Zeitschrift: Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

Herausgeber: Società Svizzera Ingegneri e Architetti

Band: - (2005)

Heft: 6

Artikel: I raggi X e i raggi : fonti, effetti, applicazioni e protezione

Autor: Foglio Para, Armando

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-133248

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

I raggi X e i raggi γ: fonti, effetti, applicazioni e protezione

Armando Foglio Para*

Molti sono i punti di vista con cui può essere trattato l'argomento dei raggi X e dei raggi γ. Nel seguito ci preoccuperemo dapprima della loro definizione, che ci rimanda alla loro origine e di conseguenza al significato che la loro scoperta ha avuto nelle teorie fisiche; poi ci occuperemo degli effetti cui essi danno luogo, per illustrare come sfruttarli ed anche come poterci difendere dagli effetti lesivi delle radiazioni.

Definizione e fonti di radiazioni X e γ.

Cosa è un raggio X? Un raggio X (caratteristico) è un fotone proveniente dalla diseccitazione degli elettroni orbitanti attorno ai nuclei, quindi con energie fino a circa 120 keV, dove l'elettronVolt è l'energia usata, con i suoi multipli, per trattare i fenomeni atomici e nucleari. 1 elettronVolt (1 eV) è in effetti l'energia che assume un elettrone quando (da fermo) viene accelerato da una differenza di potenziale di 1 V. Tenendo conto della carica dell'elettrone, 1 eV risulta pari a $1.6 \cdot 10^{-19}$ Joule.

Cosa è un raggio γ? Nella definizione usuale un raggio γ è un fotone emesso dai nuclei eccitati degli atomi radioattivi con energie da pochi keV a parecchi MeV. Sono peraltro chiamate radiazioni γ anche le radiazioni provenienti dall'annichilazione dell'anti-materia, in coppie di fotoni di 511 keV nell'annichilazione di elettroni positivi e di quasi 1000 MeV nell'annichilazione di antiprotoni.

Si è riportato nelle definizioni il termine «fotone», cioè il «pacchetto» di energia elettromagnetica che descrive le due radiazioni, conferendo loro nelle interazioni un comportamento corpuscolare. I fotoni si muovono alla velocità della luce c, $3 \cdot 10^8$ m/s nel vuoto. L'energia E del fotone è collegata alla frequenza ν della trattazione ondulatoria dalla relazione $E=h\nu$, con $h=6.63 \cdot 10^{-34}$ J · s (h è la costante di Planck). I fotoni sono privi di massa e di carica elettrica, ma possiedono una quantità di moto $p=h\nu/c$ (p ed E globalmente vengono conservate nelle interazioni, confermando il comportamento corpuscolare dei fotoni). Se $h\nu=1$ keV, $\nu=2.4 \cdot 10^{17}$ Hz, quindi molto maggiore delle frequenze nel visibile (sino a 10^{15} Hz).

I raggi γ furono scoperti nel 1896 da Becquerel a seguito delle immagini lasciate su una lastra fotografica da un minerale di uranio. Lo stesso Becquerel intuì la loro similitudine con i raggi X scoperti da poco da Roentgen. In effetti raggi X e γ (come le radiazioni visibili, infrarosse ed ultraviolette) sono tutti costituenti lo spettro elettromagnetico, differendo solo per origine ed energia.

I raggi X caratteristici, provenienti dalle diseccitazioni atomiche hanno normalmente energie inferiori a quelle dei raggi γ, provenienti dalle diseccitazioni nucleari. Sono però chiamate X anche le radiazioni emesse dalle cariche elettriche accelerate (o decelerate, da cui il nome «Bremsstrahlung»). Questi raggi X sono quelli emessi nei generatori di raggi X medicali ed industriali con energie sino all'energia massima delle particelle frenate e quindi anche superiori a quella dei raggi γ usuali, come avviene ad esempio negli acceleratori per la terapia dei tumori.

Un'altra forma di radiazione elettromagnetica nell'intervallo energetico dei raggi X è la luce di Sincrotrone, radiazione emessa da elettroni circolanti negli acceleratori a motivo della loro accelerazione centripeta e simile alla Bremsstrahlung, ma in un contesto ultra-relativistico. L'effetto può essere sia indesiderato e quindi da ridurre (aumentando la circonferenza degli acceleratori sino ai 27 km del maggiore acceleratore del CERN), sia utile e quindi da aumentare (come negli impianti Elettra vicino a Trieste ed E.S.R.F. di Grenoble). L'aumento avviene facendo oscillare gli elettroni nei tratti rettilinei (con percorsi «*slalom-like*»).

In campo astronomico, sono state evidenziate recentemente con migliaia di osservazioni sorgenti γ extraterrestri: i γ-ray burst, improvvisi «flash» di fotoni gamma da direzioni diverse del cielo. I tempi di emissione sono variabili, da 0.1 a migliaia di secondi, le energie da 0.1 a 1 MeV, i flussi da 0.1 a 100 fotoni/ cm^2/s. Le prime osservazioni sono state effettuate da satelliti militari per il controllo delle esplosioni nucleari nell'atmosfera, mettendo in evidenza energie totali di emissione non compatibili con eventi terrestri. Con ulteriori osservazioni,

in particolare con il satellite «Beppo-SAX» (Satellite per Astronomia X e γ in ricordo del fisico italiano Giuseppe «Beppo» Occhialini) si sono rivelate come gigantesche esplosioni in lontanissime galassie. Distingueremo nel seguito fra radiazioni X e γ solo quando necessario per l'applicazione considerata. Ricordiamo comunque che centinaia di radionuclidi emettono radiazioni gamma. Li possiamo distinguere in:

Primordiali, se risalenti alla creazione del sistema solare, con periodi di dimezzamento di miliardi di anni. Sono ancora presenti con i loro successori a vita più breve (ad esempio Uranio-238 → · · · Radio-226 → Radon-222 · · ·). Altri nuclidi di questo tipo sono Torio-232 e Potassio-40, quest'ultimo molto diffuso, e riscontrabile sia negli alimenti che all'interno del corpo umano. La loro presenza è in effetti facilmente rivelabile nel conteggio di fondo dei rivelatori ed insieme alla radiazione cosmica contribuiscono alla dose di radiazioni.

Cosmogenici, se formati da interazioni di radiazioni cosmiche (ad esempio il Berillio-7, con dimezzamento di circa 2 mesi, 53.3 giorni, da interazioni sull'azoto e sull'ossigeno atmosferici). Il Be-7 decade quindi rapidamente ma viene continuamente riformato.

Provenienti da attività umane (per attivazione, fissione, o in genere per reazioni nucleari). Fra questi ricordiamo il Tecneto-99, molto usato nella diagnostica medica per il breve dimezzamento (6.0 ore), la energia ridotta ma adeguata allo scopo (140 keV) e l'assenza di altre radiazioni; il Cesio-137, generato in percentuale elevata nella fissione e molto usato nelle applicazioni medicali ed industriali, come pure il Cobalto-60, prodotto dal Cobalto naturale tramite cattura neutronica.

Interazioni dei raggi X e γ con la materia

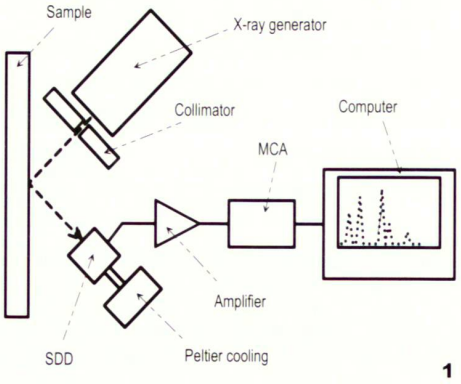
Per le energie di interesse nelle applicazioni (industriali e medicali) sino a 10 MeV, le interazioni prevalenti sono l'effetto fotoelettrico a basse energie (<1 MeV), crescente con il numero atomico del mezzo, Z, secondo Z^5; la diffusione Compton ad energie intermedie (0.5÷3 MeV), crescente con Z; la produzione di coppie e^+-e^- ad energie maggiori, crescente con Z^2. Ogni interazione è di tipo probabilistico e si esprime tramite un coefficiente lineare di attenuazione μ (cm^{-1}) funzione dell'energia e del materiale.

L'attenuazione delle radiazioni X o γ in un fascio collimato di radiazioni X o γ, di tipo probabilistico per un singolo fotone, viene descritta tramite il valore medio di molti fotoni sopravvissuti dopo lo strato «d» con la legge: $I(d) = I(0) \cdot \exp(-\mu \cdot d)$, in cui μ *cresce* linearmente con la densità del mezzo, *cresce* con il suo numero atomico Z, *decresce* con l'energia (sino a qualche MeV) per poi crescere per effetto della creazione di coppie. Per assorbire le radiazioni X o γ si usano quindi materiali ad alto Z ed alta densità (ad es. Piombo e talora lo stesso Uranio impoverito, per il trasporto di sorgenti di grande attività).

Applicazioni delle radiazioni X e γ.

L'attenuazione di un fascio di fotoni X in organi di diversa densità è alla base della radiografia medica. In maniera del tutto analoga, con radiazioni γ (ad esempio con sorgenti di Iridio-192) si ispezionano parti metalliche e saldature (radiografie industriali, senza necessità di generatori alimentati). L'attenuazione di radiazioni γ viene anche utilizzata per misure di livello di serbatoi od anche di riempimento di prodotti per la grande distribuzione.

Analisi per fluorescenza X. Nell'analisi per fluorescenza X si irraggia il campione con radiazioni (X, γ, elettroni) in grado di fare emettere le radiazioni X caratteristiche dagli elementi presenti (nell'intervallo da 1 a 30 keV) e poi si analizzano gli X emessi con un rivelatore ad alta risoluzione energetica (semiconduttore di Si o Ge) risalendo così agli elementi presenti nella superficie del campione. Analisi di questo tipo sono state effettuate su molti reperti artistici, come la Corona Ferrea, la Lupa Capitolina ecc. Sono molto utilizzate anche nelle analisi di campioni di pulviscolo atmosferico. Nelle figure 1 e 2 sono mostrati rispettivamente lo schema dell'apparato sperimentale e una fotografia raccolta durante le misure effettuate sulla Lupa Capitolina.



1

2

Fig 1 – Schema di un apparato sperimentale portatile per l'analisi di campioni tramite fluorescenza X. Il sistema comprende un generatore dei raggi X, i quali, dopo collimazione, investono una piccola zona del campione; le radiazioni X caratteristiche sono rivelate da un dispositivo al silicio dedicato (e raffreddato tramite una cella Peltier) i cui i segnali vengono amplificati e poi analizzati. Ad ogni picco sullo schermo corrisponde un particolare elemento nel campione. Tratto da «A new portable XRF spectrometer based on Silicon Drift Detector for non-destructive analyses on the cultural heritage», Carlo Fiorini, Alessandra Gianoncelli e Antonio Longoni, Politecnico di Milano.

Fig 2 – L'apparato di rilevazione posizionato in prossimità della Lupa Capitolina. Le misure su tutto il campione hanno mostrato una andamento regolare dei principali elementi presenti (Pb, Sn e Fe, in aggiunta al Cu) confutando l'ipotesi di un rifacimento successivo dell'opera originale.

Emettitori γ usati come traccianti. I nuclidi emettitori γ possono essere associati a molecole con un particolare percorso in un campione (dal corpo umano all'ambiente in generale). A motivo della elevata trasmissione delle radiazioni γ emesse, queste molecole funzionano allora come «traccianti», rivelabili all'esterno.
Se le molecole si indirizzano in modo preferenziale verso zone patologiche di un organo del corpo umano, si ha la possibilità di mappare dall'esterno queste zone (SPECT, Single Photon Emission Computerized Tomography). Allo stesso modo possiamo seguire dall'esterno il cammino di sorgenti γ in condutture, terreni, ...
La localizzazione con traccianti γ delle zone patologiche del corpo umano può essere migliorata (si riduce il fondo) se vengono emesse contemporaneamente 2 radiazioni γ in direzione opposte (e non una singola radiazione) come avviene nell'annichilazione delle particelle β^+ emesse da nuclidi con pochi neutroni. Questa metodologia viene utilizzata nella PET, Positron Emission Tomography. I nuclidi di interesse sono Carbonio-11 (con dimezzamento 20.3 min) e Fluoro-18 (con dimezzamento 110 min), in varie forme molecolari. Per il breve dimezzamento si ha la necessità di una loro produzione «in loco» (o almeno entro poche decine di km).

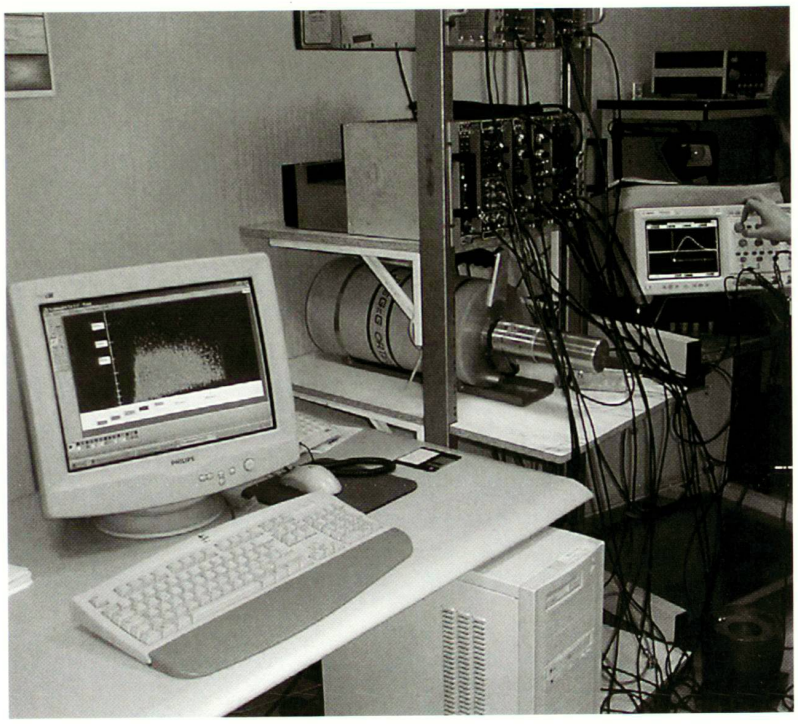


Fig 3 – Un moderno laboratorio per analisi X e g, dotato di un rivelatore portatile di Germanio iperpuro collegato ad un contenitore di azoto liquido trasportabile: l'autonomia di funzionamento è di qualche giorno. Il laboratorio è dotato di moduli elettronici per l'analisi in energia e tempo dei segnali, mentre con un oscilloscopio se ne controlla l'andamento temporale. Sul monitor in primo piano i risultati di una elaborazione dei segnali.

Altre applicazioni delle radiazioni γ. Altre applicazioni riguardano l'utilizzo della particolare forma di energia (lesiva in genere sull'organismo) connessa ad intensi fasci di radiazioni γ. Ricordiamo il trattamento post-operatorio di tumori («bombe» al Cesio e al Cobalto, sino a migliaia di curie di Cs-137 o Co-60, dove 1 curie è pari a $3.7 \cdot 10^{10}$ decadimenti/secondo o becquerel), la sterilizzazione di presìdi medicali, il trattamento di legno, plastiche, gomme (per migliorarne la durabilità) e ancora il trattamento di prodotti alimentari per aumentarne la conservazione.

Rivelazione delle radiazioni X e γ.

I rivelatori a materiale semiconduttore con altissima risoluzione utilizzati per l'analisi per fluorescenza X ed in genere quando sono sconosciute le energie di emissione di campioni incogniti, sono di gestione non semplicissima, dovendo funzionare alla temperatura dell'azoto liquido (-196°), tramite collegamento ad appositi serbatoi. Un tipico allestimento di laboratorio è mostrato in figura 3. Nelle applicazioni, le energie presenti sono spesso note e limitate, per cui non è richiesta una elevata risoluzione energetica. Si usano allora rivelatori a minore risoluzione, ad esempio a scintillazione, come lo NaI(Tl) e il «BGO» (sigla del germanato di bismuto) con alta efficienza (per volume e densità) od anche rivelatori a semiconduttore a temperatura ambiente come il CdZnTe. Quest'ultimo è usato in forma maneggevole dal chirurgo nell'operazione del tumore al seno se viene applicata la metodologia del linfonodo sentinella. Si ritiene infatti che il primo linfonodo a valle di un tumore del seno, se indenne da metastasi, possa garantire l'integrità di tutti i successivi linfonodi, evitando la loro asportazione, con vantaggi evidenti per la paziente.
Nella figura 4 si mette in evidenza la migliore risoluzione presentata dai rivelatori a semiconduttore di germanio (circa 40 volte migliore) rispetto a quelli di Ioduro di Sodio (con tracce di tallio): si può in tal modo riconoscere la presenza di una serie di «picchi» associabili a differenti nuclidi radioattivi.

Fondo naturale γ di radiazione

L'unità di misura per le conseguenze sull'uomo del fondo di radiazioni è il sievert (Sv), pari a 1 J/kg per radiazioni X e γ. Il fondo naturale γ è all'incirca costante nel mondo, attorno a 1 mSv/yr, (da 0.9 a 1.75 mSv/yr in vaste zone della Svizzera).

Ad esso si aggiungono i raggi cosmici, ma soprattutto il gas naturale Radon (che emette con i successori anche radiazioni α e β ed è molto elevato in Ticino). In effetti nel «Rapporto sulla presenza di gas Radon nelle abitazioni del Canton Ticino» , a cura del «Laboratorio Cantonale della Sanità e della Socialità» viene riportata la seguente ripartizione fra le varie sorgenti di dose: Applicazioni mediche 14%; Radiazioni. terrestri 8%; Radiazioni cosmiche; 5%; Radionuclidi naturale nel corpo umano: 5%; Altro 3%; Radon + successori: 65%.

In alcune aree popolate della Terra si osservano tuttavia alti livelli di radiazione (ad esempio in Brasile ed India) per concentrazioni elevate di minerali radioattivi nel suolo (Torio ed Uranio), sino a decine di volte in più del fondo usuale, peraltro senza danni evidenti per le popolazioni.

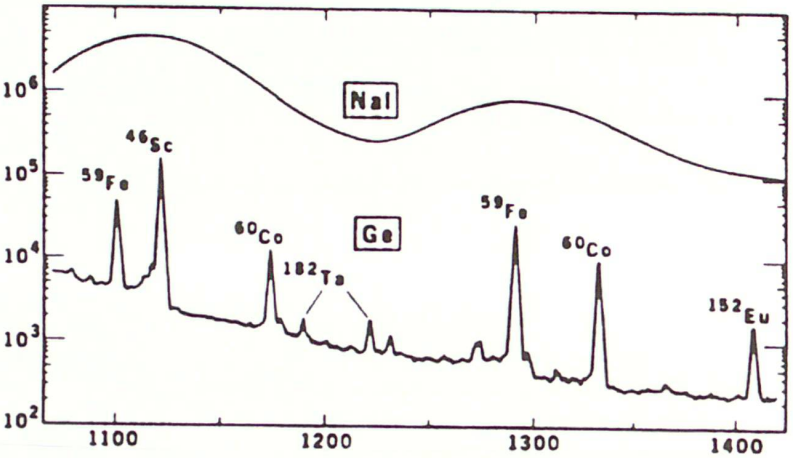


Fig 4 – Spettri di radiazioni γ nell'intervallo da circa 1100 - 1400 keV raccolti con un rivelatore dia scintillazione di NaI (Tl) e di germanio iperpuro, quest'ultimo con una risoluzione circa 40 volte migliore.

Effetti patologici delle radiazioni γ ed X.

Nei primi 10 anni dalla scoperta di Roentgen era stata riconosciuta e sommariamente descritta un gran parte delle patologie da dosi elevate e intense di radiazioni ionizzanti. Gli effetti erano deterministici, quindi certi per dosi elevate. Fra questi, eritemi, sterilità negli animali da laboratorio, anemie e leucopenie da raggi X.

Nelle condizioni attuali, con dosi normalmente limitate (salvo il caso di incidenti), si prendono in considerazione anche gli effetti stocastici (cioè probabilistici) di induzione di patologie. Si stima infatti che il rischio di induzione di neoplasie sia attorno al 4-5% per ogni sievert ricevuto (cioè una neoplasia ogni 20-25 Sv). Su queste basi, applicando direttamente la proporzione anche alle bassissime dosi, sono state effettuate alcune valutazioni per le popolazioni sulle conseguenze dell'incidente di Chernobyl.

Ritenendo che la dose ricevuta da ogni persona in Italia sia stata attorno a 0.5 mSv, per l'intera popolazione di 56 milioni di persone, la dose collettiva è risultata di 28.000 Sv. Sono state quindi stimate oltre un migliaio di nuove neoplasie (da svilupparsi nei decenni successivi, quindi non individuabili rispetto alle oltre nuove 150.000 neoplasie per anno). Su queste valutazioni è ancora aperto il dibattito scientifico.

Valutazione delle dosi γ

La dose da radiazioni gamma sull'uomo dipende, in modo proporzionale, dall'attività della sorgente e dal tempo di esposizione. Dipende invece in modo inversamente proporzionale dal quadrato della distanza. Dipende inoltre dall'energia delle radiazioni gamma attraverso la loro attenuazione nei materiali interposti e la loro cessione di energia nel corpo umano. Il calcolo, complesso, può essere effettuato, in assenza di schermi, tramite i fattori Γ, definiti per ogni nuclide. Ad esempio per il Cesio-137, il fattore Γ viene dato pari a 0.34 mSv/ora a 10 cm di distanza (o 100 volte inferiore a 1 metro) per una sorgente di 1 millicurie ($3.7 \cdot 10^7$ Bq) mentre per il Cobalto-60 risulta di 1.32 nelle stesse unità, per la maggiore energia (1.17 + 1.33 MeV) del Co-60 rispetto ai 0.662 MeV del Cs-137.

Le dosi γ così calcolate sono poi da confrontare con i limiti di legislazione, pari a 1 mSv/yr (oltre il fondo naturale) per la popolazione e da abbassare se possibile, *riducendo* l'attività delle sorgenti e il tempo di esposizione, *aumentando* la distanza dalla sorgente ed *interponendo* opportuni schermi (come il piombo).

* Professore presso il dipartimento di Ingegneria nucleare, al Politecnico di Milano.