Lutezio-177



Conclusioni

- 1) Le radiazioni ionizzanti sono un fenomeno fisico **MOLTO BEN STUDIATO** (da più di un secolo).
- 2) Le radiazioni ionizzanti hanno effetti sugli esseri viventi **abbastanza ben comprese**.
- 3) Le radiazioni ionizzanti sono usate come strumenti dall'uomo in ambiti sempre più vasti.
- 4) Dagli studi sulle radiazioni e sulla loro interazione con la materia (sia vivente che inanimata) sono derivate molte applicazioni tecnologiche che usiamo nella nostra vita quotidiana (soprattutto in campo medico).

Approfondimento

Classificazione effetti sindrome da radiazione acuta

Tipo di sindrome	Dose (Gy)	Esiti sul paziente
	0,25	sopravvivenza virtualmente certa
	1	soglia della sindrome ematologica (ospedalizzazione)
Forma ematologica	1÷2	sopravvivenza probabile
	2÷5	sopravvivenza possibile
	5÷6	sopravvivenza virtualmente impossibile
Forma gastrointestinale	6÷7	soglia della sindrome gastrointestinale
Forma neurologica	10	soglia della sindrome neurologica

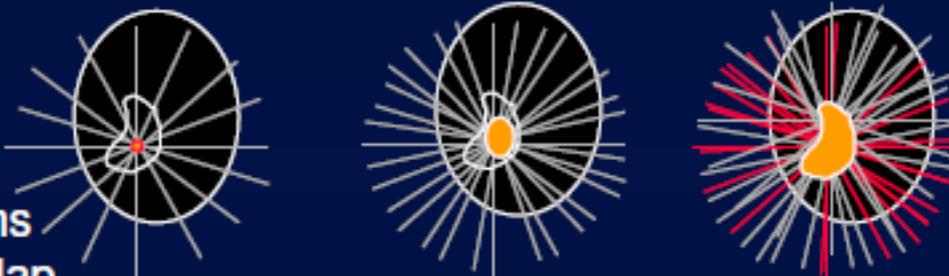
Importance of narrow beams



Target in head

Leksell Gamma Knife®

Multiple isocenters using narrow beams = small beam overlap



Linac μ MLC

One isocenter with several wide beams individually shaped = large beam overlap



Time