

**BREVI NOZIONI DI FISICA
DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI**

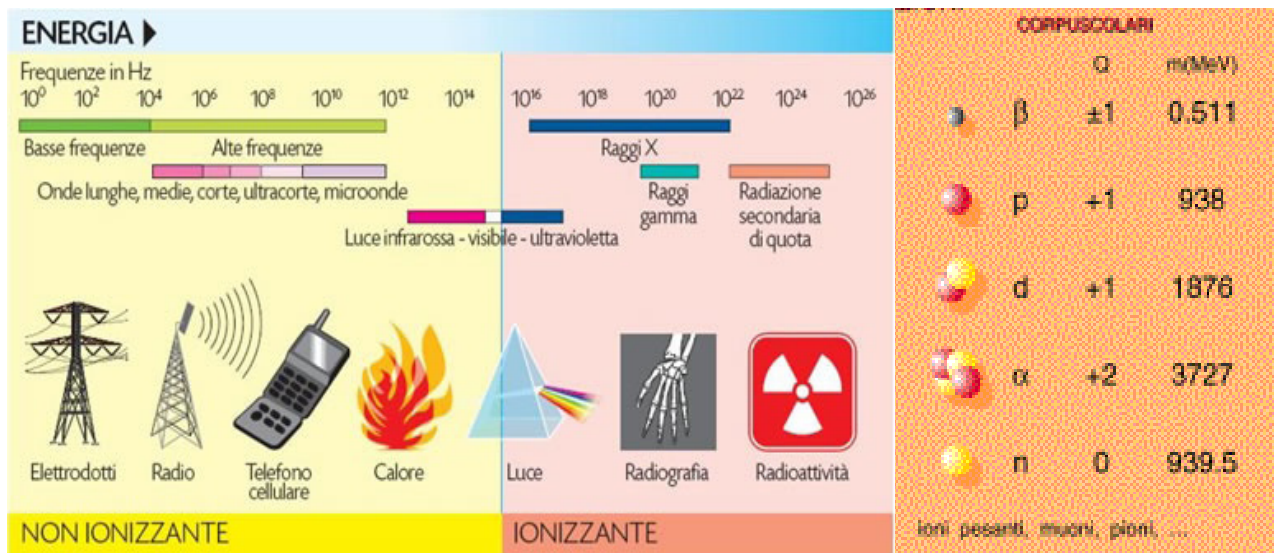
**Dott.ssa Caterina Capomolla
U.O.C. di FISICA SANITARIA
PRESIDIO OSPEDALIERO "VITO FAZZI"**

BREVI NOZIONI DI FISICA DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

I diversi tipi di radiazioni ionizzanti

Le **radiazioni ionizzanti** sono, per definizione, radiazioni capaci di causare, direttamente o indirettamente, la ionizzazione degli atomi e delle molecole dei materiali attraversati. In pratica, nell'attraversare la materia, queste radiazioni riescono a strappare, in virtù della loro energia, un elettrone dall'orbita esterna di un atomo creando così una coppia di ioni.

Le **radiazioni ionizzanti** possono essere costituite o da **particelle** sub-atomiche che si muovono con velocità elevate, spesso prossime alla velocità della luce (radiazioni corpuscolari), o da **radiazioni elettromagnetiche**, costituite da fotoni che si propagano alla velocità della luce (raggi X e raggi γ).



A seconda che la ionizzazione del mezzo irradiato avvenga per via diretta o indiretta tali radiazioni vengono classificate come direttamente ionizzanti o indirettamente ionizzanti. Sono **direttamente ionizzanti** le particelle **eletttricamente cariche** (elettroni, particelle beta, particelle alfa, etc.); sono invece **indirettamente ionizzanti** i fotoni (raggi X, raggi gamma), i neutroni ed in generale particelle sub-atomiche prive di carica elettrica. In particolare, a seconda della massa e della carica **le radiazioni corpuscolari** possono essere suddivise in tre gruppi:

- particelle leggere** elettricamente cariche: le più importanti sono elettroni e 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 1.6×10^{-19} Coulomb).
- particelle pesanti** elettricamente cariche: nuclei di atomi di basso numero atomico, aventi quindi carica positiva (es.: protoni, deutoni, particelle alfa etc.).
- particelle neutre**: l'esempio più importante è il neutrone, particella priva di carica elettrica e di massa pari a quella del protone. I **fotoni** invece non hanno massa, nè carica elettrica. Essi costituiscono le radiazioni elettromagnetiche che si propagano con la velocità della luce.

La radioattività

Numerosi elementi esistenti in natura, o prodotti artificialmente in laboratorio mediante reazioni nucleari, sono costituiti da atomi i cui nuclei sono energeticamente instabili. Essi tendono a mutare la propria natura trasformandosi in specie atomiche energeticamente stabili. Il ritorno alla stabilità avviene con emissione di radiazione corpuscolare (alfa o beta), spesso accompagnata da radiazione elettromagnetica (raggi gamma). I nuclei instabili si dicono **radioattivi** e il processo di emissione di radiazione viene detta **decadimento radioattivo o radioattività**.

Il fenomeno è regolato dalla fondamentale legge del decadimento radioattivo secondo la quale, per ogni radionuclide, deve trascorrere un tempo caratteristico (tempo di dimezzamento) affinché il numero di nuclei radioattivi presenti si dimezzi. Il tempo di dimezzamento può essere compreso tra le frazioni di secondo e i milioni di anni.

Le particelle alfa (α) che vengono emesse nei decadimenti radioattivi sono costituite da due neutroni e due protoni, e sono pertanto atomi di elio doppiamente ionizzati.

Le particelle beta (β) emesse nei decadimenti radioattivi sono o elettroni o positroni, questi ultimi del tutto simili agli elettroni, ma dotati di carica elettrica positiva.

I neutroni sono invece emessi nella disintegrazione spontanea di elementi pesanti prodotti artificialmente e nelle reazioni nucleari.

Le radiazioni alfa e gamma emesse nei decadimenti radioattivi hanno una energia ben definita. La radiazione beta ha invece uno spettro energetico continuo, che si estende fino ad una energia massima tipica di ciascun radioisotopo. L'energia media di questi elettroni è dell'ordine di un terzo dell'energia massima.

Ciascun radionuclide si caratterizza per il tipo (alfa, beta, gamma, neutroni) e l'energia delle radiazioni emesse e per il tempo di dimezzamento.

Il numero di disintegrazioni che avvengono nell'unità di tempo in una data quantità di materiale radioattivo costituisce la sua attività.

L'attività si **misura in bequerel (Bq)**, in omaggio allo scienziato che scoprì il fenomeno: **1 Bq=1 disintegrazione al secondo**.

Le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti

Come è noto, la radioattività è una normale componente dell'ambiente naturale. L'uomo è stato costantemente esposto alle radiazioni di origine naturale fin dal suo apparire sulla terra e queste sono rimaste l'unica fonte di irradiazione fino a poco meno di un secolo fa. Ancora adesso, malgrado il largo impiego di sostanze radioattive artificiali e di impianti radiogeni di vario genere, la radioattività naturale continua a fornire il maggior contributo alla dose ricevuta dalla popolazione ed è assai improbabile che ciò non continui a verificarsi anche in futuro.

Nella radioattività naturale si distinguono una componente di **origine terrestre** e una componente di **origine extra-terrestre**. La prima è dovuta ai radionuclidi cosiddetti primordiali presenti in varie quantità nei materiali inorganici della crosta terrestre (rocce, minerali) fin dalla sua formazione. La seconda è costituita dai raggi cosmici. Quando ci si riferisce a queste sorgenti, si parla di **fondo naturale di radiazioni**.

I principali radionuclidi primordiali sono il K^{40} , il Rb^{87} e gli elementi delle due serie radioattive dell' U^{238} e del Th^{232} . Si tende in genere ad ignorare la serie dell' U^{235} , per la modesta abbondanza relativa del capostipite, anche se ciò può non essere giustificato in termini dosimetrici.

La concentrazione dei radionuclidi naturali nel suolo e nelle rocce varia fortemente da luogo a luogo in dipendenza della conformazione geologica delle diverse aree. In generale le rocce ignee e i graniti contengono U^{238} in concentrazioni più elevate delle rocce sedimentarie come il calcare e il gesso. Alcune rocce sedimentarie di origine marina possono però contenere U^{238} in concentrazione assai elevata. L'uranio, come anche il torio, è più abbondante nelle rocce acide che in quelle basiche.

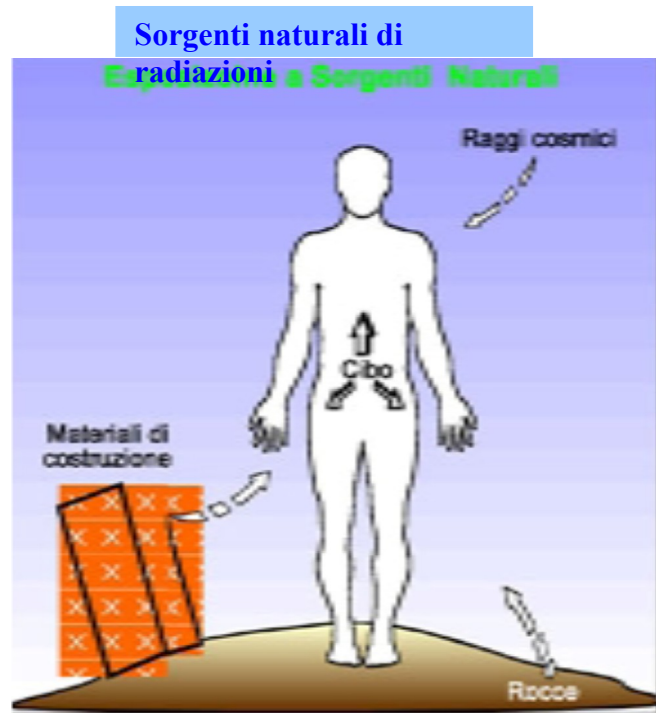
Nell'aria, la radiazione naturale è dovuta principalmente alla presenza di radon e toron, cioè di gas (7,5 volte più pesanti dell'aria) appartenenti alle famiglie dell'uranio e del torio. Il contributo maggiore alla dose deriva dai figli del radon piuttosto che dal gas stesso e principalmente dalla sua inalazione in luoghi chiusi.

Numerosi materiali da costruzione emettono quantità relativamente modeste di radon. Molto più radioattivi sono il granito, la pietra pomice, alcuni prodotti di scarto usati nell'edilizia come il fosfato di gesso e le scorie di altiforni, nonché il tufo e la pozzolana, pure diffusamente utilizzati in edilizia. Tuttavia la principale sorgente di radon si situa quasi sempre nel terreno sottostante le case. I livelli di concentrazione nell'aria sono fortemente variabili a seconda delle condizioni ambientali.

Anche le acque contengono una certa quantità di radioattività, dovuta sia alle piogge che trasportano le sostanze radioattive dell'aria, sia alle acque di drenaggio che convogliano nei bacini idrici sostanze radioattive presenti nelle rocce e nel suolo. Significativamente radioattive sono le acque calde solfuree usate negli impianti termali, per produrre elettricità e per riscaldare gli edifici.

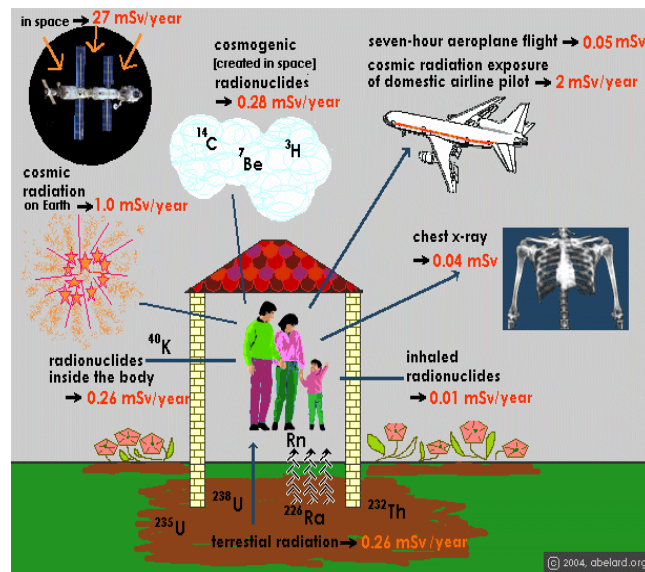
Attraverso la catena alimentare entrano nel corpo umano piccole quantità di sostanze radioattive. I principali radioisotopi presenti sono il K^{-40} , il Ra^{-226} , il Ra^{-228} e il C^{-14} .

I raggi cosmici provengono, per la maggior parte, dal profondo spazio interstellare e sono costituiti principalmente da particelle cariche positivamente (protoni, alfa, nuclei pesanti), che quando giungono in prossimità della terra, risentono dell'azione derivante dal campo magnetico terrestre. C'è anche una componente solare che trae origine dalle esplosioni nucleari sul sole e consiste essenzialmente di protoni. Per la maggior parte i raggi cosmici primari vengono assorbiti nello strato più alto dell'atmosfera e sulla terra i raggi cosmici secondari sono principalmente costituiti da mesoni, elettroni, fotoni, neutroni e protoni.



Sorgenti artificiali di radiazioni ionizzanti

L'impiego di radiazioni ionizzanti è diventato ormai essenziale in molte attività umane, nelle quali vengono abitualmente impiegate sorgenti di radiazioni prodotte dall'uomo. E' qui sufficiente limitarsi a ricordare l'impiego di radionuclidi artificiali e di macchine radiogene nei settori



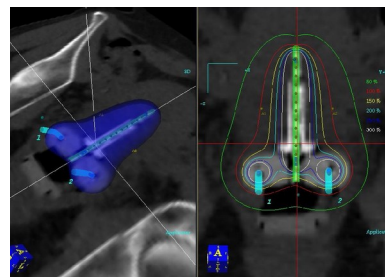
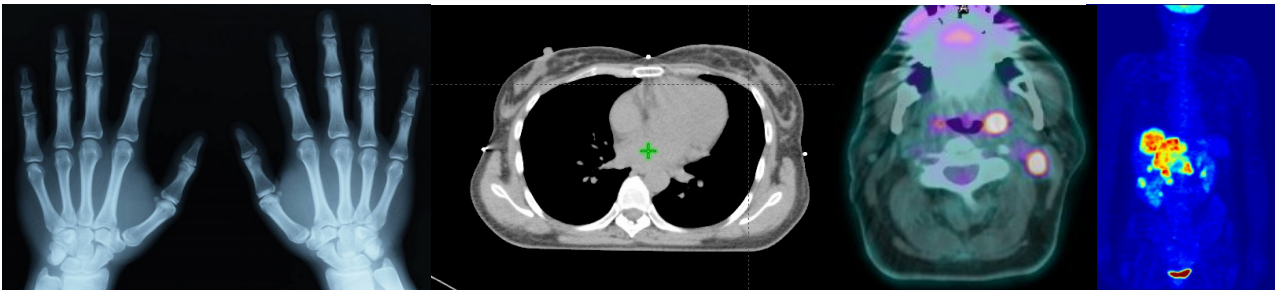
industriale, sanitario e della ricerca. Numerosissime sono le sorgenti radioattive artificiali contenute in strumenti di uso quotidiano impiegate per le più svariate applicazioni industriali (rivelatori di incendio, rivelatori di livello, rivelatori di umidità e contenuto d'acqua, quadranti di orologio, sistemi antistatici, insegne luminose, etc.). Vengono inoltre usati, anche se più diffusamente in altri

Paesi, dispositivi a raggi X e gamma (grandi irradiatorii, acceleratori di particelle) per la determinazione di difetti nelle saldature e nelle strutture di fusione, per la sterilizzazione di derrate alimentari e di prodotti medicali, etc.

Per quanto riguarda il settore medico, è a tutti noto il diffusissimo impiego delle sorgenti di radiazioni sia in **diagnostica** che in **terapia**. Attualmente le applicazioni in questo settore costituiscono la seconda causa di esposizione della popolazione alle radiazioni ionizzanti e la maggior fonte di esposizione alle radiazioni artificiali.

Oltre alle tradizionali apparecchiature a raggi X della radiologia, conviene ricordare l'utilizzazione dei radioisotopi nella *medicina nucleare*, ove si ricorre alla rivelazione dei radionuclidi iniettati nell'uomo per lo studio di numerosi processi e per la localizzazione di tumori.

Questi radionuclidi vengono prodotti principalmente con i reattori nucleari, ma anche con gli acceleratori di particelle e, in primo luogo, con i ciclotroni. Conviene anche ricordare l'impiego degli **acceleratori di particelle** (soprattutto acceleratori lineari e betatroni) e dei radionuclidi (sorgenti di cesio e di cobalto) nella radioterapia tumorale. In questo ambito merita inoltre menzionare i notevoli sviluppi tecnologici verificatisi negli ultimi lustri con la produzione dei tomografi, che mediante raggi X e gamma forniscono immagini di organi con elevata risoluzione spaziale (PET: tomografia ad emissione di positroni; TAC: tomografia assiale computerizzata a raggi X).



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. Solo se hanno una energia maggiore di circa 7 MeV sono in grado di superare lo spessore di 70 micrometri di tessuto e possono quindi raggiungere lo strato germinativo della cute. 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 1 MeV sono arrestati in 4 metri di aria o in 4 mm di acqua. Solo particelle con energie maggiori di 70 keV riescono a raggiungere lo strato germinativo della cute.

Quando si vogliono schermare le sorgenti di elettroni, conviene introdurre un primo strato di materiale leggero, al fine di ridurre l'intensità dei raggi X di frenamento che queste particelle producono, cui far seguire un successivo strato di materiale pesante per ridurre i raggi X prodotti.

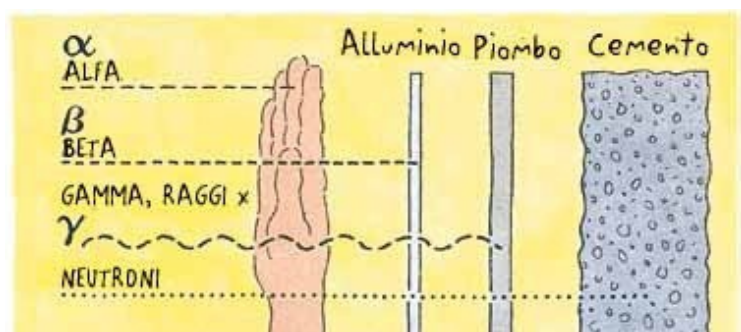
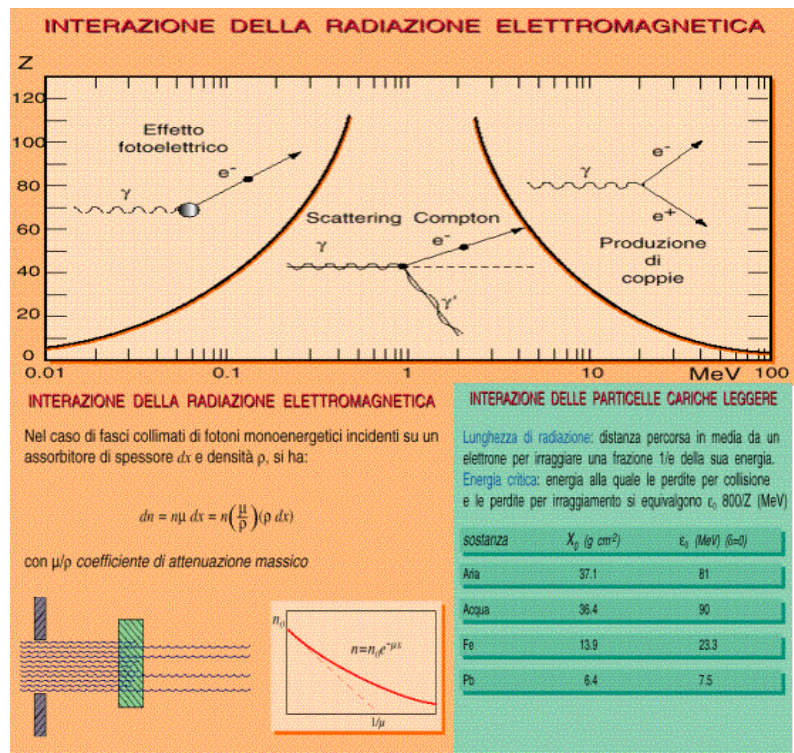
Per gli elettroni positivi (positroni) bisogna inoltre tener presente la produzione di fotoni da 0,511 MeV nei processi di annichilazione.

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. Detti spessori, quando espressi in g.cm-2, ovvero come prodotto dello spessore espresso in cm per la densità in g.cm-3, risultano grosso modo indipendenti dal tipo di materiale preso in considerazione, almeno per energie dei fotoni non troppo modeste. 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-2 risultano tra loro confrontabili (circa 10 g.cm-2).

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 ecc.

I neutroni, infine, perdono energia tramite le interazioni con i nuclei degli atomi dei materiali attraversati. In un ampio intervallo di energia, tra circa 10 keV e 10 MeV, il principale meccanismo di interazione con la materia biologica è la diffusione elastica con la messa in moto di nuclei di rinculo, principalmente i protoni dell'idrogeno. A energie molto basse, al di sotto di 0,5 eV, prevalgono invece le reazioni di cattura da parte dei nuclei, con emissione di raggi gamma e altre particelle. Per attenuare i fasci di neutroni i migliori materiali sono quelli con elevato contenuto di protoni e nuclei leggeri, quali acqua, paraffina, calcestruzzo, etc.



Radioterapia

La radioterapia è un trattamento di comprovata efficacia impiegato nella cura di tumori. Può essere utilizzata da sola, o in combinazione con altri trattamenti come la chemioterapia, l'immunoterapia o la chirurgia.

La radioterapia sfrutta fasci di radiazioni ionizzanti o fasci di **particelle ionizzanti** per danneggiare il materiale genetico delle cellule maligne. Il materiale genetico è fondamentale per la replicazione cellulare e per la crescita del tumore; nel momento in cui questo viene danneggiato, quindi, le cellule tumorali non sono più in grado di riprodursi e vanno incontro a morte cellulare.

Lo scopo del trattamento con radioterapia (curativo, adjuvante, **palliativo**, ecc...) dipende dalla tipologia di tumore, dal suo stadio, dalla sua posizione e dalle condizioni del paziente.

È compito del medico individuare quale trattamento meglio si addice ad ogni singolo paziente, sviluppando un piano di cura il più adeguato possibile alle caratteristiche del tumore e dell'individuo.

Tipologie di radioterapia

La radioterapia può essere impiegata per differenti scopi, a seconda del tipo di tumore da trattare, della sua localizzazione e delle condizioni del paziente:

- **Radioterapia a scopo curativo (radioterapia radicale)**: ha lo scopo di curare ed eliminare completamente il tumore.
- **Radioterapia esclusiva**: la radioterapia è l'unico trattamento impiegato. È utilizzata solo per certi tipi di tumori, con determinate caratteristiche.
- **Radioterapia preoperatoria (radioterapia neoadiuvante)**: è impiegata prima di un intervento chirurgico per ridurre le dimensioni della massa tumorale che deve essere asportata. Può anche essere utilizzata per prevenire la diffusione di cellule maligne durante l'operazione.
- **Radioterapia postoperatoria (radioterapia adjuvante)**: dopo che il paziente ha subito un intervento chirurgico, in alcuni casi, è consigliato un trattamento di questo tipo in modo da eliminare ogni traccia residua del tumore.
- **Radioterapia intraoperatoria (Intraoperative radiotherapy o IORT)**: è utilizzata durante l'operazione per attaccare porzioni di tumore non asportabili chirurgicamente, o per bombardare la zona in cui il tumore si è sviluppato in modo da evitare possibili recidive.
- **Radioterapia corporea totale o TBI**: questo tipo di trattamento viene effettuato in pazienti affetti da particolari tipi di linfomi o leucemie, che devono sottoporsi a trapianto di cellule staminali. Lo scopo è di distruggere le cellule malate che saranno poi rimpiazzate da nuove cellule linfatiche o sanguigne in seguito al trapianto.

• **Radioterapia a scopo palliativo**: questo trattamento ha lo scopo di ridurre il disagio e il dolore causati da alcuni tipi di tumori. Viene impiegata, per esempio, in alcuni tipi di metastasi ossee.

Radioterapia esterna

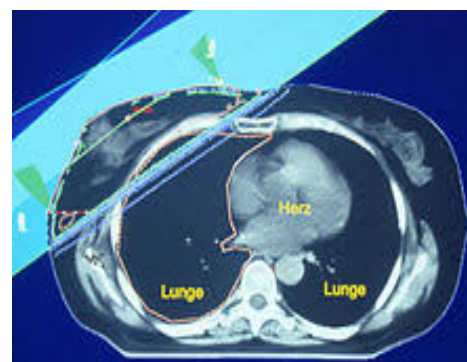
In questo tipo di radioterapia, la sorgente delle radiazioni (fotoni, raggi γ o fasci di particelle) è costituita da un apparecchio esterno all'organismo del paziente. L'apparecchio non entra in contatto con il corpo del paziente e non provoca dolore. Di solito, non è necessario il ricovero ospedaliero, ma si esegue in regime ambulatoriale



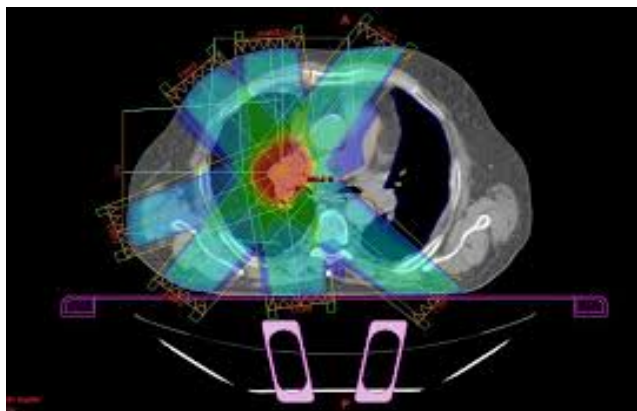
Prima di procedere con la terapia è necessario definire la posizione esatta del tumore attraverso l'impiego di tecniche diagnostiche e di ricostruzioni tridimensionali. L'apparecchio per la radioterapia (acceleratore lineare) è dotato di un sistema interno di lamelle che permettono di avere schermature personalizzate della radiazione uscente, in modo che questa colpisca solo la zona interessata. In ogni caso, esistono molti tipi di dispositivi con diverse caratteristiche e che sfruttano diverse tecniche per irradiare il tumore.

Fra le principali tecniche vi sono:

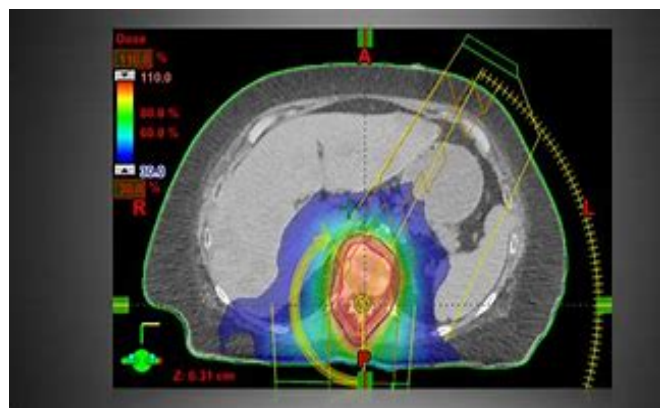
Radioterapia convenzionale esterna: utilizza apparecchi (*acceleratori lineari*) che generano raggi X ad elevata energia. Le radiazioni vengono rivolte sulla massa tumorale da diverse angolazioni, in modo da intersecarsi al centro della zona che dev'essere trattata. È un tipo di radioterapia consolidato, rapido e veloce. Tuttavia, alcuni trattamenti che prevedono la somministrazione di un alto dosaggio di radiazioni possono essere limitati a causa dell'alta **tossicità** che queste hanno nei confronti dei tessuti sani.



Radioterapia conformazionale tridimensionale (3D-conformal radiotherapy o 3D-CRT): questa tecnica impiega radiazioni che vengono sagomate in base alla forma e al volume del tumore. Così facendo, si garantiscono un maggior assorbimento delle radiazioni da parte del tumore e un risparmio delle cellule sane che si trovano nelle vicinanze.

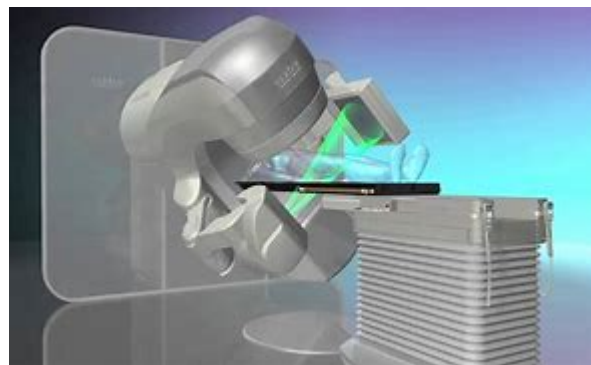


Radioterapia a intensità modulata (intensity-modulated radiotherapy o IMRT): questa tecnica può essere definita, in un certo senso, come l'evoluzione della radioterapia conformazionale tridimensionale sopra descritta. Questo tipo di radioterapia consente di irradiare con la massima precisione tumori con forme e volumi molto complessi e/o che si trovano in prossimità di zone critiche dell'organismo (midollo spinale, organi vitali, importanti vasi sanguigni).



Radioterapia guidata dalle immagini (image-guided radiotherapy o IGRT): questa tecnica moderna sfrutta immagini radiologiche per monitorare e individuare la reale posizione della massa tumorale appena prima dell'emissione delle radiazioni. In questo modo si ha un'irradiazione più precisa di tumori che coinvolgono organi che sono suscettibili a spostamenti;

Radioterapia stereotassica corporea (stereotactic body radiotherapy o SBRT): è un particolare tipo di radioterapia che permette un'irradiazione altamente precisa della massa tumorale, adattandosi bene a piccoli volumi e consentendo un notevole risparmio dei tessuti sani. Inizialmente era applicata solo all'encefalo ma ora è applicabile anche in altre sedi dell'organismo aventi determinate caratteristiche.



Generalmente, dopo la seduta di radioterapia esterna, non rimangono tracce di radiazioni nel corpo. Il paziente può quindi avvicinarsi a chiunque senza preoccuparsi di recare danni

ad altre persone, compresi bambini e donne incinte. Con l'avanzare delle tecnologie si sono ridotti gli effetti collaterali dovuti a questa terapia e il paziente può proseguire le sue attività abituali. Tuttavia, la risposta alla radioterapia varia da individuo a individuo.

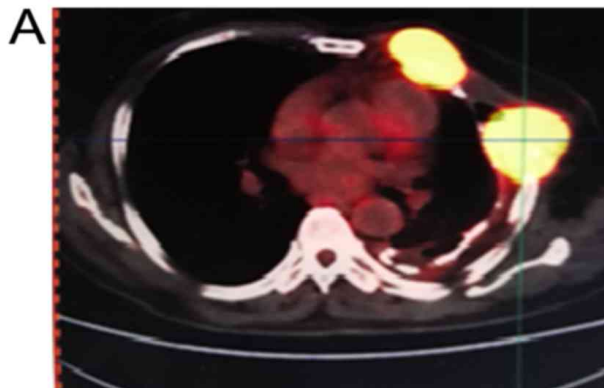
Radioterapia interna

Questo tipo di radioterapia prevede l'introduzione nell'organismo di sostanze radioattive. In questo caso, per la somministrazione è spesso previsto il ricovero ospedaliero per un breve periodo.

Le sorgenti di radiazioni impiegate possono essere *liquidi* o *metalli radioattivi*.

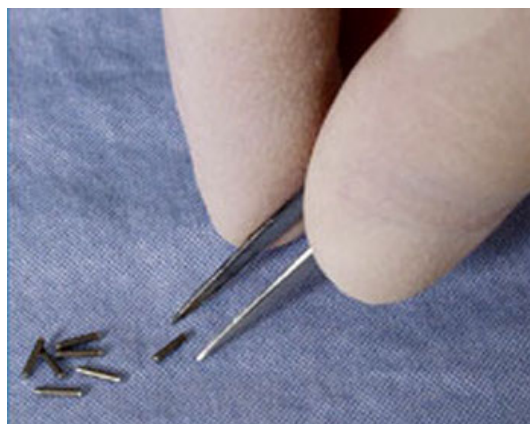
Radioterapia metabolica

liquidi radioattivi possono essere somministrati per via orale o per via endovenosa. La radioterapia che utilizza liquidi radioattivi prende il nome di **radioterapia sistemica o metabolica**. L'elemento radioattivo del liquido è un isotopo che, di solito, si trova legato ad una molecola avente alta affinità per le cellule tumorali e che si lega preferibilmente ad esse, lasciando inalterate quelle sane.



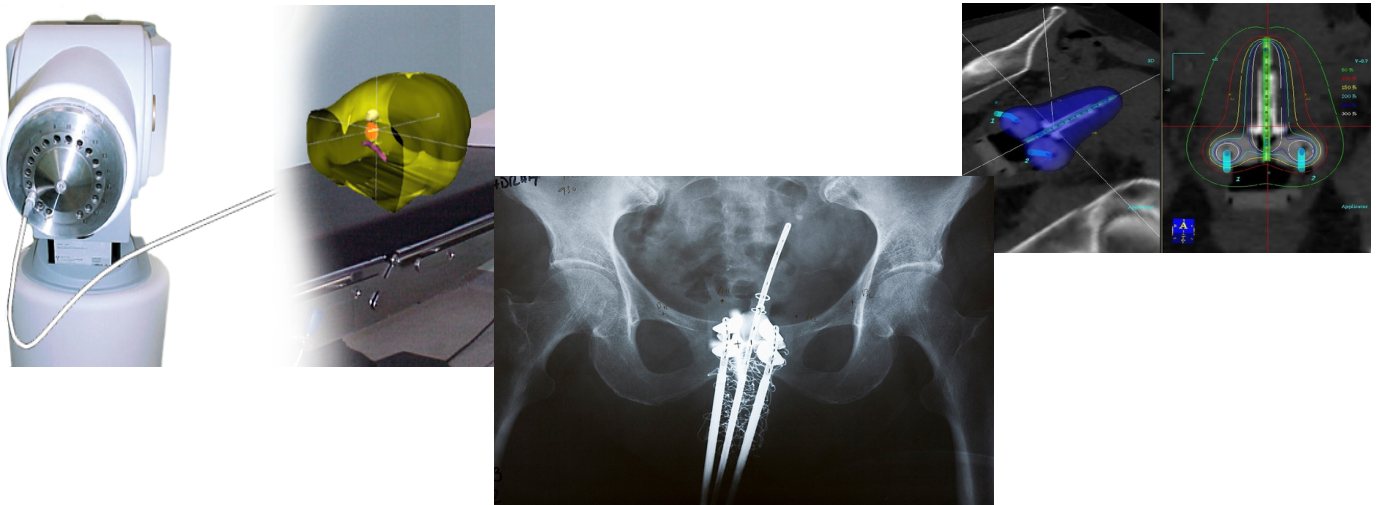
Brachiterapia

I **metalli radioattivi** si trovano sotto forma di minuscoli cilindretti, altrimenti definiti "*semi*". Sono impiegati per i cosiddetti **impianti radioattivi**, cioè i semi di metallo sono collocati in prossimità del tumore o direttamente al suo interno. Questo particolare trattamento prende il nome di brachiterapia.



Possiamo distinguere tre tipologie di brachiterapia :

• **Brachiterapia endocavitaria:** la sorgente radioattiva è sistemata - con l'utilizzo di apposite sonde - in cavità naturali dell'organismo che si trovano in prossimità del tumore (ad esempio nell' -**utero** o nella -**vescica**).



• **Brachiterapia interstiziale:** in questo caso la sorgente radioattiva è impiantata all'interno del tumore con un intervento chirurgico poco invasivo.



• **Brachiterapia di contatto:** in questo tipo di brachiterapia la sorgente di radiazioni, è appoggiata sulla massa tumorale.

Le sorgenti radioattive sono lasciate nell'organismo per periodi variabili da alcuni minuti a qualche giorno. Trascorso questo tempo le sorgenti vengono rimosse.