



ASSOCIAZIONE ITALIANA NUCLEARE

GIORNATA DI STUDIO 2017

“APPLICAZIONI DELLA RADIOATTIVITÀ”

di Enrico Mainardi

Roma, 5 giugno 2017

Le attività umane e le applicazioni che implicano l'uso diretto o indiretto dell'energia nucleare e della radioattività sono innumerevoli e vanno ben oltre la sola produzione di energia elettrica. I più significativi campi di applicazione riguardano la medicina, l'industria, la sterilizzazione, l'agricoltura, il settore alimentare, il settore ambientale, l'archeologia, la geologia, la prospezione mineraria, la sicurezza, la ricerca. Inoltre, l'energia nucleare viene utilizzata in impieghi spaziali e navali, per la desalinizzazione dell'acqua di mare e per la generazione di calore di processo e idrogeno.

Gli studi delle discipline nucleari sono essenziali per lo sviluppo ulteriore di tutto il comparto scientifico e tecnologico. Le applicazioni della fisica e ingegneria nucleare hanno avuto negli ultimi anni un forte sviluppo e il settore è in continua evoluzione. Vengono forniti qui appresso alcuni esempi delle principali applicazioni.

1. APPLICAZIONI IN MEDICINA

Le applicazioni mediche della fisica nucleare vengono distinte a seconda che utilizzino sorgenti sigillate o non-sigillate: nel primo caso si tratta per lo più di applicazioni di **Radioterapia Oncologica**, nel secondo di Diagnostica e Terapia con Radiofarmaci (**Medicina Nucleare**).

- *La Radioterapia a fasci esterni* ha utilizzato per molti anni sorgenti di Co-60 e Cs-137 ma tali sorgenti e le macchine che li utilizzavano sono state sostituite dagli acceleratori lineari (fotoni X di alta energia, elettroni veloci e protoni); alcuni radionuclidi sono tuttora utilizzati per *Brachiterapia* (sorgente radioattiva disposta internamente al corpo, ad esempio Ir-192, Cs-137, I-125, Pd-103)

La **Radioterapia** sfrutta la capacità delle radiazioni di essere concentrate in zone abbastanza piccole permettendo di distruggere le cellule malate con una notevole precisione e riducendo l'impatto degli interventi chirurgici. Oltre alle tecniche di uso consolidato già menzionate, si sono perfezionate tecniche radioterapeutiche, come ad esempio la *Boroterapia*, basate sull'attivazione di sostanze aventi la proprietà di concentrarsi nei tessuti patologici. Le cellule cancerose vengono in tal modo irradiate selettivamente, interessando in minima parte i tessuti circostanti. In passato, le radioterapie erano molto più invasive per i pazienti, visto che difficilmente si riuscivano ad evitare dosi elevate anche alla pelle e agli organi intorno al tumore da distruggere.

- L'attività di **Medicina Nucleare** si fonda sull'utilizzo di **radiofarmaci** in grado di tracciare il percorso dei normali costituenti corporei per ottenere informazioni diagnostiche o veicolare attività terapeutiche. L'**Imaging Medico-Nucleare**, con le scintigrafie planari prima, con le tecniche tomografiche **SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)** e **PET (Positron Emission Tomography)** poi, si è affiancata alle altre tecniche di Imaging Radiologico (radiografie prima, ecografie, TC-Tomografia Computerizzata e RM-Risonanza Magnetica poi) di più larga diffusione, che permettono di ricostruire immagini strutturali di elevata risoluzione di parti interne del corpo umano e i particolari dei diversi organi con livelli di accuratezza e di dettaglio molto elevati, con la possibilità di effettuare diagnosi estremamente accurate di stati patologici altrimenti non verificabili senza intervenire chirurgicamente. Con le **tecniche diagnostiche multimodali (PET/CT, PET/MR e SPECT/CT)** è oggi possibile, grazie ai **radiofarmaci**, aggiungere alle informazioni anatomiche e morfostrutturali proprie delle indagini radiologiche (TC e RM), informazioni legate al metabolismo cellulare, alla modulazione di recettori specifici consentendo di definire le malattie non più per la disfunzione di organi o apparati o singole linee cellulari ma documentando a livello molecolare l'alterazione che induce un processo patologico.

Alcuni radiofarmaci utilizzati in diagnostica consentono al chirurgo, in camera operatoria, (**Chirurgia Radioguidata**), grazie a una sonda di rilevazione della radioattività, un'esplorazione del campo operatorio al fine di localizzare piccole strutture non altrimenti rilevabili alla vista e al tatto (*Biopsia del linfonodo sentinella*, *ROLL-Radioguided Occult Lesion Localization*, *Chirurgia mini-invasiva delle paratiroidi*).

Grande è l'impatto della **Terapia Radiometabolica** in alcune patologie. Dal 1946 ad oggi milioni di persone sono state curate con il radioiodio (I-131), con un trend pari a circa 400.000 all'anno secondo il report UNSCEAR del 2008. Grazie a questo farmaco radioattivo il carcinoma differenziato della tiroide è rapidamente divenuto uno dei tumori con più bassa mortalità e più elevato tasso di guarigione.

Oggi la ricerca radiofarmaceutica ha messo a disposizione nuovi radiofarmaci terapeutici (anche alfa-emittenti come il ^{223}Ra -cloruro o beta-emittenti come i peptidi marcati con ^{177}Lu) che stanno entrando nella pratica clinica in alternativa ai più tradizionali chemioterapici oncologici utilizzati nel carcinoma della prostata e nei tumori neuroendocrini.

Il trattamento dei tumori epatici con tecniche radioembolizzanti (**SIRT - Selective Internal Radio-Embolization**) avviene grazie alla somministrazione, dopo cateterismo selettivo dei rami dell'arteria epatica di un agente terapeutico costituito da microsferi radiomarcate con ittrio (**^{90}Y -SIR spheres**), che oltre a bloccare temporaneamente il flusso arterioso al tumore agisce, per emissione di particelle beta, sulle cellule epatiche distruggendole.

Tanto lo sviluppo di nuovi radiofarmaci quanto l'utilizzo di molecole radiomarcate per attività di ricerca di biologia molecolare in ambito preclinico comportano che in diversi laboratori sia presente radioattività e si utilizzino tecniche analitiche con strumenti di misura della radioattività. Negli anni '70 e '80 le tecniche immunoradiometriche (RIA e IRMA) basate sull'utilizzo come radioligandi di anticorpi specifici hanno consentito di mettere a punto il dosaggio dei principali ormoni e markers tumorali e sono state il banco di prova per la messa a punto di tecniche "nuclear free" (metodi immunoenzimatici o a immunofluorescenza).

2. LE APPLICAZIONI INDUSTRIALI

Intensi fasci di raggi X e raggi gamma vengono impiegati per radiografare componenti meccanici, per assicurare la qualità delle fusioni e delle saldature e per verificare l'integrità di componenti impiantistici di elevato spessore rilevanti ai fini della sicurezza. Sistemi di misura e di analisi on-line sfruttano l'emissione di radiazioni beta e l'attivazione neutronica.

Emettitori di particelle beta sono diffusamente utilizzati nell'industria cartaria per la misurazione dello spessore dei fogli di carta durante il processo di fabbricazione. Sorgenti di neutroni sono utilizzate presso gli impianti termoelettrici per quantificare in tempo reale il contenuto di silicio, ferro, alluminio, zolfo e calcio del carbone, onde valutare preventivamente l'emissione di inquinanti conseguente alla combustione. Traccianti dispersi nell'olio di lubrificazione dei motori di nuova progettazione e costruzione consentono, nella fase di ingegnerizzazione, di quantificare sul banco di prova il consumo di olio stesso attraverso la rilevazione dei traccianti nei gas di scarico.

Le radiazioni sono impiegate per modificare opportunamente le caratteristiche superficiali e di massa dei materiali. Il flusso neutronico prodotto da un reattore nucleare può servire a produrre materiali semiconduttori per l'industria elettronica o ad alimentare processi di radiografia neutronica. L'irraggiamento con intensi fasci di ioni può conferire ai materiali proprietà superficiali diverse da quelle iniziali.

L'impiego degli acceleratori di particelle è importante poiché, con intensi fasci di radiazioni, permette di indurre trasformazioni nei materiali irradiati. Tipiche sono le applicazioni per la

produzione di materiali polimerici usati per isolanti elettrici, nastri adesivi, floppy-disc, pneumatici e lenti a contatto.

In moltissimi casi si usano radiazioni per sintetizzare prodotti chimici che richiederebbero altrimenti trattamenti lunghi, costosi ed estremamente inquinanti. Il trattamento con radiazioni è, in generale, molto più pulito ed efficiente dei processi chimici che potrebbero ottenere gli stessi risultati.

3. LE APPLICAZIONI NEL CAMPO DELLA STERILIZZAZIONE

Le radiazioni nucleari vengono usate spesso per rendere sterili prodotti medicali e alimentari, per uccidere eventuali parassiti dei cereali, per conservare più a lungo i cibi o per trattare rifiuti che potrebbero essere inquinati da batteri. Le dosi impiegate vanno da poche migliaia di sievert per il trattamento dei cibi ai 25000-45000 sievert per la sterilizzazione dei prodotti medicali ai milioni di sievert per la sintesi chimica.

4. LE APPLICAZIONI AGROBIOLOGICHE E AGROALIMENTARE

L'uso delle radiazioni ha permesso lo studio e lo sviluppo di nuove tecniche antiparassitarie e di fertilizzazione che sono oggi estesamente impiegate in agricoltura e nella prevenzione sanitaria. La liberazione di insetti precedentemente sterilizzati con le radiazioni consente, ad esempio, un efficace controllo della proliferazione delle mosche e di altri parassiti, minimizzando contemporaneamente l'uso, e l'impatto ambientale, di antiparassitari e insetticidi chimici. Le radiazioni sono estesamente applicate anche nell'industria agroalimentare sottoponendo a irraggiamento le derrate per la distruzione di insetti, muffe e batteri responsabili del loro deperimento o per finalità antigermicidiche. L'uso di traccianti radioattivi mescolati al fertilizzante consente di seguirne il processo di assorbimento e di metabolizzazione da parte dei vegetali e di quantificarne il rilascio, per evitare poi l'impiego di dosi eccessive di sostanze chimiche, minimizzando in tal modo i problemi di contaminazione dell'ambiente.

5. LE APPLICAZIONI AMBIENTALI

L'uso dei traccianti radioattivi consente di monitorare la dispersione e la diffusione degli inquinanti. Mescolando ai combustibili piccole quantità di traccianti è possibile verificare l'efficienza dei sistemi di captazione delle ceneri e di depurazione dei fumi. Le radiazioni trovano anche impiego nella sterilizzazione dei fanghi di risulta degli impianti di depurazione. L'uso dei traccianti consente inoltre di studiare la mappatura delle falde acquifere e delle risorse idriche sotterranee, di analizzare e misurare l'accumulo dei sedimenti sul fondo marino, di seguire il corso delle correnti oceaniche e atmosferiche e di misurare il tasso di accumulo dei ghiacci nelle calotte polari.

6. LE APPLICAZIONI IN ARCHEOLOGIA, ANTROPOLOGIA E DATAZIONE

Le tecniche di datazione mediante l'uso delle radiazioni sono alla base di discipline come l'archeologia e l'antropologia. L'età di un reperto di origine organica vegetale o animale può essere facilmente determinata misurando il suo contenuto in carbonio-14. Una diversa tecnica di datazione, denominata termoluminescenza, è utilizzata per determinare l'età dei manufatti ceramici. In essi sono infatti inglobati al momento della produzione diversi radioisotopi naturali

contenuti nelle argille. I successivi processi di decadimento determinano l'imprigionamento di parte dell'energia delle radiazioni emesse nei cristalli minerali contenuti nell'argilla. Questa energia si manifesta con la comparsa di una debole luminescenza all'atto del riscaldamento del manufatto. La quantità di energia luminosa liberata è proporzionale al tempo trascorso dal momento della cottura del manufatto.

7. LE APPLICAZIONI IN GEOLOGIA E PROSPEZIONE MINERARIA

La presenza di radioisotopi a vita lunga nei minerali consente di datare con buona approssimazione le formazioni geologiche, ricavando informazioni preziose per la ricerca di minerali. Un metodo di datazione delle rocce si basa sul decadimento dell'uranio e del torio. Un altro metodo è basato sulla determinazione dei rapporti tra le concentrazioni degli elementi iniziali e finali delle serie radioattive. In questo caso si misura il rapporto tra Uranio-238 e Piombo-206 o tra Torio-232 e Piombo-208 presenti nella roccia. Questi e altri metodi attribuiscono alla Terra un'età di circa 4,65 miliardi di anni.

La stratigrafia per attivazione neutronica è una tecnica utilizzata nell'industria petrolifera per determinare la composizione degli strati geologici attraversati da una perforazione di sondaggio. Facendo scorrere lungo la perforazione una sorgente di neutroni e misurando successivamente la risposta dei materiali irradiati si ricavano informazioni molto dettagliate sulla composizione degli strati attraversati.

8. LE APPLICAZIONI NEL CAMPO DELLA SICUREZZA

Molto diffuso è il controllo del contenuto dei bagagli negli aeroporti, effettuato con stazioni radiografiche che impiegano raggi X a bassa intensità. Un'altra applicazione molto diffusa è rappresentata dai rivelatori di fumo degli impianti antincendio a camera di ionizzazione, basati sull'impiego di emettitori alfa.

Nell'ambito dello sviluppo di rivelatori di radiazione per applicazioni legate alla sicurezza, si segnala il progetto europeo SCINTILLA. In questo progetto, l'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), in collaborazione con Ansaldo Nucleare (ANN), ha sviluppato un rivelatore per il monitoraggio di container, veicoli e persone. Lo scopo principale è quello di realizzare sistemi ottimizzati per la rivelazione di sorgenti radioattive in ambienti sensibili quali porti commerciali, aeroporti, frontiere, ospedali o durante eventi pubblici.

L'analisi per attivazione neutronica è utilizzata in medicina legale per individuare, in un campione, la presenza di alcune sostanze (ad esempio, l'arsenico).

9. LE APPLICAZIONI NEL CAMPO DELLA RICERCA SCIENTIFICA E TECNOLOGICA

Quella della ricerca scientifica e tecnologica costituisce un'area di estesa applicazione della radioattività e delle radiazioni ionizzanti, sia come argomento di studio, sia come strumento di indagine. Con riferimento alle ricerche sulla composizione intima della materia, si fa uso estensivo di acceleratori e rivelatori di grandi dimensioni. Le ricerche sull'utilizzazione dell'energia nucleare includono sistemi a fissione e a fusione. La radioattività è impiegata estesamente anche come strumento di indagine. In generale, l'uso di traccianti radioattivi consente di studiare nel dettaglio i meccanismi che presiedono ai processi chimici, chimico-fisici e biologici, seguendo strumentalmente

gli spostamenti e le successive combinazioni di atomi e molecole opportunamente marcati. Numerosi fenomeni indotti da raggi X o da elettroni accelerati (fino ad energie comprese tra alcune decine ed alcune centinaia di keV) sono utilizzati nella strumentazione impiegata per analisi, soprattutto nel campo della struttura dei materiali, attraverso - ad esempio - la microscopia elettronica o a raggi X, la diffrattometria, l'analisi per fluorescenza.

10. IMPIEGHI SPAZIALI DELL'ENERGIA NUCLEARE

Le più diffuse sorgenti nucleari spaziali impiegano:

- (a) generatori termoelettrici a radioisotopi o RTG (Radioisotope Thermoelectric Generators), basati sulla conversione termoelettrica o termoionica del calore prodotto dal decadimento di alcuni radioisotopi;
- (b) reattori nucleari, basati sulla conversione del calore prodotto da reazioni di fissione.

Per fornire energia elettrica in missioni spaziali di lunga durata ci si orienta sempre più verso sorgenti nucleari che impiegano generatori termoelettrici a radioisotopi o reattori nucleari a fissione. Livelli di potenza tra i 100 e i 500 W sono richiesti per piccoli satelliti; la presenza umana nello spazio e satelliti più grandi richiedono invece potenze comprese tra i 10 e i 40 kWe; ben più elevata la richiesta per basi sulla Luna o su Marte: tra 1 e 2 MWe.

L'energia nucleare non è stata mai usata come strumento di propulsione diretta, per sostituire i motori a razzo di tipo chimico. Tuttavia sono stati proposti e studiati numerosi sistemi di propulsori basati su reattori a fissione nucleare. Motori a propulsione ionica sono da preferirsi, rispetto ai propulsori chimici tradizionali, per l'impiego in lunghe missioni, come ad esempio quelle per raggiungere Marte. Per alimentare tali propulsori ionici il generatore di energia elettrica più idoneo può essere costituito proprio da un reattore nucleare compatto.

La Figura 1 illustra la potenza elettrica in funzione del tempo di utilizzo, indicando - nel contempo - la sorgente che, nelle applicazioni spaziali, viene solitamente preferita.

Per potenze elettriche sotto i 10 kWe si utilizzano celle a combustibile, pannelli fotovoltaici e generatori a radioisotopi in base al tipo e durata di missione. Per le sonde interplanetarie che richiedono potenze inferiori a 1 kWe e che sono inviate ad esplorare la parte esterna del sistema solare si impiegano essenzialmente sorgenti di energia nucleare a radioisotopi; già alla distanza di Giove il flusso di energia solare è 25 volte meno intenso rispetto a quello che raggiunge la Terra, rendendo i pannelli fotovoltaici inutilizzabili. I satelliti terrestri, invece, impiegano normalmente energia solare raccolta da opportuni pannelli che la convertono in energia elettrica con un'efficienza intorno al 10%. In passato, alcune tipologie di satelliti terrestri che richiedevano, in modo continuo, forti quantità di energia hanno comunque impiegato sistemi nucleari.

Per applicazioni spaziali che richiedono alti livelli di potenza per lunghi periodi di tempo, l'utilizzo di un reattore nucleare è l'unico modo per generare elettricità (si veda Figura 1). Il reattore nucleare può essere utilizzato anche per produrre calore e per alimentare sistemi propulsivi a ioni. Un reattore nucleare spaziale potrebbe fornire una fonte di elevata potenza, costante, affidabile e di lunga durata. Inoltre, l'assenza di luce solare, ambienti ad elevata radioattività, spazi, pesi e costi possono favorire l'impiego dell'energia nucleare nello spazio.

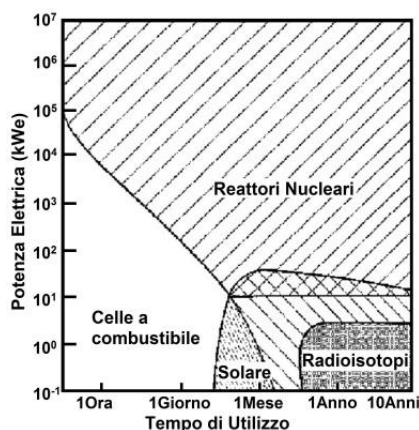


Figura 1: Domanda di energia elettrica in funzione della durata di utilizzo in applicazioni spaziali.

11. IMPIEGHI MARINI DEI REATTORI NUCLEARI

L'energia nucleare è ampiamente utilizzata per la propulsione di navi e sottomarini specialmente in ambito militare. Nel settore militare sono stati utilizzati principalmente reattori ad acqua pressurizzata, compatti, con potenze dell'ordine di 50 MW_{th} per i sottomarini, 150 MW_{th} per gli incrociatori, 450 MW_{th} per le portaerei.

Nel settore civile la propulsione nucleare è stata utilizzata in maniera più limitata essenzialmente per motivi economici, legati alla complessità di gestione. I casi di utilizzo civile si riferiscono principalmente ad alcune navi rompighiaccio russe e a qualche sottomarino a scopo scientifico o oceanografico. Da segnalare anche il progetto di un impianto nucleare galleggiante su chiatta, in Russia.

Il principale vantaggio della propulsione nucleare consiste in una prolungata autonomia e nel fatto di non avere bisogno di aria quale comburente. Ciò permette ai sottomarini di restare per lungo tempo sommersi; caratteristica particolarmente importante ai tempi della guerra fredda, perché i sottomarini nucleari potevano così garantire una presenza tattica e strategica altrimenti impossibile con i sommergibili a propulsione convenzionale. I motori diesel, infatti, richiedono aria per la combustione.

In futuro potrebbe essere conveniente l'utilizzo di navi nucleari per trasporto merci, per via dei più stabili costi del combustibile e per ragioni di carattere ambientale legate all'assenza di emissioni di CO₂.

12. REATTORI NUCLEARI DI RICERCA

I reattori di ricerca operano ad una potenza massima di circa 100 MW_{th} e tipicamente dell'ordine di 1 MW_{th}. Questi valori sono quindi molto inferiori rispetto a quelli dei reattori commerciali con potenze generalmente intorno ai 3000 MW_{th}.

Attualmente una parte importante della ricerca nel campo delle tecnologie nucleari applicate a vari settori è effettuata con piccoli reattori nucleari di ricerca. Anche grazie a specifici studi su questi reattori sarà possibile effettuare lavori di ricerca, sviluppo ed ottimizzazione degli impianti di nuova generazione.

Alcuni reattori sono utilizzati per produrre diversi tipi di isotopi radioattivi impiegati in medicina, nell'industria e in altre applicazioni. I materiali da irradiare con neutroni vengono collocati vicino al

nocciolo. Dal nocciolo possono anche venire estratti fasci di neutroni da utilizzare in esperimenti di fisica.

Nel mondo esiste una varietà molto più grande di tipologie di reattori di ricerca rispetto a quelli di potenza che sono costituiti, per circa l'80%, da reattori del tipo ad acqua leggera LWR (Light Water Reactor).

13. REATTORI NUCLEARI PER LA PRODUZIONE DI CALORE DI PROCESSO, DI IDROGENO E PER LA DESALINIZZAZIONE

L'energia nucleare è una fonte eccellente di calore di processo a bassa emissione di anidride carbonica. Il calore prodotto può avere varie applicazioni industriali quali la desalinizzazione, la produzione di olio sintetico e non convenzionale, la raffinazione del petrolio, la produzione di etanolo da biomassa e, in futuro, esso potrebbe anche essere impiegato per la produzione di idrogeno. I reattori ad acqua, concepiti per la produzione di elettricità, forniscono tuttavia calore a temperature relativamente basse, rispetto alle molte esigenze industriali. Pertanto, per le applicazioni diverse dalla produzione di energia elettrica, gli studi si stanno concentrando su reattori ad alta temperatura, raffreddati a gas, che producono calore ad una temperatura superiore a 700°C, fornendo un'ampia gamma di possibili applicazioni industriali.

Esiste già una notevole esperienza, in molti paesi del mondo, circa la cogenerazione offerta dai reattori nucleari che sfruttano il calore comunque prodotto nella generazione di elettricità. Le potenzialità dei reattori nucleari sono molto vaste nel settore della desalinizzazione e nell'industria del petrolio (raffinazione ed estrazione). La dissalazione nucleare ha generalmente costi competitivi rispetto a quella prodotta mediante l'utilizzo di combustibili fossili. Un altro settore che potrebbe avere grande sviluppo in futuro riguarda la produzione di idrogeno, inizialmente per elettrolisi e successivamente anche per via termica. Temperature molto elevate sono anche richieste per la produzione del ferro, cemento e vetro. In tutte queste applicazioni vengono sfruttate le alte temperature raggiungibili nei reattori nucleari. I reattori di IV Generazione permetteranno di raggiungere temperature ancora più elevate.

Riferimenti

1. International Atomic Energy Agency website <http://www.iaea.org/>
2. E. Mainardi; Impieghi dell'energia nucleare, Delfino Editore (Gennaio 2008)