
La scoperta dei raggi X e del fenomeno della radioattività e le loro ricadute sul mondo medico

Alberto Del Guerra

*Dipartimento di Fisica, Università di Pisa
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Pisa*

La scoperta dei raggi X da parte di Wilhelm Conrad Röntgen avvenuta l'8 Novembre 1895 è una pietra miliare non solo per la fisica nucleare, ma segna anche l'inizio della nuova disciplina medica della radiologia diagnostica e della radioterapia. In questo articolo, si descrive come Röntgen arrivò alla scoperta dei raggi X e come dopo pochi anni Henri Becquerel ed i coniugi Curie arrivarono a scoprire e a studiare il fenomeno della radioattività, che rappresenta il fondamento della Medicina Nucleare. Segue quindi una breve descrizione delle maggiori tecniche diagnostiche e terapeutiche che derivano da queste scoperte, che sono presentate in dettaglio in altri articoli di questo volume. Infine, si introduce la disciplina della Radioprotezione, che permette un utilizzo ottimale

delle radiazioni ionizzanti in campo medico, limitandone i rischi associati.

La scoperta di Wilhelm Conrad Röntgen: i raggi X

Il XIX secolo è stato da molti considerato il secolo della Fisica per i numerosi esperimenti, scoperte ed invenzioni, che hanno rappresentato una incredibile crescita della comprensione dei fenomeni elettromagnetici (Michael Faraday e James Clerk Maxwell) e della termodinamica (William Thomson, più noto come Lord Kelvin, Josiah Willard Gibbs, James Prescott Joule). Alla fine del secolo, in uno spettro di soli 5 anni, è stata la Fisica Atomica ad avvantaggiarsi di nuove straordinarie scoperte: i raggi X (Wilhelm Conrad Röntgen, 1895) [1], il fenomeno della radioattività (Henri Becquerel, 1896), l'elettrone libero (Joseph John Thomson, 1897) ed il decadimento radioattivo degli elementi polonio e radio (Maria e Pierre

Curie 1898).

Tutte e quattro le scoperte di Fisica Atomica si avvalsero dello studio dei fenomeni di scarica dei gas in tubi a vuoto. Faraday fu il primo ad utilizzare il passaggio della corrente elettrica in una soluzione salina per studiare il fenomeno dell'elettrolisi. Questi esperimenti lo portarono ad iniziare una investigazione sistematica dell'emissione dello spettro di luce durante la scarica elettrica in un tubo a vuoto per avere una maggiore comprensione della fisica degli atomi. I tubi a vuoto di vetro fino ad allora utilizzati furono presto perfezionati da un fisico e soffiatore di vetro (Heinrich Geissler), che utilizzò un nuovo tipo di pompa a vuoto a mercurio, più efficiente delle pompe esistenti che utilizzavano la tecnica messa a punto da Otto Von Guericke nel 1650 per la creazione del vuoto per il famoso esperimento degli emisferi di Magdeburgo. Julius Plücker, un fisico e matematico tedesco, nel 1858 utilizzando due elettrodi sigillati all'interno di un tubo di vetro a vuoto ipotizzò l'emissione dei raggi catodici che davano una colorazione verde alle pareti del tubo. Tale ipotesi fu confermata dal fisico tedesco Philipp Von Lenard nel 1888 il quale studiò le proprietà di penetrazione dei raggi catodici, utilizzando fogli di metallo di diversi spessori (le cosiddette finestre di Lenard).

Nello stesso periodo (1879) anche il fisico inglese William Crookes studiava le proprietà dei raggi catodici nei tubi di Geissler, in dipendenza del livello di vuoto creato all'interno del tubo. I tubi a scarica che utilizzava potevano raggiungere anche valori molto elevati di vuoto per mezzo di pompe estremamente potenti. A seguito dei suoi studi, i tubi di vetro a vuoto a scarica elettrica sono conosciuti come i tubi di Crookes. La rivelazione dei raggi catodici può essere considerata il pilastro fondamentale per le scoperte epocali nella fisica atomica della fine del '800.

Il fisico tedesco Eugen Goldstein nel 1886 scoprì che all'interno dei tubi di Crookes non solo venivano prodotti i raggi catodici, ma venivano emessi altri raggi che si muovevano in senso contrario ai raggi catodici verso l'elettrodo opposto e che furono chiamate raggi anodici. A questo punto la descrizione dei due processi, cioè l'emissione dei raggi catodici per effetto termoionico (gli elettroni liberi individuati da Thomson) e l'emissione dei raggi anodici (gli ioni positivi di

elementi del gas residuo all'interno del tubo) era completa. Mancavano però ancora i raggi X!

La teoria complessiva della produzione dei raggi catodici e dei raggi anodici era tuttavia molto dibattuta all'interno degli ambiti scientifici, soprattutto per la ipotesi sulla natura dei raggi stessi. Tutta questa ricchezza di ricerche sull'emissione nel gas residuo all'interno dei tubi di vetro a vuoto attrasse l'attenzione di W.C. Röntgen. Röntgen, che era professore all'Università di Würzburg, decise di verificare l'interpretazione dei raggi catodici alla quale era giunto Philipp Von Lenard. Replicò gli esperimenti compiuti da Lenard, utilizzando una pompa a vuoto a mercurio per sottrarre l'aria al tubo di vetro, ed inserendo successivamente varie tipologie di gas. La sera dell'8 novembre 1895 durante un esperimento di scarica nel tubo, uno schermo cosparso di platino-cianuro di bario posto a poca distanza dal tubo si illuminò di luce verde. A causa della debolezza della luce emessa e del suo daltonismo Röntgen non era sicuro della presenza di quella luce verde sullo schermo. Per aiutarsi nella visione provò a interporre la sua mano tra il tubo e lo schermo. Vide con sorpresa che sullo schermo si evidenziava allora l'ombra delle ossa, che permaneva anche se interponeva un assorbitore di cartone nero. Solo se interponeva un sottile stato di piombo l'immagine scompariva. Aveva scoperto i raggi X e le loro proprietà di essere assorbiti! Li chiamò raggi X, perché sconosciuti. Invece dello schermo decise di posizionare al suo posto una lastra fotografica che permettesse di fissare l'immagine. Così Röntgen sostituì lo schermo con una lastra e chiese a sua moglie Berta, totalmente all'oscuro di questa scoperta, di appoggiare la mano aperta sulla lastra mentre la scarica all'interno del tubo avveniva in continuazione. Dopo 15 minuti di irraggiamento, i coniugi poterono osservare sulla lastra il dettaglio anatomico delle ossa della mano di Berta contornate da un'ombra scura identificata come la componente tessutale delle stesse dita. Röntgen aveva ottenuta la prima radiografia della storia: un'immagine delle ossa della mano della moglie e del suo anello matrimoniale (Figura 1).

La scoperta fu sconvolgente e Röntgen ne fece la presentazione alla Società di Fisica Medica di Würzburg il 28 Dicembre 1895. L'accoglienza che la presentazione ricevette fu enorme e dopo

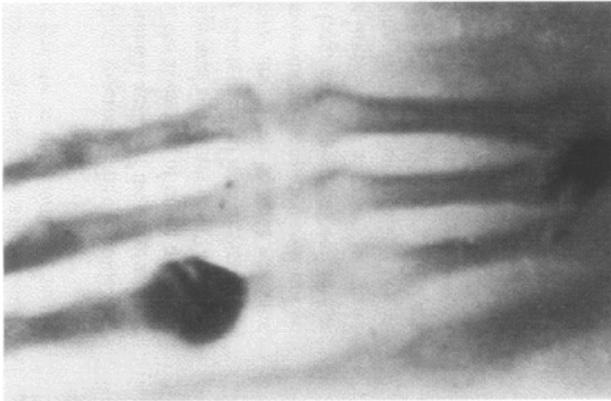


Figura 1: La prima bio-immagine: la radiografia della mano della moglie di W.C. Röntgen eseguita il 22 Dicembre 1895.

un rapido esame dei *referee* il 1 Gennaio 1896 (solo 4 giorni dopo la sottomissione!) uscì la pubblicazione scientifica: "*Über eine neue Art von Strahlen*" - "Su un nuovo tipo di raggi".

Immediatamente ci si rese conto che tale scoperta aveva delle potenzialità mediche enormi: il 13 gennaio 1896 la prima lastra di un ago in una mano di una paziente portò al primo intervento chirurgico di rimozione dell'ago guidato dall'esame radiografico e ben presto si pensò all'utilizzo dei raggi X anche per la terapia dei tumori. Emil Grubbé a Chicago e Leopold Freund a Vienna ne sono considerati i pionieri. Entrambi iniziarono ad utilizzare raggi X in radioterapia nel 1896 a meno di un anno dalla loro scoperta: il primo per aver assemblato una macchina a raggi X ed aver trattato un carcinoma del seno, il secondo per avere eseguito il primo trattamento frazionato radioterapico con raggi X su un tumore maligno della pelle. W. Röntgen rifiutò fin dall'inizio di utilizzare la sua scoperta a fini commerciali, in quanto riteneva che dovesse appartenere all'umanità. Questo fece sì che i sistemi radiografici si diffondessero rapidamente ed a basso costo nella comunità scientifica e medica. (Per una storia della radioterapia si veda l'articolo di M. Anguiano e A. M. Lallena in questo numero di **Ithaca**).

Lo spettro della radiazione elettromagnetica

Nell'esperimento originale di Röntgen i raggi X erano prodotti per interazione degli elettroni su uno schermo metallico. Furono chiamati raggi X proprio perché a quei tempi non si conosceva né il meccanismo di produzione, né le loro proprietà. Ora sappiamo che i raggi X fanno parte dello spettro elettromagnetico delle radiazioni, a cui appartengono anche la luce visibile e le onde radio. Il termine radiazione viene di solito usato per descrivere fenomeni apparentemente molto diversi tra loro, quali l'emissione di luce da una lampada, l'emissione di calore da una fiamma, o di raggi X da una macchina per diagnostica medica. Caratteristica comune a tutti questi fenomeni è il trasporto di energia nello spazio in assenza di un mezzo di propagazione materiale attraverso onde elettromagnetiche, caratterizzate da una velocità costante nel vuoto: $c = 2.99729 \cdot 10^8$ m/s.

Esiste una relazione ben precisa tra la frequenza ν e la lunghezza d'onda λ ($\nu = c/\lambda$). La frequenza di un'onda elettromagnetica, è definita come il numero di oscillazioni nell'unità di tempo in una data posizione dello spazio. La lunghezza d'onda è la distanza che intercorre tra due posizioni consecutive di massima intensità ad un dato istante. L'energia E trasportata dall'onda è direttamente proporzionale alla frequenza $E = h\nu$, con h costante di Planck. La differenza tra i vari tipi di radiazione è data dalla differenza in frequenza ν e quindi in energia E .

Lo spettro elettromagnetico è rappresentato in Figura 2, in funzione crescente della frequenza, espressa in Hertz (Hz), e dell'energia espressa in elettronvolt (eV), ed in funzione decrescente della lunghezza d'onda, espressa in metri (m).

In accordo con il dualismo onda-particella, postulato dalla meccanica quantistica, le onde elettromagnetiche si propagano in pacchetti, chiamati fotoni: la luce è dotata sia di proprietà ondulatorie che corpuscolari. Affinché un fotone possa ionizzare un atomo, è necessario che la sua energia sia maggiore dell'energia di legame degli elettroni atomici coinvolti nell'interazione. Lo spettro delle radiazioni corrispondentemente si divide in due grandi regioni: radiazioni ionizzanti (in grado di ionizzare un atomo) e radia-

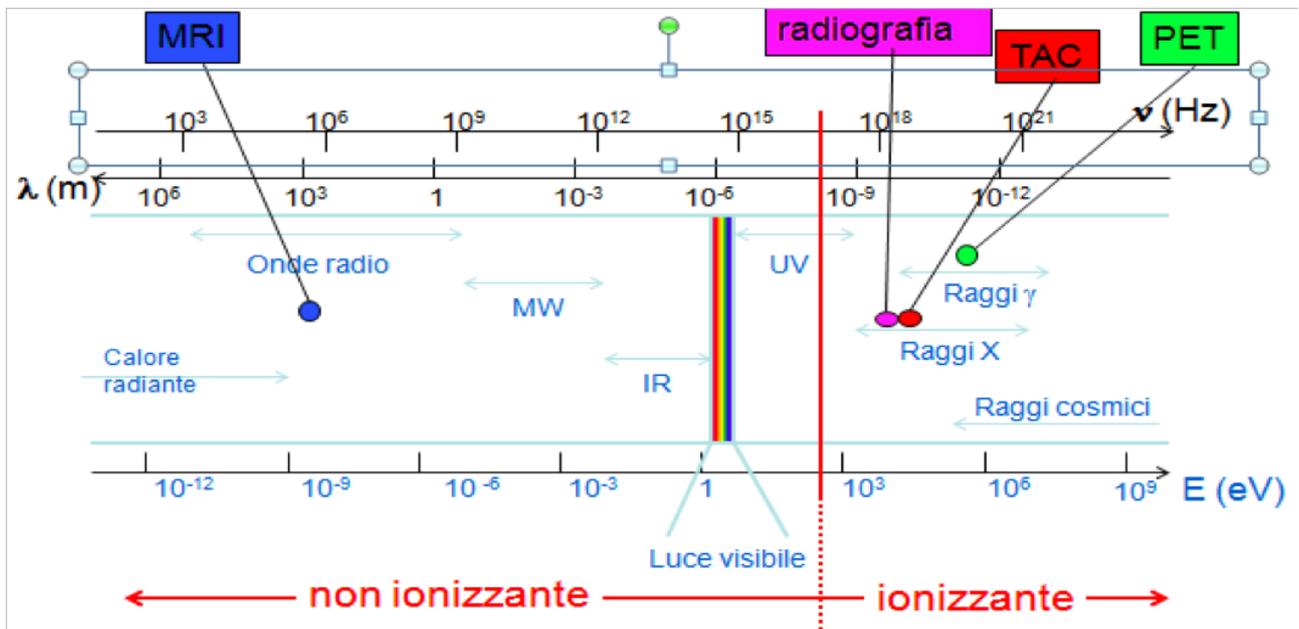


Figura 2: Lo spettro elettromagnetico delle radiazioni. Nella figura sono anche indicate dove si collocano in energia le radiazioni caratteristiche della Risonanza Magnetica (Magnetic Resonance Imaging = MRI in figura), della radiografia, della TAC e della PET. [riprodotta da [2]].

zioni non ionizzanti (non in grado di ionizzare un atomo).

L'energia minima necessaria per ionizzare un atomo dipende dall'atomo con cui interagisce, ma convenzionalmente si definiscono non ionizzanti le radiazioni la cui energia è minore di alcuni elettronvolt, mentre sono considerate radiazioni ionizzanti quelle la cui energia è superiore ad alcuni elettronvolt. Per quanto riguarda le radiazioni in campo medico, delle prime fanno parte le radiazioni della Risonanza Magnetica, delle seconde la radiazione della Radiologica convenzionale, la Tomografia Assiale Computerizzata (TAC, ora chiamata TC) la Tomografia a singolo fotone (SPECT) (si veda l'articolo di M. E. Fantacci e P. Barca in questo numero di **Ithaca**) e la Tomografia ad Emissione di Positroni (PET) (si veda l'articolo di N. Belcari, V. Rosso e G. Sportelli in questo numero di **Ithaca**). Un caso speciale è rappresentato dai raggi ultravioletti (UV) che sono indicati in ordine di energia crescente come UVA, UVB e UVC, dove gli UVB sono i raggi più nocivi per la salute dell'uomo in grado di causare il melanoma, tumore della pelle, di cui si stima una crescita della sua incidenza nel mondo occidentale di alcuni percento all'anno. I raggi UVC sono invece in massima parte assorbiti dall'atmosfera.

Lo sviluppo della Radiologia e della Radioterapia

Dalle lastre fotografiche alla TC

La scoperta dei raggi X fu una pietra miliare per la diagnosi medica e più propriamente segno la nascita della cosiddetta Diagnostica per Immagini: *Seeing is Believing*. La disciplina della Radiologia era nata nel 1895 e crebbe rapidamente nel secolo XX. Dopo le iniziali lastre fotografiche, all'inizio del '900 furono introdotti gli schermi al fosforo (Radioscopia), e attorno agli anni '70 gli intensificatori di immagine. Negli anni '80 si sviluppò la radiografia digitale con l'avvento degli schermi digitali e con l'invenzione della TC, che è divenuta ormai un insostituibile mezzo diagnostico per molte patologie ed in particolare per la diagnostica, la stadiazione ed il *follow-up* delle forme tumorali.

L'apparato che viene utilizzato nelle radiografie si basa su una sorgente di raggi X, il cosiddetto tubo radiogeno, contrapposto a un rivelatore di radiazione. L'immagine radiografica si forma a causa delle diverse attenuazioni che i raggi X subiscono nell'attraversare il corpo del paziente in esame. L'esame radiografico fornisce le informazioni morfologiche, ovvero sulla forma e la struttura interna del corpo umano.

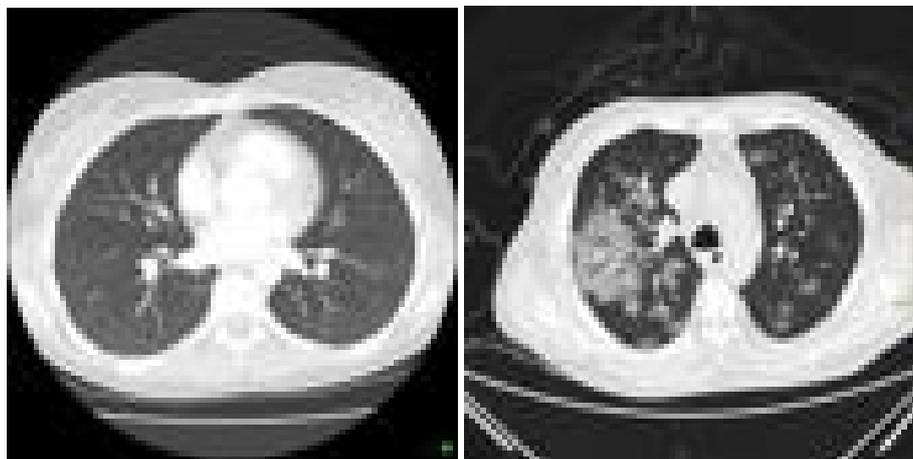


Figura 3: a) TC di un paziente con i polmoni sani [Gaillard, F. Normal chest CT - lung window. Case study, Radiopaedia.org. (accesso al sito: 02 Ottobre 2021) <https://radiopaedia.org/cases/8095/>]; b) TC di un paziente con una emorragia diffusa [Teixeira, A. Diffuse pulmonary hemorrhage. Case study, Radiopaedia.org (accesso al sito: 02 Ottobre 2021) <https://radiopaedia.org/cases/>].

Conoscendo le proprietà di attenuazione dei tessuti, si può ottimizzare l'energia dei raggi X per ottenere le informazioni a cui siamo interessati: per esempio, energie più basse per avere un'immagine dei tessuti molli (muscolo, ghiandole, tessuto adiposo) e più alte per i tessuti ossei. La ricerca dell'energia ottimale ha portato anche all'utilizzo sperimentale di sorgenti di luce di sincrotrone, in grado di fornire raggi X di una sola energia e a sorgenti a tubo radiogeno quasi-monocromatiche.

Anche nel caso del rivelatore di raggi X si sono avuti notevoli progressi: si è passati dalla lastra fotografica, a rivelatori in grado di fornire immagini digitali. Infatti, oggi si parla di Radiologia Digitale. La possibilità di avere l'immagine in forma digitale permette l'utilizzo di algoritmi per la localizzazione automatica di dettagli di interesse clinico: questi sistemi, chiamati originariamente CAD (Computer Aided Detection) ed ora AI (Artificial Intelligence), affiancano i radiologi, ad esempio, nella lettura delle mammografie per la ricerca delle lesioni e delle micro-calcificazioni.

Il limite della radiografia risiede nel fatto che l'immagine che si ottiene è una proiezione bidimensionale della reale struttura tridimensionale. Quindi l'attenuazione è la somma delle attenuazioni di tutti i tessuti attraversati, e la rappresentazione morfologica è mediata da queste sovrapposizioni. Per visualizzare la reale struttura tridimensionale bisogna ricorrere alla

tecnica diagnostica della Tomografia Assiale Computerizzata (TAC), più recentemente chiamata TC. In questa tecnica il tubo radiogeno e il rivelatore ruotano attorno al corpo del paziente, acquisendo successive proiezioni bidimensionali, che verranno poi elaborate da un computer attraverso opportuni algoritmi di ricostruzione. Le immagini tridimensionali così ottenute permettono un'analisi 3-D delle strutture sotto esame. La Figura 3 presenta una applicazione molto attuale della TC per la diagnostica del COVID-19. In Fig. 3a) è visibile la TC di un paziente sano, mentre la Fig. 3b) rappresenta la TC di un paziente con una emorragia polmonare. Sono ben evidenti le zone di infiammazione che sono tipiche della polmonite interstiziale in un paziente COVID-19.

Dai Tubi a raggi X agli acceleratori di particelle

Il principio fisico alla base della radioterapia è l'interazione delle radiazioni con il tessuto attraversato (si veda l'articolo di G. Co' in questo numero di **Ithaca**). Lo scopo della radioterapia è di distruggere le cellule tumorali, risparmiando le cellule sane. I raggi X furono il primo tipo di radiazione che venne utilizzato per la radioterapia sin dal 1896. In maniera estremamente semplificata, i raggi X vengono concentrati nelle zone malate dove interagiscono con il tessuto, mediante effetto fotoelettrico, Compton e produzione di coppie. Nell'effetto fotoelettrico il fotone

è catturato nel nucleo e l'energia assorbita viene rilasciata con la ionizzazione dell'atomo che emette un elettrone (preferibilmente dei livelli più vicini al nucleo). Nell'effetto Compton in la ionizzazione dell'atomo avviene per diffusione elastica tra fotone ed elettrone. La produzione di coppie di un elettrone e della antiparticella dell'elettrone (il positrone) avviene per interazione dei fotoni con l'intenso campo elettromagnetico del nucleo.

La grandezza fondamentale in radioterapia è la dose e la disciplina che se ne occupa si chiama Dosimetria. La **dose** è definita come l'energia depositata dalla radiazione nel mezzo (DE) per unità di massa (Dm). Si indica con D e si misura in Gray (Gy) [7], con l'energia misurata in Joule e la massa in kg: $D = DE/Dm$. Nell'interazione con il tessuto umano si deve tener conto anche della risposta biologica del tessuto rappresentata dalla Relative Biological Effectiveness (RBE), che è un numero puro variabile tra 1 (per raggi X) e 20 (per particelle pesanti) a secondo del tipo di radiazione. Il prodotto della dose per il coefficiente RBE dà la dose equivalente De ($De = D \cdot RBE$), che si misura in Sievert (Sv) (si veda l'articolo di G. Co' in questo numero di **Ithaca**).

Nella radioterapia siamo passati dai tubi a vuoto di alta energia (fino a 300 keV), agli acceleratori di elettroni dove i fotoni di 10-20 MeV sono prodotti per *bremstrahlung* dagli elettroni accelerati su bersagli di tungsteno. Le tecniche di radioterapia con raggi X si sono evolute negli anni con lo scopo ben preciso di aumentare il danno alle cellule tumorali ed il mantenimento delle cellule sane: la Radioterapia IMRT (*Intensity Modulated Radiation Therapy*), la Radioterapia Conformazionale e molto recentemente la Radioterapia FLASH, (si veda l'articolo di M. G. Bisogni e F. Di Martino in questo numero di **Ithaca**).

Recentemente sono stati utilizzati gli acceleratori (ciclotroni e sincrotroni) di particelle cariche pesanti (protoni e ioni). La tecnica che usa particelle pesanti come proiettili per la distruzione delle cellule tumorali viene indicata con il nome di Adroterapia (si veda l'articolo di M. Dosanjh, M. Necchi, A. Degiovanni, E. Benedetto in questo numero di **Ithaca**). In questo caso la perdita di energia nell'attraversare il tessuto è dovuta

alla collisione degli adroni con gli atomi ed alla loro conseguente ionizzazione. Gli elettroni liberi interagiscono quindi con le cellule operando la rottura del DNA secondo lo stesso processo mediato dall'elettrolisi dell'acqua.

In Italia, esistono due centri che praticano l'adroterapia per usi clinici: l'ospedale di Trento (protoni), CATANA (Centro di Adroterapia ed Applicazioni Nucleari Avanzate) presso Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) (protoni), che è specializzato per il trattamento dei tumori dell'occhio ed il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO) di Pavia (protoni e ioni di Carbonio). Proposta originariamente da Enrico Fermi, esiste anche la tecnica di irraggiamento dei tumori con i neutroni, ma i risultati ottenuti non sono stati per ora ritenuti sufficienti per introdurla come una tecnica radioterapica in campo ospedaliero.

La scoperta del fenomeno della Radioattività

Le scoperte di Henri Becquerel e di Pierre e Maria Curie

Nel 1896 Henri Becquerel si occupava dei fenomeni di luminescenza e fosforescenza di alcuni materiali e, venuto a conoscenza dei raggi X scoperti da Röntgen, decise di investigare se ci fosse una qualche connessione. Durante i suoi esperimenti con sali di uranio una minima quantità di sali si trovò molto vicino a lastre fotografiche. Nonostante queste lastre fossero schermate dalla luce vennero impressionate. Becquerel ipotizzò che raggi emessi dai sali di uranio fossero in grado di penetrare il contenitore delle lastre e quindi avere un effetto simile a quello dei raggi X: aveva scoperto il fenomeno della radioattività.

Pierre e Maria Curie proseguirono gli studi di Becquerel, scoprendo che anche altri elementi, come il torio, il polonio, il radio, avevano le stesse proprietà. Chiamarono tale fenomeno **radioattività** e le sostanze che lo manifestavano sostanze radioattive (da radium=raggio). Per la prima volta individuarono e separarono tre tipi di particelle che potevano venire emesse in un processo radioattivo: le particelle di carica positiva, di carica negativa e di carica nulla. Nel-

l'ordine le nominarono come le prime 3 lettere dell'alfabeto greco: alfa (α), beta (β) e gamma (γ). La scoperta della radioattività naturale e della radiazione α , β e γ da parte di Henri Becquerel, Pierre e Maria Curie sancisce il passaggio dalla Fisica Atomica alla Fisica Nucleare.

Il decadimento Radioattivo

La materia è composta da atomi (dal greco *átomos*, cioè indivisibile), di dimensioni pari a circa 10^{-10} m (= 1 Ångstrom). Le attuali conoscenze hanno permesso di abbandonare l'ipotesi di indivisibilità dell'atomo, avanzata dalla teoria atomistica dei filosofi greci Leucippo e Democrito: sappiamo ora che l'atomo è costituito da un nucleo, dotato di carica elettrica positiva, e da un guscio (*shell*) di elettroni, dotati di carica negativa. Nella materia ordinaria, in assenza di perturbazioni, le cariche elettriche del nucleo e degli elettroni sono tali da compensarsi a vicenda: l'atomo risulta quindi elettricamente neutro. Le differenze osservabili macroscopicamente tra le varie sostanze, sono dovute alle differenti proprietà delle specie atomiche che le costituiscono, come la carica elettrica del nucleo, la massa e il raggio atomico.

La massa dell'atomo è quasi totalmente concentrata nel nucleo. Le dimensioni caratteristiche del nucleo atomico sono dell'ordine di 10^{-15} m (= 1 Fermi = 1 femtometro \equiv 1fm); poiché l'atomo ha dimensioni tipiche di 10^{-10} m, si deduce che la maggior parte del volume occupato dall'atomo è costituito dal vuoto. Il nucleo è a sua volta costituito da protoni, dotati di carica elettrica positiva, e da neutroni, elettricamente neutri. Il numero di protoni nel nucleo di una determinata specie atomica si indica con la lettera Z , e prende il nome di numero atomico; il numero di neutroni viene invece indicato con la lettera N . Si definisce numero di massa, e si indica con la lettera A , la somma del numero di neutroni e protoni contenuti nel nucleo:

$$A = Z + N \quad \text{Numero di massa.}$$

Gli atomi con uguale numero atomico, ma con un diverso numero di neutroni, vengono chiamati **isotopi**. Isotopi diversi dello stesso elemento hanno uguali proprietà chimiche, poiché han-

no un uguale numero di elettroni, ma le loro proprietà fisiche sono generalmente diverse.

Convenzionalmente, per una generica specie atomica X caratterizzata da numero atomico Z , l'isotopo con numero di massa A viene rappresentato con il simbolo A_ZX . Spesso il pedice Z viene omissivo, in quanto il numero atomico è univocamente determinato dal simbolo chimico dell'elemento. Ad esempio, i principali isotopi dell'idrogeno sono ${}^1\text{H}$ (idrogeno), ${}^2\text{H}$ (deuterio) e ${}^3\text{H}$ (trizio). Elementi con uguale A e con diverso Z vengono invece chiamati **isobari**.

La massa di un atomo è approssimativamente uguale alla somma delle masse delle particelle che lo costituiscono:

$$M_{\text{atomo}}(A, Z) \simeq Zm_p + Nm_n + Zm_e^- ,$$

dove m_p è la massa del protone, m_n la massa del neutrone ed m_e^- la massa dell'elettrone. Nell'equazione precedente, l'approssimazione deriva, principalmente, dall'aver trascurato il contributo dell'energia di legame di protoni e neutroni nel nucleo. A questo proposito si ricordi l'equazione di Einstein, $E = mc^2$, che esprime la relazione tra massa ed energia. Essendo la massa dell'elettrone circa 1/2000 la massa di nucleone (protone o neutrone), la massa dell'atomo è quasi completamente concentrata nel nucleo. La massa atomica viene misurata con una speciale unità, l'unità di massa atomica (**amu** dall'acronimo inglese *Atomic Mass Unit*), o Dalton (**Da**). Per convenzione, 1 amu è uguale alla dodicesima parte della massa atomica del carbonio-12: 1 amu = 1 Da = (1/12) $M_C(12,6)$.

Gli elementi che si trovano in natura possono essere stabili o instabili. Un atomo è stabile se il suo nucleo non subisce trasformazioni spontanee. Ciò significa che, in un atomo stabile, il numero di protoni e neutroni contenuti nel nucleo rimane immutato nel tempo, a condizione che esso non venga bombardato con radiazioni tali da poter indurre delle trasformazioni nucleari.

Esistono in natura anche atomi instabili, in cui il nucleo subisce spontaneamente delle trasformazioni. Tali trasformazioni nucleari spontanee vengono chiamate decadimenti. I decadimenti nucleari sono sempre accompagnati dall'emissione di qualche forma di radiazione; per questo motivo gli elementi instabili vengono anche detti

radioattivi e questo fenomeno è stato chiamato radioattività da Marie Curie. In seguito ad una o più trasformazioni, un nucleo radioattivo decade sempre in un nucleo stabile, che può appartenere ad una specie chimica uguale o differente da quella iniziale.

Il decadimento nucleare è un fenomeno probabilistico. Non è possibile determinare l'istante in cui un dato nucleo instabile subirà una trasformazione, ma è possibile descrivere quantitativamente l'evoluzione temporale di un insieme molto grande di nuclei mediante la seguente legge del decadimento radioattivo (Figura 4):

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

dove N_0 rappresenta il numero di nuclei radioattivi contenuti nel materiale (campione) considerato ad un dato istante iniziale $t_0 = 0$; $N(t)$ rappresenta il numero di nuclei radioattivi contenuti nel campione dopo un tempo t dall'istante iniziale, ovvero, il numero di nuclei che al tempo t non ha ancora subito alcuna trasformazione; λ è la costante di decadimento, che rappresenta il numero medio di decadimenti nucleari che avvengono nell'unità di tempo.

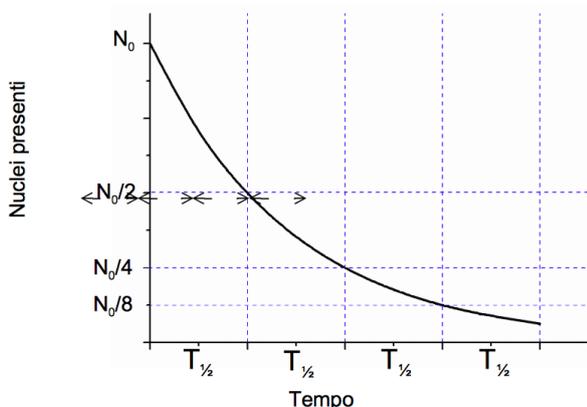


Figura 4: Legge del decadimento radioattivo. $T_{1/2}$ indica il tempo di dimezzamento, cioè il tempo necessario affinché metà dei nuclei radioattivi siano decaduti (riprodotta da ref. [2]).

La costante λ è una caratteristica di ogni isotopo radioattivo (radioisotopo), e non dipende dalla quantità di materia contenuta nel campione radioattivo in esame. Ha le dimensioni dell'inverso di un tempo, e si misura quindi in s^{-1} . L'equazione precedente esprime in formule il seguente concetto: il numero di nuclei non trasformati, contenuti in un dato campione di mate-

riale radioattivo, diminuisce esponenzialmente nel tempo. Utilizzando la definizione tradizionale di media statistica si mostra che la vita media è $\tau = 1/\lambda$.

La vita media indica il tempo medio che intercorre tra la produzione (sia essa naturale o artificiale) e il decadimento di un dato nucleo radioattivo. Questo tempo varia sensibilmente da isotopo a isotopo, e può assumere valori compresi tra frazioni di secondo e miliardi di anni.

Un'altra quantità utilizzata frequentemente, strettamente correlata alla vita media, è il **tempo di dimezzamento**, o **emivita**, indicato con $t_{1/2}$, che indica il tempo necessario ad avere un dimezzamento del numero di nuclei radioattivi contenuti nel campione:

$$t_{1/2} = \tau \log_e 2$$

Si definisce attività del campione il numero medio di decadimenti nucleari che avvengono in esso nell'unità di tempo. In accordo con la definizione, l'attività coincide con il tasso di variazione (cioè la derivata) di $N(t)$, cambiata di segno:

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t)$$

L'unità di misura dell'attività è il Becquerel (Bq). Un'attività di 1 Bq corrisponde ad una trasformazione nucleare (disintegrazione) al secondo. Un'altra unità di misura dell'attività, di interesse storico ma ancora molto utilizzata, è il Curie (Ci), definito come l'attività di 1 g di radio-226. La conversione tra Bq e Ci è ottenuta mediante la seguente equivalenza: $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

Esistono vari tipi di decadimento nucleare. Il decadimento α consiste nell'espulsione spontanea di particelle α da parte di nuclei pesanti, caratterizzati da un eccesso di protoni. Una particella α è una particella pesante carica positivamente, formata da due protoni e due neutroni: è un nucleo di ^4He . Alcuni esempi di radionuclidi α -emittenti sono ^{226}Ra , ^{222}Rn e ^{210}Po .

I decadimenti β^- e β^+ consistono rispettivamente nell'emissione di un elettrone (e^-) e di un positrone (l'antiparticella dell'elettrone positivo, indicato con e^+) da parte di un nucleo. Alcuni elementi che subiscono il decadimento β sono

$^{90}\text{Sr} (\beta^-)$ e $^{18}\text{F} (\beta^+)$.

Il decadimento γ consiste nell'emissione di un fotone da parte del nucleo che si trova in uno stato eccitato. I fotoni emessi nel decadimento γ sono fisicamente indistinguibili dai fotoni (o più comunemente raggi) X, sebbene questi ultimi vengano prodotti da processi di diseccitazione degli elettroni atomici anziché da diseccitazioni nucleari. I fotoni X hanno energie generalmente più basse rispetto ai fotoni γ ; tuttavia la distinzione tra fotoni di tipo X o γ si basa solo sul meccanismo con cui essi sono stati generati (atomico o nucleare), e non sull'energia da essi trasportata.

La Medicina Nucleare: la scintigrafia e la SPECT

La scintigrafia è stata la prima tecnica che ha permesso la misura in vivo della concentrazione locale di radiofarmaci negli organi/tessuti da esaminare ed ha dato vita alla disciplina della Medicina Nucleare [3]. In breve, i radiofarmaci vengono marcati con radioisotopi emettenti raggi γ . Il radiotracciante viene iniettato nel paziente e si diffonde fisiologicamente all'interno dell'organismo: la distribuzione dell'attività del radioisotopo è proporzionale alla concentrazione del farmaco. Dalla distribuzione e concentrazione del farmaco si ricavano informazioni fisiologiche e patologiche di tipo quantitativo. (si veda l'articolo di G. Pascali in questo numero di **ithaca**).

Per rivelare i raggi γ viene convenzionalmente utilizzato uno scintillatore piano, come ad esempio lo ioduro di sodio ($\text{NaI}(\text{TI})$) che viene posizionato sopra la zona del corpo umano che si vuole esaminare, ad esempio per effettuare una scintigrafia cardiaca o renale. Tra il paziente ed il rivelatore si interpone un collimatore a molti fori paralleli, tipicamente di piombo, per assicurare una risoluzione spaziale nell'immagine dell'ordine del cm. L'insieme dello scintillatore e del collimatore viene convenzionalmente chiamato gamma-camera. Le dimensioni della gamma-camera possono non essere sufficienti a coprire interamente la zona di interesse per alcuni esami, ad esempio nel caso della scintigrafia ossea per la ricerca di metastasi. Viene allora operata una scansione assiale. In un certo senso la scintigrafia è analoga alla radiologia planare, in

quanto produce una immagine bidimensionale di una distribuzione 3-D.

Per poter recuperare la tridimensionalità è stata inventata la *Single Photon Emission Computed Tomography* (SPECT), che non è altro che una rotazione del rivelatore attorno al paziente in maniera analoga a quanto viene fatto con la TC. Mentre nella TC la sorgente dei raggi è esterna al corpo umano e ruota assieme al rivelatore, nella SPECT la sorgente di raggi γ è interna al corpo umano ed è solo la gamma-camera, ossia l'insieme scintillatore-collimatore, che ruota attorno al paziente. Opportuni algoritmi di ricostruzione permettono poi di ottenere l'immagine 3-D.

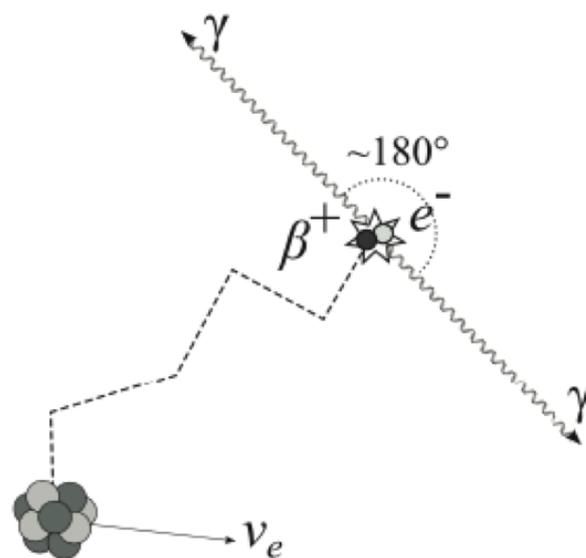


Figura 5: Schematizzazione del processo fisico alla base della PET (adattata dalla ref. [3]).

La PET

Nel 1932 Carl David Anderson, utilizzando una camera a nebbia, scopre l'anti-elettrone (il positrone) previsto dall'equazione di Dirac. Si dimostra così l'esistenza dell'antimateria. Nel 1933 E. Fermi formula la teoria del decadimento β e chiama neutrino la nuova particella neutra ipotizzata da Pauli. Il fenomeno elementare è il decadimento del neutrone in protone, elettrone e neutrino. Queste due scoperte sono alla base della Tomografia ad Emissione di Positroni, chiamata PET, che è l'acronimo della definizione anglosassone (*Positron Emission Tomography*). La tomografia a emissione di positroni è nata 70 anni fa, quando Wil-

liam Sweet presentò la prima idea preliminare della PET in occasione dell'inaugurazione del Research Building del Massachusetts General Hospital il 16 maggio 1951.

La PET [4] è una tecnica di *imaging* in cui un radiotracciante che contiene un radioisotopo, che decade mediante decadimento β^+ (emissione di un positrone), viene iniettato nel paziente e si diffonde fisiologicamente all'interno dell'organismo: analogamente alla scintigrafia e alla tecnica SPECT, la distribuzione dell'attività del radioisotopo è proporzionale alla concentrazione del farmaco. Dalla distribuzione e concentrazione del farmaco si ricavano informazioni fisiologiche e patologiche di tipo quantitativo. Il positrone emesso si annichila con un elettrone nel tessuto, producendo così due fotoni 511 keV a 180° . Questi due fotoni vengono rilevati in coincidenza temporale utilizzando coppie opposte di rivelatori (Figura 5). L'immagine 3D della distribuzione dell'attività è ottenuta mediante algoritmi di ricostruzione analitica e/o statistica.

Per avere i radioisotopi adeguati da utilizzare nelle applicazioni mediche era necessario inventare un acceleratore adatto per produrre i cosiddetti radioisotopi fisiologici come ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O e ^{18}F che sono gli emettitori β^+ più utilizzati nella PET. L'acceleratore comune utilizzato è il ciclotrone, inventato da Ernest Orlando Lawrence nel 1939. Il passo successivo è stato compiuto da Gyorgy Hevesy che dimostrò il principio di un radiotracciante, ovvero che

"il cambiamento di un atomo in una molecola con il suo radioisotopo non cambierà in modo significativo il suo comportamento chimico e biologico".

Sulla base di questo principio il movimento, la distribuzione e la concentrazione di una molecola possono essere misurati caricando la molecola con un radioisotopo e rilevando il prodotto del suo decadimento β^+ . La disponibilità di un rivelatore di fotoni appropriato è un altro passo fondamentale per la tecnica PET e questa lacuna è stata colmata dall'invenzione dello scintillatore inorganico NaI:Tl fatta da Robert Hofstadter. Per produrre le immagini 3D la PET si avvale dei principi di ricostruzione descritti teoricamente da Radon, la cosiddetta trasformata di Radon [5]. Questo metodo di ricostruzione dell'imma-

gine è lo stesso utilizzato da Godfrey N. Hounsfield e Allan M. Cormack, per lo sviluppo della tomografia assistita da computer (TC).

La Disciplina della Radioprotezione

Dosimetria delle radiazioni

Le radiazioni ionizzanti si suddividono in radiazioni direttamente ionizzanti, quando l'interazione provoca un processo continuo di ionizzazione (elettroni, protoni, particelle alfa, ...) e radiazioni indirettamente ionizzanti quando il processo continuo di ionizzazione è preceduto da un'interazione primaria che dà luogo ad una particella direttamente ionizzante. Esempio di radiazioni indirettamente ionizzanti sono i raggi X, i raggi γ , neutroni ...

Le radiazioni direttamente ionizzanti interagiscono con gli elettroni della materia che attraversano fino a perdere tutta la loro energia: il percorso attraversato prima di fermarsi si chiama range. Ad esempio:

- un elettrone con una energia di 2 MeV, tipica di un decadimento radioattivo β , perde tutta la sua energia in 1 cm di acqua,
- una particella α della stessa energia, tipica di un decadimento radioattivo α , perde tutta la sua energia in alcune decine di millesimi di millimetro di acqua (alcune decine di micron): lo spessore di un foglio di carta.

Se invece si considera un raggio X o un raggio γ , come quello prodotto in un decadimento radioattivo γ , il raggio X o γ perde la sua energia mediante interazioni isolate con la materia dove in un'unica interazione viene depositata la maggior parte della sua energia. Quindi non si può parlare di range, ma piuttosto si parla di assorbimento (o attenuazione) dell'intensità del fascio. Anche in questo caso la legge rappresentativa dell'attenuazione in funzione dello spessore del materiale attraversato è di tipo esponenziale decrescente (Figura 6) e si introduce il termine spessore di dimezzamento o spessore equivalente ($H_{1/2}$), che indica lo spessore attraversato il quale l'intensità del fascio si è ridotta alla metà.

La quantità fisica responsabile di cambiamenti fisici e/o chimici in un materiale su cui interagi-

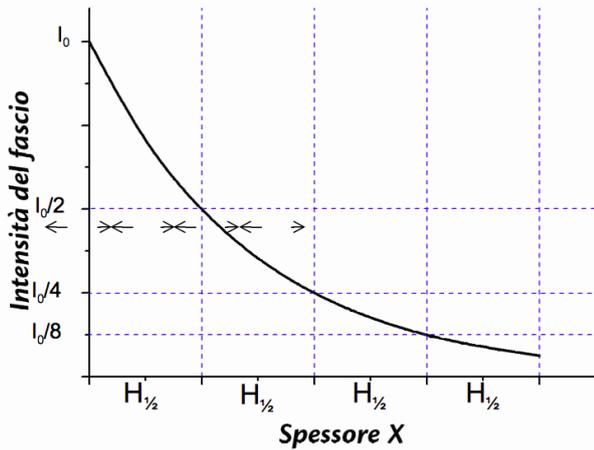


Figura 6: Legge dell'attenuazione dei raggi X in funzione dello spessore di materiale attraversato. $H_{1/2}$ indica lo spessore di dimezzamento, cioè lo spessore necessario affinché l'intensità del fascio di raggi X sia dimezzata. (riprodotta da ref. [2]).

sce la radiazione è la dose (D) e si misura in Gray. Se si tiene conto della natura della radiazione e quindi delle specifiche interazioni che avvengono nell'attraversamento della materia biologica si introduce il concetto di dose equivalente misurata in Sievert (Sv). Nel caso di raggi X e γ la dose e la dose equivalente sono numericamente uguali; nel caso di particelle cariche e neutroni, la dose equivalente può essere numericamente maggiore della dose anche di un fattore 20. Per la dosimetria su esseri viventi è quindi essenziale specificare non solo la perdita di energia, ma anche il tipo di radiazione. Inoltre, per quanto riguarda l'uomo è anche necessario indicare l'organo con cui la radiazione interagisce, perché ciascun organo ha una sensibilità diversa alle radiazioni (si veda l'articolo di G. Co' in questo volume di **Ithaca**).

La Radioprotezione

Subito dopo la scoperta dei raggi X da parte di Röntgen, si intuì come le radiazioni potessero essere utili per trattare forme tumorali solide, ma non fu immediatamente evidente che potessero essere pericolose per l'induzione di effetti nocivi sull'organismo. Infatti, nei primi anni del Novecento, la sostanza radioattiva più diffusa, il Radio, veniva promosso su larga scala come cura di tutti i disturbi, dal cancro alla calvizie. Addirittura, il Radio veniva aggiunto in apprezzabili quantità in centinaia di prodotti commerciali per



Figura 7: Manifesto dei primi del Novecento che promuoveva il Radio come cura di innumerevoli malattie.



Figura 8: Eben Beyers, campione dell'US Open di golf, che faceva da Testimonial del Radithor (riprodotta da [2]).

la salute e la bellezza (Figura 7). È rimasto famoso il caso di Eben Beyers, campione dell'US Open di golf, che beveva tre bottigliette di Radithor (una bevanda con l'aggiunta di Radio) al giorno per tre anni e che morì nel 1932 a causa della radionecrosi della mandibola e del cranio dovuta a danno da radiazioni (Figura 8). Anche in seguito a questo evento ed ai numerosi casi di danno da radiazione su radiologi e pazienti, il Radio fu messo al bando come prodotto commerciale.

Si capì presto che le radiazioni potevano causare disturbi all'essere umano che andavano dalla dermatite cutanea fino al cancro; ad esempio, in un periodo di un anno (1/1896-12/1896), sono stati documentati 23 casi di dermatite da radiazioni e in tre anni (1911-1914) sono stati segnalati 252 casi di cancro indotto da radiazioni (54 decessi). Molte preoccupazioni furono sollevate dai radiologi; molti di loro avevano subito gli effetti dannosi delle radiazioni. Al Congresso Internazionale di Radiologia del 1928, fu istituita la Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica (ICRP). Questa commissione ha emesso le prime raccomandazioni per l'uso sicuro delle radiazioni in medicina. Nasce così la nuova disciplina della **Radioprotezione**.

Gli effetti biologici delle radiazioni non sono dovuti all'aumento di temperatura causato dal rilascio locale di energia, come uno potrebbe credere alla luce di eritemi ed eventuali bruciate da radioterapia. Infatti, una seduta tipica di radioterapia provoca nella zona irraggiata un aumento di temperatura di circa un millesimo di grado! Gli effetti sono dovuti all'interazione della radiazione con il DNA cellulare e la sua rottura. Il processo primario di interazione della radiazione avviene nell'acqua del tessuto umano con la ionizzazione della molecola d'acqua in idrossido (OH^-) e ione di Idrogeno (H^+). L'idrossido OH^- è il classico radicale libero che si lega all'elica del DNA e ne provoca la rottura. Le alterazioni cellulari possono essere tali che la cellula muore (effetto cercato nella radioterapia) o tali che la cellula è in grado di riparare il danno. In alcuni casi, soprattutto quando si ha una doppia rottura dell'elica del DNA, può accadere che la cellula ripari il danno, ma lo ripari male provocando una modificazione cellulare (mutazione), che non è altro che una prima cellula tumorale. Il passaggio da una singola cellula ad un eventuale tumore è un processo molto complesso e dipendente da molti fattori biologici e genetici. Bisogna infatti considerare che mutazioni spontanee (non indotte cioè da radiazioni esterne) sono frequenti negli esseri viventi, che però hanno il sistema immunitario in grado di controllarle e distruggerle.

Nonostante vi siano varie teorie anche discordanti, la radioprotezione assume la versione più

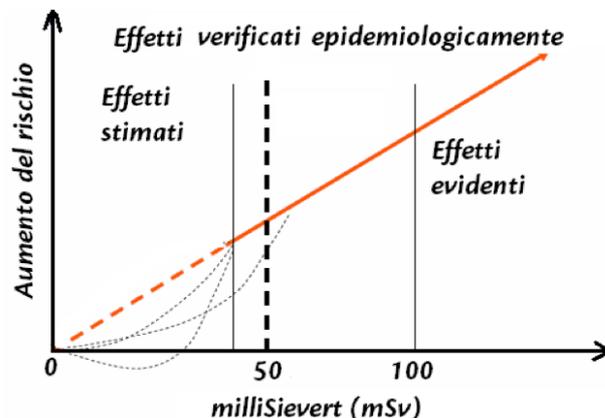


Figura 9: Andamento del Rischio di effetti gravi sulla salute dell'uomo in funzione della dose di radiazione. (Le curve tratteggiate sono andamenti di teorie non lineari) (riprodotta da ref. [2]).

conservativa e più sicura per la popolazione: che cioè il rischio di induzione di un effetto nocivo grave sia proporzionale alla dose efficace ricevuta. Non esiste quindi rischio nullo per la radioprotezione; non esiste una dose limite al di sotto della quale la radiazione può essere considerata sicura (Figura 9). La relazione tra rischio e dose efficace, cioè la pendenza della retta, è basata sui dati dei sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki, su studi epidemiologici collegati all'utilizzo medico delle radiazioni (soprattutto per programmi di *screening*), su modellistica su animali e sulle conseguenze di incidenti nucleari quali Chernobyl e Fukushima.

Conclusioni

Le applicazioni delle radiazioni alla diagnostica per immagini [7] e alla radioterapia sono molteplici e forniscono sia informazioni morfologiche che fisiologiche/funzionali e trattamenti tumorali. La loro diffusione è dovuta non solo alle grandi scoperte degli scienziati, ma anche allo sviluppo delle tecnologie più avanzate e dei rivelatori di radiazioni, anche provenienti da altre applicazioni [8]. Le tre discipline corrispondenti (Radiologia, Medicina Nucleare e Radioterapia) tendono sempre di più a collegarsi anche dal punto di vista tecnologico usufruendo di più tecniche sequenzialmente o contemporaneamente: esempi caratteristici sono la PET/CT, la SPECT/CT che sono ormai presenti nelle strutture ospedaliere come strumentazione integrata. Con l'avvento

della Risonanza Magnetica (RM) che si avvale di radiazioni non ionizzanti nel mondo della diagnostica, non solo si sono aperti degli scenari nuovi per lo studio della morfologia e della funzionalità degli organi, ma si stanno sviluppando i sistemi integrati RM/PET che hanno la possibilità di fornire contemporaneamente informazioni morfologiche sui tessuti molli (RM) e funzionali (PET) degli organi. È lecito immaginare che in un prossimo futuro le integrazioni fra le varie discipline saranno ancora maggiori, come ad esempio la radioterapia guidata in tempo reale dalla RM o la terapia metabolica guidata in tempo reale dalla PET. È interessante ricordare che questo processo di una diagnostica e terapia sempre più perfezionata e ottimizzata su ciascun paziente fa parte del grande scenario della medicina personalizzata, che sarà il *target* principale di questo secolo.

Tutto ciò non sarebbe potuto accadere senza le scoperte di Fisica atomica/nucleare e di Chimica nucleare della fine dell'Ottocento e inizi del Novecento e lo sviluppo delle tecnologie matematiche, informatiche e ingegneristiche con la costruzione di nuova strumentazione. A supporto di questi eccezionali sviluppi in Tabella 1 è presentata una lista non esaustiva di scienziati che hanno conseguito il premio Nobel la cui motivazione è strettamente legata con le tematiche di diagnostica per immagini e radioterapia.



- [1] F. Nüsslin: *Wilhelm Conrad Röntgen: The scientist and his discovery*, *Physica Medica- EJMP*, 79 (2020) 65.
- [2] A. Del Guerra, *Le radiazioni e la salute dell'uomo*, in: "Scienze per la pace. Per un mondo libero dalle armi nucleari". A cura di Enza Pellecchia, vol.43 (2016), 357.
- [3] *Fondamenti di Medicina Nucleare* A cura di Duccio Volterrani, Paola Anna Erba, Giuliano Mariani. Springer-Verlag Italia, Milano (2010).
- [4] A. Del Guerra, N. Belcari, M Bisogni: *Positron Emission Tomography: Its 65 years*, *Rivista del Nuovo Cimento*, 39 (2016) 155.
- [5] J. Radon: *Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten*, *Reports on the Proceedings of the Royal Saxonian Academy of Sciences at Leipzig, Mathematical and Physical Section Leipzig: Teubner*, 69 (1917) 262.
- [6] A. Del Guerra, D. Panetta, *Radiation measurement*, in: *Nuclear-and Radiochemistry-Volume 2: Modern Applications*, Chapter 1, Edited by Frank Roesch. De Gruyter, Berlino (2016).

- [7] *Medical Imaging-Technology and Applications*, Chapter 1, Edited by T Farncombe and K. Iniewski. CRC press, Boca Raton FL USA (2017).
- [8] A. Del Guerra: *Ionizing Radiation Detectors for Medical Imaging*, World Scientific, Singapore (2004).

Alberto Del Guerra: nasce a Pisa il 12 settembre 1944. Nel 1968 si laurea in Fisica all'Università di Pisa con Gherardo Stoppini ed entra nel gruppo PEP (Pion Electro-Production) all'eletrosincrotrone di Frascati. Nel 1970 si trasferisce in Inghilterra per continuare le ricerche sull'elettroproduzione nel laboratorio di Daresbury. Nel 1972 diventa professore incaricato presso il corso di laurea in Scienze dell'Informazione. Nel 1976 comincia a occuparsi di fisica medica. Dirige il corso di Cultura in Fisica Sanitaria e, in seguito, fonda a Pisa la Scuola di Specializzazione in Fisica Sanitaria, la prima in Italia. Nel biennio 1981-82 è al Lawrence Berkeley Laboratory come Fulbright Scholar. Nel 1987 diventa professore ordinario e viene chiamato all'Università Federico II di Napoli. Nel 1991, Viene chiamato all'Università di Ferrara e nel 1998 rientra all'Università di Pisa. È stato presidente dell'EFOMP (European Federation of Organization of Medical Physics) e membro dell'ADCOM (Administrative Committee) della IEEE NPSS. In pensione dal 2014, è ancora coinvolto in attività di ricerca. È autore di più di 400 pubblicazioni e di numerosi capitoli di libri di Fisica Medica. È membro onorario della società di Fisica medica tedesca (DGMP), europea (EFOMP) e italiana (AIFM). È Honorary Editor della rivista scientifica *Physica Medica-EJMP*.

	FISICA	
1091	Wilhelm Conrad Röntgen	In riconoscimento dello straordinario servizio reso per la scoperta delle importanti radiazioni che in seguito presero il suo nome (raggi X)
1903	Henri Becquerel	in riconoscimento degli straordinari servizi che ha reso con la sua scoperta della radioattività spontanea
1903	Pierre Curie e Maria Skłodowska-Curie	in riconoscimento dei servizi straordinari che essi hanno reso nella loro ricerca congiunta sui fenomeni radioattivi scoperti dal professor Henri Becquerel
1904	Philipp Von Lenard	per le sue ricerche sui raggi catodici
1936	Carl David Anderson	per la sua scoperta del positrone
1939	Ernest Orlando Lawrence	per l'invenzione e lo sviluppo del ciclotrone e per i risultati ottenuti con esso, in particolare per quanto riguarda gli elementi radioattivi artificiali
	CHIMICA	
1911	Maria Skłodowska-Curie	in riconoscimento dei suoi servizi all'avanzamento della chimica tramite la scoperta del radio e del polonio, dall'isolamento del radio e dallo studio della natura e dei componenti di questo notevole elemento
1935	Frédéric Joliot e Irene Joliot-Curie	In riconoscimento della loro sintesi di nuovi elementi radioattivi
1943	Georg Karl von Hevesy	per il suo lavoro sull'utilizzo degli isotopi come traccianti nello studio dei processi chimici
	MEDICINA	
1979	Allan McLeod Cormack e Godfrey N. Hounsfield	per lo sviluppo della tomografia assiale computerizzata
2003	Paul C. Lauterbur e Peter Mansfield	per le loro scoperte sulla risonanza magnetica

Tabella 1: Lista di premi Nobel connessi all'utilizzo delle radiazioni nella Diagnostica per Immagini e nella Radioterapia e la loro motivazione ufficiale.