

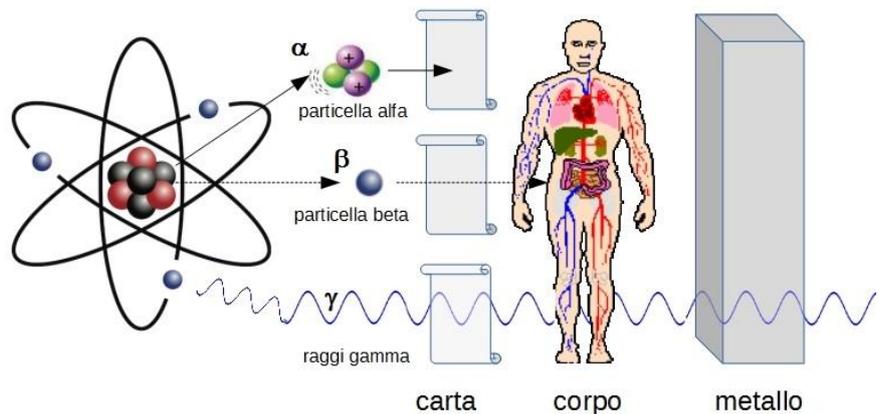
- Sono indirettamente ionizzanti i fotoni (raggi X e raggi γ), e le particelle neutre (neutroni).

PARTICELLA/RAGGIO	ORIGINE E NATURA
Particelle α	Emesse nei decadimenti radioattivi. Si compongono di due neutroni e due protoni.
Particelle β	Emesse nei decadimenti radioattivi. Simili agli elettroni, ma contrariamente a questi possono avere carica sia negativa che positiva.
Raggi X	Radiazioni elettromagnetiche prodotte per frenamento (bremsstrahlung) di particelle cariche.
Raggi γ	Tutte le radiazioni derivanti da transizioni nucleari.

RADIAZIONI DIRETTAMENTE IONIZZANTI

- Le particelle cariche pesanti (protoni, particelle α , ecc.) nell'attraversare la materia cedono la loro energia per lo più mediante urti elastici con gli elettroni atomici; la perdita di energia è caratterizzata da una innumerevole quantità di urti, ciascuno dei quali coinvolge tipicamente una frazione molto piccola dell'energia della particella incidente. A loro volta, gli elettroni liberati dall'urto (detti anche raggi δ) acquistano energia che perdono successivamente urtando altri elettroni atomici. Questo meccanismo produce una ionizzazione a distanza dal fascio primario; in altre parole i raggi δ possono formare gruppi di ioni in prossimità della traccia primaria stessa in

funzione della loro energia. La perdita di energia delle particelle cariche pesanti è linearmente proporzionale alla densità della materia attraversata e il meccanismo stesso con



cui perdono energia, caratterizzato da numerosissimi urti di cui ciascuno porta via una parte molto piccola della energia a disposizione, fa sì che la lunghezza del percorso nella materia sia quasi la stessa per ogni particella di data energia.

- Le particelle cariche leggere, quali gli elettroni ed i positroni (massa di quiete pari a circa 1/1836 della massa dell'atomo di idrogeno; carica elettrica positiva o negativa pari alla carica elettrica elementare, ovvero $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb), nell'attraversare la materia cedono la loro energia

mediante urti con gli elettroni atomici, in modo del tutto analogo alle particelle pesanti. Tuttavia, in questo caso il percorso è meno prevedibile, in quanto per ogni urto l'energia ceduta all'elettrone atomico può arrivare fino al 50 % dell'energia della particella incidente. Un secondo importante meccanismo di perdita di energia di elettroni e positroni è dovuto all'interazione con il campo elettrico nucleare, per il quale elettroni e positroni possono perdere energia anche perché frenati dall'effetto del campo elettrico dovuto al nucleo. Questo meccanismo è detto di frenamento (bremsstrahlung).

RADIAZIONI INDIRETTAMENTE IONIZZANTI

I fotoni di energia compresa tra 10 keV e 10 MeV (raggi X e raggi γ) subiscono tre tipi principali di interazione con la materia: effetto fotoelettrico, effetto Compton, produzione di coppie.

- Effetto fotoelettrico: il fotone viene completamente assorbito da un elettrone atomico, il quale acquista energia sufficiente per sfuggire al legame atomico.
- Effetto Compton: il fotone urta un elettrone delle orbite esterne dell'atomo. Ne consegue una diffusione del fotone incidente (ad energia minore di quella originaria) e l'espulsione dell'elettrone colpito.
- Creazione di coppie: mentre i due precedenti processi possono essere compresi in termini quasi balistici, quest'ultimo tipo di fenomeno è complesso poiché implica la trasformazione del fotone in una coppia elettrone-positrone. La creazione della coppia da parte del fotone avviene in presenza del campo elettrico del nucleo.

La penetrazione delle radiazioni indirettamente ionizzanti nella materia è assai maggiore di quella delle particelle cariche. In considerazione della tipologia delle loro interazioni non ha senso parlare di percorso nella materia; con i raggi X e γ si suole piuttosto far riferimento agli spessori emivalenti (SEV), attraversando i quali si dimezza l'intensità primaria della radiazione incidente. Detti spessori hanno le dimensioni di $[g/cm^2]$, perché sono espressi come prodotto dello spessore Δx [cm] per la densità del mezzo ρ $[g/cm^3]$, e questo rapporto risulta grosso modo indipendente dal tipo di materiale preso in considerazione, almeno per energie dei fotoni non troppo modeste.

Le particelle neutre (neutroni) perdono la loro energia mediante collisioni con i nuclei atomici. I nuclei possono essere debolmente accelerati oppure frantumati. I frammenti (essendo costituiti da protoni e neutroni) perdono energia in modo analogo alle particelle descritte precedentemente. Trattandosi di radiazioni indirettamente ionizzanti, anche per i neutroni si può tentare di introdurre in linea di principio lo spessore di dimezzamento, sebbene molto meno significativo che nel caso dei fotoni.

GRANDEZZE DOSIMETRICHE

Esposizione

Misura la ionizzazione prodotta in aria da raggi X o γ . Dato un fascio di radiazioni che attraversa una massa d'aria "m", producendo ioni positivi con carica totale "q", l'esposizione è definita come la carica totale per unità di massa dell'aria, in condizioni standard di temperatura e pressione (0°, 1 atm):

$$\text{esposizione} = \frac{q}{m}$$

L'unità di misura è il coulomb su kilogrammo (C/Kg), ma viene utilizzato anche il roentgen (R).

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} C/Kg$$

Dose assorbita

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto allorché si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato. In particolare la quantità misurata in dosimetria è la dose assorbita D, 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.

L'unità di misura della dose assorbita nel Sistema Internazionale è il Gray (Gy). Un gray corrisponde all'assorbimento di un joule in un kg di materia (1 Gy = 1 J/kg). È tuttavia ancora d'uso comune, in dosimetria, il rad. Per definizione: 1 Gy = 100 rad.

Dose equivalente

Per tener conto della diversa pericolosità (potenzialità di indurre un danno ai tessuti biologici) delle differenti tipologie di radiazioni incidenti, si introduce il cosiddetto fattore di ponderazione della radiazione, w_R o Q. Si tratta di un parametro che tiene conto della differente pericolosità delle varie radiazioni, a parità di dose assorbita, rispetto alla radiazione di riferimento (fotoni), cui viene assegnato per definizione un w_R uguale a 1. Il prodotto della dose assorbita in tessuto, D, per il fattore di ponderazione, w_R prende il nome di dose equivalente, H (Sievert): $H = w_R D$ (Sievert)

In passato, quando si usava il rad per misurare la dose assorbita, la dose equivalente si misurava in rem. Per definizione: 1 Sv = 100 rem.

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	> 2 Mev	5
Particelle alfa, frammenti di fissione, nuclei pesanti	Tutte le energie	20

APPLICAZIONI TECNOLOGICHE

Processi industriali

Per quanto riguarda le tecniche analitiche applicate all'industria, le radiazioni ionizzanti vengono estensivamente utilizzate per effettuare controlli non distruttivi in tutti i settori, che vanno dall'industria meccanica, a quella edile, elettronica.

- Radiografie di componenti meccanici: un'applicazione molto diffusa riguarda l'impiego di intensi fasci di raggi X o gamma per radiografare componenti meccanici/metallici nelle branche più svariate, per la determinazione di difetti nelle saldature effettuate tra i vari pezzi meccanici o nelle strutture di fusione, nelle strutture metalliche, edilizie, elettriche, ecc., al fine di assicurare la qualità e verificare l'integrità dei componenti studiati. Queste indagini radiografiche industriali in genere si effettuano tramite macchine a raggi X, sorgenti radioattive sigillate gamma telecomandate a distanza, e comportano l'impiego di radiazioni ad elevata potenza.
- Misure di spessore di un materiale: si ottengono sia tramite misure di trasmissione che di retrodiffusione della radiazione beta o gamma, utilizzando vari radioelementi, a seconda della densità superficiale del materiale in esame. Ad esempio, emettitori di particelle beta sono diffusamente utilizzati nell'industria cartaria per la misurazione dello spessore dei fogli di carta durante il processo di fabbricazione.
- Misure di livello o di flusso: in questo caso il fascio di radiazione permette di stabilire il livello di un liquido o il rapporto tra liquido e gas all'interno di recipienti, tubazioni, ecc. con una notevole precisione su qualunque tipo di contenitore, che sia opaco o meno.
- Misure di umidità e di densità del terreno: questi tipi di misure vengono eseguite usando sorgenti neutroniche e di radiazione gamma, le prime per rivelare la presenza d'acqua o di idrocarburi nei terreni, le seconde per determinare la densità del suolo.

- Traccianti gamma dispersi nell'olio di lubrificazione dei motori di nuova progettazione e costruzione consentono, nella fase di ingegnerizzazione, di quantificarne sul banco di prova il consumo di olio attraverso la loro rilevazione nei gas di scarico. Mescolando ai combustibili piccole quantità di traccianti è possibile verificare inoltre l'efficienza dei sistemi di captazione delle ceneri e di depurazione dei fumi.
- Metodologie radio-ottiche per misurare in situ le vibrazioni e i movimenti relativi di componenti di ponti, palazzi, dighe, velivoli, satelliti, oppure per valutare i parametri di crescita di crepe e rotture nelle pavimentazioni di asfalto.
- Tecnologia dei materiali: dove intensi fasci di radiazioni ionizzanti sono impiegate per modificare opportunamente le caratteristiche dei materiali irradiati. Le radiazioni ionizzanti sono infatti in grado di attivare reazioni chimiche indipendentemente dallo stato fisico (solido, liquido, gassoso) e dalle condizioni termodinamiche (pressione, temperatura) dei reagenti, e senza l'aggiunta di catalizzatori o di additivi.

Alimenti e agricoltura

Anche in questo caso, le radiografie sono usualmente utilizzate per ispezionare gli alimenti e le piante. Prodotti agricoli, come ad esempio noci, cereali ed altri semi sono radiografati per studiarne le dimensioni, la forma e l'eventuale presenza di infestanti. Le immagini radiografiche rivelano infatti eventuali "imperfezioni" interne dei prodotti non rilevabili con altre metodiche non distruttive. Anche prodotti particolari, come gli alimenti per bambini, sono sottoposti a radiografia per evidenziare eventuali oggetti estranei.

Sempre rimanendo nel campo analitico, l'uso di traccianti radioattivi mescolati ai fertilizzanti agricoli consente di seguirne il processo di assorbimento e di metabolizzazione da parte dei vegetali e di quantificarne il rilascio, per evitare poi, nella concreta applicazione di pieno campo, l'impiego di dosi eccessive di sostanze chimiche, minimizzando in tal modo i problemi di contaminazione dell'ambiente.

Le tecniche di irraggiamento con le radiazioni ionizzanti, sono effettuate in genere con sorgenti di radiazioni X, gamma e fasci di elettroni, e vengono estensivamente impiegate per la sterilizzazione e la conservazione di alimenti. Gli effetti delle radiazioni ionizzanti sono, in dipendenza dell'alimento e della dose di radiazione impiegata:

- Decontaminazione da microrganismi patogeni e non, che possono causare tossinfezioni alimentari (tecnica utilizzata per spezie, erbe e vegetali di stagione)
- Disinfestazione da insetti e parassiti vari, tipo scarafaggi, falene ed altri

- Ritardo della germogliazione e della maturazione (tecnica utilizzata per patate, cipolle, prodotti ortofrutticoli).

L'irradiazione non rende gli alimenti radioattivi; è opportuno infatti distinguere gli alimenti irradiati da quelli radioattivi. I primi sono esposti volontariamente dall'uomo alle radiazioni, per bloccarne la germogliazione o distruggerne gli infestanti e le radiazioni cessano istantaneamente il loro effetto nello stesso momento in cui s'interrompe la sorgente che le produce. I secondi sono stati oggetto di esposizione incontrollata, non voluta dall'uomo e potenzialmente pericolosa per la salute. Tuttavia, occorre notare che le radiazioni ionizzanti, avendo la potenzialità di rompere la struttura molecolare della sostanza organica, possono formare radicali liberi, che, reagendo con il cibo, danno luogo a nuove sostanze chimiche, chiamate "prodotti radiolitici", caratteristici dei cibi irradiati.

Arte, archeologia, geologia e ambiente

Anche in questo caso, le grandi potenzialità delle radiazioni ionizzanti unite alla non distruttività e non invasività delle analisi consentono di avere informazioni molto dettagliate sulle opere analizzate, sulla loro elaborazione, la loro evoluzione e/o la loro degradazione nel tempo, senza distruggerle.

Nel settore della pittura le tecniche radiografiche sono preziose alleate per avere informazioni sul supporto, sull'imprimitura, sulla valutazione del disegno preparatorio, del colore e dei pennelli impiegati, svelando ripensamenti dell'artista o consentendo di scoprire clamorosi falsi. Inoltre, tramite la fluorescenza X (XRF) si possono determinare gli elementi presenti in un materiale e studiare ad esempio la composizione dei pigmenti utilizzati: questa tecnica permette di stabilire, per esempio, se un quadro è un falso o no, basandosi appunto sugli elementi costituenti i vari colori utilizzati, elementi che variano a seconda dell'epoca della pittura. Qualsiasi tipologia di materiale può essere analizzato.

Anche nell'archeologia e nella paleobiologia le radiazioni ionizzanti sono alla base di importanti tecniche di analisi. Le analisi radiografiche sono estensivamente impiegate per studiare mummie, tessuti organici ed altri oggetti. Inoltre, com'è noto, l'età di un reperto di origine organica (vegetale o animale) può essere facilmente determinata misurando il suo contenuto in carbonio-14. Infine, per studiare materiali inorganici è possibile utilizzare altre tecniche di datazione basate sull'analisi di altri radioisotopi naturali.

La geologia e la prospezione mineraria sono due settori nei quali le radiazioni ionizzanti trovano applicazioni di notevole interesse. La presenza di radioisotopi a vita lunga nei minerali consente di datare con buona approssimazione le formazioni geologiche, ricavando informazioni preziose per la ricerca di minerali. La stratigrafia per attivazione neutronica è invece una tecnica molto utilizzata

nell'industria petrolifera e del carbone per determinare la composizione degli strati geologici attraversati da una perforazione di sondaggio. Facendo scorrere lungo la perforazione una sorgente di neutroni e misurando successivamente la "risposta" dei materiali irradiati si ricavano infatti informazioni molto dettagliate sulla composizione degli strati attraversati. L'uso dei traccianti consente inoltre di studiare la mappatura delle falde acquifere e delle risorse idriche sotterranee, di analizzare e misurare l'accumulo dei sedimenti sul fondo marino, di seguire il corso delle correnti oceaniche e atmosferiche e di misurare il tasso di accumulo dei ghiacci nelle calotte polari.

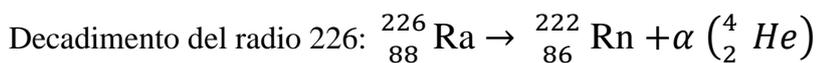
Passando alle tecnologie di trattamento impiegate nel settore ambientale, le radiazioni ionizzanti trovano impiego nella sterilizzazione dei fanghi di risulta degli impianti di depurazione, nel trattamento degli inquinanti e nel riciclo.

1° ESERCIZIO

In una cava di pechblenda sono presenti 10 kg di uranio ($N_0 = 2,5 \cdot 10^{25}$), a sostegno della struttura della miniera è presente una trave metallica lunga 10 metri. Qual è la dose assorbita dalla barra metallica dopo 1 anno di esposizione, sapendo che essa assorbe l'80% dell'energia trasportata dalle particelle α emesse durante il decadimento del radio?

$$\mu_{(x)} = \frac{60}{(x+2)^2} \text{ (densità lineare kg/m della barra di metallo)}$$

$$\text{Numero atomi radio} = \frac{1}{7 \cdot 10^9 \text{ atomi di uranio}}$$



$$\lambda(\text{radio}) = \frac{\ln 2}{1602} \text{ anni}^{-1}$$

$$E(\text{particella alfa}) = 5,965 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$m = \int_0^{10} \frac{60}{(x+2)^2} dx \rightarrow m = -\frac{60}{(x+2)} \Big|_0^{10} \rightarrow m = -\frac{60}{12} + \frac{60}{2} \rightarrow m = 25 \text{ Kg}$$

$$N(\text{decaduti}) = N_0 - N(\text{dopo 1 anno})$$

$$N(\text{decaduti}) = 2,5 \cdot 10^{25} \cdot \frac{1}{7 \cdot 10^9} - \left(2,5 \cdot 10^{25} \cdot \frac{1}{7 \cdot 10^9} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{1602}} \right) \rightarrow N = 1,545 \cdot 10^{12}$$

$$E(\text{totale delle particelle alfa emesse}) = 1,545 \cdot 10^{12} \cdot 5,965 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 921,6 \text{ J}$$

$$\text{Dose assorbita} = 921,6 \text{ J} \cdot \frac{80}{100} \cdot \frac{1}{25 \text{ kg}} = 29,5 \text{ Gy}$$

In questo esercizio abbiamo utilizzato un integrale definito per trovare la massa di un corpo lineare, avendo la sua lunghezza e la funzione che ne esprime la densità lineare. La densità lineare può essere

definita punto per punto passando agli infinitesimi, così come accade per passare dalla velocità media alla velocità istantanea. La densità lineare viene così scritta: $\mu(x) = \frac{dm}{dL}$

Essendo γ il corpo a cui facciamo riferimento (di estensione da " α " a " β "), la massa del corpo si trova integrando la densità lineare lungo l'intero corpo:

$$m = \int_{\alpha}^{\beta} \mu(x) dL$$

Integrale definito

Data una funzione f continua e definita in un intervallo $[a, b]$, si chiama integrale definito della funzione f nell'intervallo $[a, b]$ il $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n$, essendo S_n una somma di Riemann della funzione f nell'intervallo $[a, b]$. L'integrale definito della funzione f nell'intervallo $[a, b]$ viene indicato con il simbolo:

$$\int_a^b f(x) dx$$

Somma di Riemann

Data $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, e considerati i punti: $a = x_0, x_1, \dots, x_n = b$

i quali suddividono l'intervallo $[a, b]$ in n intervalli aventi la stessa ampiezza: $\Delta x = \frac{b-a}{n}$

Chiamiamo somma di Riemann della funzione f nell'intervallo $[a, b]$ la somma:

$$S_n = \sum_{i=1}^n f(x_i) \Delta x$$

Primo teorema fondamentale del calcolo integrale

Sia $f(x)$ una funzione continua in $[a, b]$ e sia $F(x)$ una sua primitiva in $[a, b]$. Allora:

$$\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$$

Equazione differenziale a variabili separabili

Un'equazione differenziale è un'equazione in cui l'incognita è una funzione, e in cui compaiono una o più derivate della funzione incognita.

Un'equazione differenziale del primo ordine si dice a variabili separabili quando la derivata prima della funzione incognita può scriversi come prodotto di una funzione della sola variabile indipendente

“x” e di una funzione della sola incognita “y”, ovvero quando l’equazione può scriversi nella forma: $y' = a(x) b(y)$, dove $a(x)$ e $b(y)$ si suppongono due funzioni continue in opportuni intervalli.

Determinazione soluzione equazione differenziale:

Supposto $b(y) \neq 0$, viene rappresentata la derivata y' come $y' = \frac{dy}{dx}$ in modo da trascrivere poi

l’equazione nella forma: $\frac{dy}{dx} = a(x) b(x)$, a questo punto avviene la separazione delle variabili:

$$\frac{1}{b(y)} dy = a(x) dx, \text{ vengono poi integrati entrambi i membri: } \int \frac{1}{b(y)} d(y) = \int a(x) d(x).$$

Indicando $B(x)$ e $A(x)$ come le due primitive di $\frac{1}{b(y)}$ e di $a(x)$ si ottiene la seguente relazione:

$$B(y) = A(x) + c$$

Dimostrazione matematica della legge del decadimento radioattivo

$$\Delta N = N(t + \Delta t) - N(t) \quad R(\text{attività}) = \Delta N / \Delta t = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t}$$

$$R(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} = -\frac{dN}{dt} \rightarrow -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$$

Il numero di decadimenti è proporzionale alla popolazione

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt \rightarrow \ln N - \ln N_0 = -\lambda t \rightarrow \ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \rightarrow N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

2° ESERCIZIO

$$E(t) = 14 - 8 \cos\left(\frac{\pi}{12} t\right)$$

$t \rightarrow$ ore

Massa oggetto = 30 Kg

$E(t)$ = energia assorbita da un corpo di massa “m” durante un giorno (24 ore)

Trova l’energia assorbita media nell’intera giornata, e calcola poi a partire da questo dato la dose assorbita media e l’equivalente di dose medio (sapendo che $Q/W_R = 10$)

$$E(t) = 14 - 8 \cos\left(\frac{\pi}{12} \cdot t\right) \rightarrow E(c) = \frac{1}{24} \cdot \int_0^{24} 14 - 8 \cos\left(\frac{\pi}{12} \cdot t\right) dt$$

$$E(c) = \frac{1}{24} \cdot \left(\int_0^{24} 14 \, dt - 8 \cdot \frac{12}{\pi} \int_0^{24} \frac{\pi}{12} \cos\left(\frac{\pi}{12} \cdot t\right) dt \right) \Big|_0^{24}$$

$$\rightarrow \frac{1}{24} \cdot \left[14t - \frac{96}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot t\right) \right] \Big|_0^{24} \rightarrow \frac{1}{24} \cdot [(336 - 0) - 0] = 14 \, J$$

$$\text{Dose assorbita} = \frac{14 \, J}{30 \, Kg} = 0,47 \, Gy$$

$$\text{Dose equivalente} = 0,47 \, Gy \cdot 10 = 4,7 \, Sv$$

Anche in questo esercizio vediamo l'utilizzo degli integrali definiti. In questo caso però in particolare viene sfruttato il teorema del valore medio per gli integrali, secondo il quale avendo una funzione $f(x)$ continua nell'intervallo $[a, b]$, esiste un numero $c \in [a, b]$ tale che $f(c)$ è uguale al valore medio della funzione nell'intervallo $[a, b]$, ossia tale che:

$$f(c)(b - a) = \int_a^b f(x) dx \quad \text{cioè} \quad f(c) = \frac{1}{b - a} \cdot \int_a^b f(x) dx$$

Sitografia/bibliografia:

- J.D. Cutnell, K.W. Johnson – I problemi della fisica (volume 3)
- Leonardo Sasso – La matematica a colori (Edizione blu per il quinto anno)
- https://www.dsf.unica.it/EOG/teaching/infermieristica/pinto_radioprotezione.pdf
- https://www.inail.it/cs/internet/docs/i_principali_impieghi_delle_radiazioni_ionizzanti_pdf.pdf?section=attivita
- https://www.inail.it/cs/internet/docs/le_radiazioni_ionizzanti_pdf.pdf?section=attivita
- <http://www.fmboschetto.it/>
- http://www.fisica.unipg.it/valdata/rivelatori/int.rad.mat.varie%20e%20appl.%20mediche/interazione_radiazione_materia_applicazioni_mediche.pdf