

# **RADIAZIONI IONIZZANTI: APPLICAZIONI INDUSTRIALI E DINTORNI\***

LAURA ARGENTI\*\*

## **Introduzione**

È a tutti noto il diffusissimo impiego delle sorgenti di radiazioni ionizzanti in alcuni settori:

- Medico: oltre alle tradizionali apparecchiature a raggi X, oggi sono utilizzati numerosi radioisotopi artificiali e sorgenti radiogene (es. acceleratori di particelle), sia in diagnostica che in terapia medica;
- Impianti di produzione di energia nucleare;
- Ricerca scientifica e tecnologica, dove le radiazioni ionizzanti intervengono sia come argomento di studio sia come strumento di indagine nella fisica nucleare [1], nell'astrofisica, nella chimica, nella biochimica, ecc. Ad esempio, 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 sono impiegati nella strumentazione utilizzata per l'analisi, soprattutto nel campo della struttura dei materiali.

Tuttavia, l'impiego delle radiazioni ionizzanti è diventato ormai essenziale in molti altri settori [2] quali l'industria, l'archeologia, l'arte, l'ambiente, in cui vengono abitualmente impiegati radionuclidi artificiali e naturali e macchine radiogene in tecnologie sempre più sofisticate. Oggetto della presente pubblicazione, che non ha la pretesa di essere esaustiva, è quello di fornire una panoramica di alcune di queste applicazioni meno note delle radiazioni ionizzanti, soprattutto nel settore industriale.

\* Lavoro presentato al convegno *dba 2010 Rischi fisici: valutazione, prevenzione e bonifica nei luoghi di lavoro. A che punto siamo*, Modena, 6-7 ottobre 2010.

\*\* INAIL, Direzione Regionale Emilia Romagna, Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione.

Qual è il motivo di un uso così massiccio delle radiazioni ionizzanti? Esse costituiscono un potentissimo strumento, prima di tutto perché hanno la capacità di analizzare il “cuore” di un materiale (è a tutti noto l’esempio delle radiografie), senza la necessità di distruggere ciò che si sta analizzando. Infatti, le radiazioni ionizzanti, grazie al loro elevato potere penetrante, sono in grado di attraversare e quindi analizzare materiali anche molto densi, quali i metalli, e quindi è possibile avere informazioni molto dettagliate in merito non solo alla struttura, dimensioni, difetti, ecc., ma anche alla loro composizione chimica elementare o all’eventuale presenza di elementi in traccia. Tramite le svariate tecniche analitiche che utilizzano le radiazioni ionizzanti è possibile analizzare ed identificare simultaneamente quasi tutta la tavola periodica degli elementi. Le metodiche sono state applicate alla scienza dei materiali, alla chimica, alla geologia, all’archeologia, all’ambiente, all’analisi dei cibi, ecc. Inoltre, tali tecniche sono spesso indipendenti dalla forma fisica del campione da analizzare e non richiedono alcuna preparazione preliminare.

Esempi di alcune tecniche analitiche che utilizzano radiazioni ionizzanti sono [3]:

- Tecniche radiografiche (che utilizzano raggi X, raggi gamma, particelle beta, elettroni secondari, neutroni, radiografie ad emissione di elettroni, tomodesintometrie, ecc.);
- Microscopia a scansione elettronica associata a spettrometria a raggi X;
- Diffrazione a raggi X;
- Fluorescenza attivata con i raggi X;
- Analisi di attivazione, ad esempio con sorgenti neutroniche [4];
- Microscopia a *ion beam*;
- Spettroscopia Raman;
- Spettroscopia Mössbauer;
- Datazione con Carbonio-14;
- Tecniche di scattering a raggi gamma.

Vi sono poi altre tecniche analitiche, piuttosto diffuse, che impiegano sorgenti radioattive “ausiliarie”, che cioè non intervengono direttamente nel processo di misura, quali le sorgenti di  $^{63}\text{Ni}$  nella gascromatografia a ECD (detector a cattura di elettroni), in cui la sorgente radioattiva ha il compito di ionizzare il gas di trasporto (ad esempio azoto), in modo da produrre una corrente elettrica le cui variazioni vengono poi rivelate dal detector.

Un’altra caratteristica molto importante delle radiazioni ionizzanti è quella, in dosi ed intensità sufficientemente elevate, di modificare la materia, grazie alla loro elevata energia: le tecniche di irraggiamento sono usualmente utilizzate per la sterilizzazione, nell’industria alimentare e nell’agricoltura, per l’attivazione di reazioni chimiche, per il recupero ambientale, ecc.

Di seguito sono riportate alcune applicazioni, suddivise in aree (es. applicazioni industriali, artistiche, ecc.) e, ove necessario, distinguendo tra le tecniche analitiche e le tecniche di “trattamento” tramite radiazioni. È pur vero, però, che molte delle tecniche descritte trovano applicazione in più di un settore e possono essere utilizzate sia per uno scopo che per l’altro, cambiando le condizioni sperimentali.

## 1. Applicazioni industriali

Per quanto riguarda le tecniche analitiche applicate all’industria, le radiazioni ionizzanti vengono estensivamente utilizzate per effettuare controlli non distruttivi in tutti i settori, che vanno dall’industria meccanica, a quella edile, elettronica, ecc. Alcuni di questi esempi includono:

- **Radiografie di componenti meccanici:** un’applicazione molto diffusa riguarda l’impiego di intensi fasci di raggi X o gamma per radiografare componenti meccanici/metallici nelle branche più svariate (aerospaziale, motoristica, automobilistica, nautica, stampaggio, ecc.), per la determinazione di difetti nelle saldature effettuate tra i vari pezzi meccanici o nelle strutture di fusione, nelle strutture metalliche, edilizie, elettriche ecc., al fine di assicurare la qualità e verificare l’integrità dei componenti studiati. Queste indagini radiografiche industriali in genere si effettuano tramite macchine a raggi X, sorgenti radioattive sigillate gamma (es.  $^{192}\text{Ir}$ ) telecomandate a distanza, e comportano l’impiego di radiazioni ad elevata potenza.
- **Misure di spessore** di un materiale: si ottengono sia tramite misure di trasmissione che di retrodiffusione della radiazione beta o gamma, utilizzando vari radioelementi (dal  $^{60}\text{Co}$  all’ $^{241}\text{Am}$ ), a seconda della densità superficiale del materiale in esame. Ad esempio, emettitori di particelle beta sono diffusamente utilizzati nell’industria cartaria per la misurazione dello spessore dei fogli di carta durante il processo di fabbricazione. Un’altra applicazione riguarda la centratura della foratura nei circuiti stampati professionali multistrato, e la misura degli spessori del materiale di riporto sulle schede elettroniche.
- **Misure di livello o di flusso:** in questo caso il fascio di radiazione permette di stabilire il livello di un liquido o il rapporto tra liquido e gas all’interno di recipienti, tubazioni, ecc. con una notevole precisione su qualunque tipo di contenitore, che sia opaco o no [5].
- **Misure di umidità e di densità del terreno:** questi tipi di misure vengono eseguite usando sorgenti neutroniche e di radiazione gamma, le prime per rivelare la presenza d’acqua o di idrocarburi nei terreni, le seconde per determinare la densità del suolo.
- Tecniche radioisotopiche [6] sono correntemente utilizzate per quantificare in tempo reale la composizione delle ceneri nei combustibili fossili, in primo

luogo il carbone (correlata al contenuto di silicio, ferro, alluminio, zolfo e calcio), onde valutare preventivamente l'emissione di inquinanti in seguito alla loro combustione.

- Traccianti gamma dispersi nell'olio di lubrificazione dei motori di nuova progettazione e costruzione consentono, nella fase di ingegnerizzazione, di quantificarne sul banco di prova il consumo di olio attraverso la loro rilevazione nei gas di scarico. Mescolando ai combustibili piccole quantità di traccianti è possibile verificare inoltre l'efficienza dei sistemi di captazione delle ceneri e di depurazione dei fumi.
- Come già detto, le radiazioni ionizzanti possono essere utilizzate anche per l'identificazione e l'analisi chimica dei materiali: ad esempio viene misurata la percentuale dei diversi metalli presenti nelle leghe metalliche, comprese quelle di gioielleria, negli impianti, nelle saldature industriali ecc. [7].
- Una tecnologia molto interessante riguarda l'impiego di metodologie radio-ottiche per misurare in situ le vibrazioni e i movimenti relativi di componenti di ponti, palazzi, dighe, velivoli, satelliti [8], oppure per valutare i parametri di crescita di crepe e rotture nelle pavimentazioni di asfalto [9].

Una diversa categoria di applicazioni industriali riguarda la tecnologia dei materiali, dove intensi fasci di radiazioni ionizzanti sono impiegate per modificare opportunamente le caratteristiche dei materiali irradiati.

Le radiazioni ionizzanti sono infatti in grado di attivare reazioni chimiche indipendentemente dallo stato fisico (solido, liquido, gassoso) e dalle condizioni termodinamiche (pressione, temperatura, ...) dei reagenti, e senza l'aggiunta di catalizzatori o di additivi. Questa proprietà viene sfruttata, ad esempio, nei processi di reticolazione dei polimeri [2b]. Infatti, l'irraggiamento di polimeri con radiazioni ad alta energia (come i raggi gamma, raggi X, fasci di elettroni o di ioni) genera ioni e radicali liberi, elementi molto reattivi che possono istantaneamente essere utilizzati nella formazione di nuove strutture chimiche e catene, potendo così modificare le caratteristiche del polimero finale.

Al contrario, anche la degradazione delle catene polimeriche può essere indotta dalle radiazioni ionizzanti: essa genera la rottura delle catene polimeriche principali e secondarie, ed anche questo trattamento viene utilizzato correntemente per la formazione di materiali dalle caratteristiche controllate.

Queste tecnologie sono già affermate o sono in rapida evoluzione, ad esempio, nei seguenti settori:

- Produzione di fili, cavi, isolanti elettrici, condutture, particolari tipologie di materiali polimerici, aventi caratteristiche di elevata resistenza ai solventi, all'invecchiamento e alle alte temperature;
- Produzione di tessuti resistenti per uniformi, camici, ecc.;
- Produzione di pellicole di confezionamento termorestringenti;

- Produzione di pneumatici di automobili (vulcanizzazione);
- Nei materiali compositi, modificazione delle superfici di film plastici e carta con silicone a basso peso molecolare che conferisce proprietà particolari (produzione di nastri adesivi, floppy disc, lenti a contatto, ecc.);
- Trattamenti per la rifinitura superficiale di rivestimenti, lacche e inchiostri;
- Trattamenti superficiale di nanomateriali;
- Produzione di membrane di filtrazione autopulenti e chimicamente resistenti (*ion-track*);
- Produzione di arti artificiali;
- Microlitografia: la tecnologia delle radiazioni basata sui raggi X, *e-beam* e ioni è sempre più utilizzata nella produzione di circuiti microelettronici, micromacchine e altri dispositivi analoghi;
- Produzione di semiconduttori organici (miscele di polianiline);
- Degradazione della cellulosa dai residui della lavorazione della canna da zucchero tramite le radiazioni ionizzanti per ottenere etanolo e polimeri naturali.

## 2. Alimenti e agricoltura

Altri due settori che utilizzano le radiazioni ionizzanti sia nelle tecniche analitiche che di trattamento sono l'agricoltura e l'industria alimentare, che sono state considerate in questo capitolo per comodità.

Anche in questo caso, le radiografie sono usualmente utilizzate per ispezionare gli alimenti e le piante [10]. Prodotti agricoli, come ad esempio noci, cereali e semi sono radiografati per studiarne le dimensioni, la forma e l'eventuale presenza di infestanti. Esempi di alimenti esaminati includono burro, prosciutti, salami, e le forme del parmigiano reggiano [11]: le immagini radiografiche rivelano infatti eventuali "imperfezioni" interne dei prodotti non rilevabili con altre metodiche non distruttive. Anche prodotti particolari, come gli alimenti per bambini, sono sottoposti a radiografia per evidenziare eventuali oggetti estranei.

Altre tecniche che utilizzano le radiazioni ionizzanti permettono di conoscere anche la composizione elementare delle matrici studiate: esempi includono il suolo agricolo, in cui sono stati ricercati i pesticidi contenenti metalli pesanti [12], la birra, in cui sono stati ricercati i metalli pesanti ed altri elementi inorganici presenti in tracce, il miele, il polline, l'acqua minerale, il caffè [13], solo per citarne alcuni.

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

Consideriamo ora le tecniche di irraggiamento con le radiazioni ionizzanti: esse sono effettuate in genere con sorgenti di radiazioni X, gamma e fasci di elettroni, e vengono estensivamente impiegate per la sterilizzazione e la conservazione di alimenti [2b], [14]. Usualmente, per questa applicazione si utilizzano sorgenti di  $^{60}\text{Co}$  o  $^{137}\text{Cs}$ ; la dose di radiazione ricevuta da un dato alimento determina l'effetto di sterilizzazione, permettendone una lunga conservazione e quindi fornendo la possibilità di immagazzinamento per lunghi periodi di tempo, ed estendendo il periodo di conservazione (*shelf life*). Gli effetti delle radiazioni ionizzanti sono, in dipendenza dell'alimento e della dose di radiazione impiegata:

- Decontaminazione da microrganismi patogeni e non, che possono causare tossinfezioni alimentari (tecnica utilizzata per spezie, erbe e vegetali di stagione);
- Disinfestazione da insetti e parassiti vari, tipo scarafaggi, falene ed altri;
- Ritardo della germogliazione e della maturazione (tecnica utilizzata per patate, cipolle, prodotti ortofrutticoli).

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

Questa tecnologia costituisce una valida alternativa ai processi di decontaminazione tradizionali attualmente utilizzati, in particolare consente una riduzione dell'uso di prodotti chimici potenzialmente pericolosi per la salute dell'uomo e per l'ambiente (fumigazione chimica). Inoltre, non viene modificata la consistenza dei prodotti come accadrebbe se essi venissero trattati con fonti di calore.

Oltre a quanto già detto, le tecniche di irradiazione sono correntemente utilizzate per ottenere la selezione genetica su un'ampia gamma di piante: con le radiazioni è possibile ottenere mutagenesi di piante irradiando direttamente il seme con dosi dell'ordine anche del centinaio di Gray [15].

L'uso delle radiazioni ha permesso lo studio e lo sviluppo di nuove tecniche anti-parassitarie e di fertilizzazione che sono oggi estesamente impiegate in agricoltura e nella prevenzione sanitaria. Ad esempio, la liberazione di insetti precedentemente sterilizzati con le radiazioni (tecnica dell'insetto sterile) consente un efficace controllo delle mosche e di altri parassiti, minimizzando contemporaneamente l'uso - e l'impatto ambientale - di antiparassitari e insetticidi chimici.

### 3. Arte, archeologia, geologia, ambiente

Le applicazioni di tecniche analitiche che utilizzano radiazioni ionizzanti nello studio e nella caratterizzazione dei beni culturali sono molto diffuse: anche in questo caso, le grandi potenzialità delle radiazioni ionizzanti unite alla non distruttività e non invasività delle analisi consentono di avere informazioni molto dettagliate sulle opere analizzate, sulla loro elaborazione, la loro evoluzione e/o la loro degradazione nel tempo, senza distruggerle [16].

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

Le applicazioni di queste tecniche allo studio di beni artistici e culturali sono innumerevoli: solo a titolo di esempio citiamo lo studio di fotografie storiche, affreschi, sculture, antichi manoscritti, icone, oggetti d'oro, monete, ecc. [17] Qualsiasi tipologia di materiale può essere analizzato, tra cui:

- Pietre, gemme, ceramiche, terrecotte, smalti, vetri;
- Legno, carta, tessuti, ossa, avorio;
- Metalli, gioielli;
- Strati di pittura, tele, pigmenti, inchiostri, oli, leganti, vernici, colle, ecc.

Anche nell'archeologia e nella paleobiologia le radiazioni ionizzanti sono alla base di importanti tecniche di analisi. Le analisi radiografiche sono estensivamente impiegate per studiare mummie, tessuti organici, ed altri oggetti [18]. Inoltre, com'è noto, l'età di un reperto di origine organica (vegetale o animale) può essere facilmente determinata misurando il suo contenuto in carbonio-14. Infine, per studiare materiali inorganici è possibile utilizzare altre tecniche di datazione basate sull'analisi di altri radioisotopi naturali.

Molte delle opere d'arte e degli oggetti ad elevato interesse culturale sono costituite da materiali organici, il che significa che sono sottoposte ad un costante processo di degradazione da agenti fisici, chimici, microbici o da insetti. In questo caso, l'uso delle radiazioni ionizzanti può aiutare a preservare e conservare queste opere nello stato in cui sono state trovate, ad esempio tramite la loro impregnazione con resine che emettono radiazioni gamma.

La geologia e la prospezione mineraria sono due settori nei quali le radiazioni ionizzanti trovano applicazioni di notevole interesse. La presenza di radioisoto-

pi a vita lunga nei minerali consente di datare con buona approssimazione le formazioni geologiche, ricavando informazioni preziose per la ricerca di minerali. La stratigrafia per attivazione neutronica è invece una tecnica molto utilizzata nell'industria petrolifera e del carbone per determinare la composizione degli strati geologici attraversati da una perforazione di sondaggio. Facendo scorrere lungo la perforazione una sorgente di neutroni e misurando successivamente la "risposta" dei materiali irradiati si ricavano infatti informazioni molto dettagliate sulla composizione degli strati attraversati [19].

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.

Infine, l'uso dei traccianti radioattivi o di radionuclidi naturali o artificiali già presenti nell'ambiente [20] consente di monitorare la dispersione e la diffusione degli inquinanti.

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

Particolare attenzione viene posta alla possibilità di utilizzare gli *e-beam* (fasci elettronici) per la depurazione delle acque, come metodo sostitutivo o integrativo alle convenzionali tecniche, nei processi di ossidazione avanzata, per eliminare, ad esempio, la contaminazione di falde con pesticidi o inquinanti di varia natura. Le industrie che per il loro normale funzionamento necessitano di grandi quantitativi di acqua (es. cartarie, tessili e conciarie) beneficerebbero dell'introduzione di tali tecnologie, rendendo altresì possibile il riutilizzo di acque di scarico che altrimenti andrebbero smaltite come rifiuti pericolosi, in quanto spesso altamente tossiche per l'uomo e l'ambiente.

Questi processi di ossidazione avanzata utilizzano una combinazione di ossidanti, quali le radiazioni ultraviolette, i catalizzatori, l'elettricità, gli ultrasuoni e gli *e-beam* per generare radicali idrossilici (radiolisi dell'acqua). Infatti l'acqua, quando viene colpita dalla radiazione, si decompone in molecole elettrizzate e ionizzate, che a loro volta producono svariate specie reattive e prodotti molecolari ( $\text{OH}\cdot$ ,  $\text{H}\cdot$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{e}_{\text{aq}}^-$ ), che danno luogo a tutta una serie di reazioni, spesso molto complesse, che possono anche avere effetti sugli organismi viventi presenti in acqua, con intensità e modalità diversa a seconda della dose di radiazione, arrivando anche alla distruzione degli organismi stessi.

#### 4. Altre applicazioni

Le radiazioni ionizzanti trovano un altro campo di impiego significativo in alcune applicazioni relative alla sicurezza. Queste tecnologie impiegano, oltre ai



raggi X standard, tomografie con raggi X, radiografie gamma, ed anche svariate tecnologie basate sui neutroni [21].

Molto diffuso è ad esempio il controllo del contenuto dei bagagli tramite tecniche radiografiche: l'ispezione non intrusiva di oggetti di tutte le dimensioni, dai bagagli alle borse ai pacchi postali è diventata una componente importante della sicurezza dei voli e dei controlli ai confini, dogane, ecc.

Altre applicazioni consentono di individuare materiali esplosivi durante le operazioni di sminamento, materiali pericolosi quali agenti chimici, materiali nucleari, merce di contrabbando, droghe [22], ecc.

Inoltre, le tecniche analitiche già citate sono state proficuamente utilizzate anche nella medicina legale.

Un'altra applicazione molto diffusa soprattutto all'estero è rappresentata dai rivelatori di fumo degli impianti antincendio a camera di ionizzazione, basati sull'impiego di emettitori alfa.

Citiamo infine, più a titolo di curiosità che altro, due applicazioni, oggi non più attuali, che però venivano ancora utilizzate in un passato non troppo lontano:

- L'impiego di polvere di torio nelle reticelle di fornelli a gas, utilizzati per l'illuminazione d'emergenza nelle lampade da campeggio, al fine di migliorarne le caratteristiche di illuminazione;
- L'uso di trizio nei quadranti degli orologi, bussole, ed altri oggetti, al fine di renderli fosforescenti.

## Conclusioni

Le radiazioni ionizzanti sono oggi impiegate in svariatisimi settori della vita moderna, medici, scientifici, ma anche industriali, artistici, ambientali, ecc. Il numero di queste applicazioni è in costante aumento: la sempre maggiore diffusione di queste applicazioni anche in ambienti diversi da quelli scientifici o medici, tradizionalmente più controllati e preparati in merito, rende necessaria una sempre più diffusa e capillare formazione ed informazione sulle radiazioni ionizzanti, sia in merito alle grandi potenzialità che esse offrono, ma anche ai rischi che presentano.

### *Ringraziamenti*

Si ringrazia Omar Nicolini per l'aiuto e il sostegno dati.

## RIASSUNTO

Scopo del presente lavoro è presentare una panoramica, seppure non esaustiva, di alcune applicazioni, soprattutto industriali, in cui sono utilizzate le radiazioni ionizzanti.

## SUMMARY

A panorama, even if not comprehensive, has been presented of some applications employing the ionizing radiations, most in the industrial fields.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Vedi ad esempio il sito internet dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare: <http://www.infn.it/indexit.php>.

[2] a) *Application of ionizing radiation*, Progress report, 2005-2007, INSTITUTO DE PESQUITAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, sito internet: [http://www.ipen.br/conteudo/upload/201002021819200.3\\_ionizing\\_radiations.pdf](http://www.ipen.br/conteudo/upload/201002021819200.3_ionizing_radiations.pdf);  
b) *No. 3 in the series: What Can Radioisotopes Do for Man? The Application of Radiation Technology in Industrial Processes Current and Future Perspectives*, by JOSEPH SILVERMAN, Laboratory for Radiation and Polymer Science, University of Maryland, USA; sito internet: <http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull171/17105391522.pdf>

[3] D.A. SKOOG, J.J. LEARY: *Chimica Analitica Strumentale*, EdiSES, Napoli, 1995, Cap. 17: *Metodi radiochimici*.

[4] IRRMA-V: *5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application*, Bologna, Italy, 9-14 giugno 2002, [www.irmma.unibo.it](http://www.irmma.unibo.it), Editrice Compositori, Abstracts book: D.L. PERRY, G.A. ENGLISH, R.B. FIRESTONE, K. LEUNG, G. GARABEDIAN, G.L. MOLNAR E Z. RAVAY, *The use of prompt gamma activation analysis (PGAA) for the analyses and characterization of materials*, pag. 66.

[5] a) S.A. TJUGUM E G.A. JOHANSE: *A compact low-energy multibeam gamma-ray densitometer for pipe-flow measurements*, rif. 4, pag. 108; b) J. THYN, *Radiotracer applications for the analysis of complex flow structure in industrial apparatuses*, pag. 135.

- [6] B.D. SOWERBY, C.S. LIM, J.R. TICKNER: *Review of radioisotope techniques for on-line determination for ash in coal*, rif. 4, pag. 118.
- [7] A. MARUCCO: *Low-energy ED\_XRF spectrometry applications in gold assaying*, rif. 4 pag. 131.
- [8] W.L. DUNN: *A radio-optic method for measuring relative motion*, rif. 4 pag. 117.
- [9] D. BRAZ, R.T. LOPES, L.M.G. MOTTA: *Research on fatigue cracking growth parameters in asphaltic mixture using computed tomography*, rif. 4 pag. 273.
- [10] Food and Agriculture Inspection, sito internet:  
<http://www.dalsa.com/ls/applications/foodagriculture.aspx>.
- [11] H. KRAGGERUD, J.P. WOLD; M. HØY, R.K. ABRAHAMSEN: *X-ray images for the control of eye formation in cheese*, *Int. J. of Dairy Technology*, vol. 62, n. 2, 2009, pp. 147-153(7), Blackwell Publishing, sito internet: <http://www.ingentaconnect.com/content/bsc/idt/2009/00000062/00000002/art00002#expand/collapse>.
- [12] N. JØRGEHNSEN, J. LAURSEN, P.E. HOLM, A. VIKSNA, N. PIND: *EDXRF multi-elemental mapping of heavy metal containing pesticide residue on forme horticultural soil*, rif. 4 pag. 351.
- [13] a) S. MOREIRA, A.E.S. VIVES, E.F.O. DE JEUS: *Characterization of beers by synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence analysis*, rif. 4, pag. 150; b) M.L. MANGALA, M.D. WAMWANGI, I.V.S. RATHORE, S.K. KATIA, *Characterization of honey, pollen and bee tissues samples for trace elements content*, pag. 353; c) A.C.M. COSTA, M.J. ANJOS, R.T. LOPES, S. MOREIRA, E.F.O. DE JESUS, *Multielementar analysis of minerale water using SRTXRF*, pag. 359; d) A.E.S. VIVES, S.M. SIMABUCO, V.F. NASCIMENTO FILHO, *Determination of metals in coffee by total refraction X-ray fluorescence analysis*, pag. 371.
- [14] a) <http://www.elettrotecnologie.enea.it>; b) <http://www.eufic.org/article/it/tecnologia-alimentare/trattamento-cibi/artid/irradiazione-alimenti>; c) [http://ec.europa.eu/food/food/biosafety/irradiation/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/food/food/biosafety/irradiation/index_en.htm); d) [http://en.wikipedia.org/wiki/Food\\_irradiation](http://en.wikipedia.org/wiki/Food_irradiation).
- [15] R.C. MARTIN, C.M. SIMMONS, X. LI: *Genetic mutation od seeds induced by fast neutron irradiation*, rif. 4 pag. 15.
- [16] a) J.L. BOUTAINE: *Techniques of examination, characterization and analysis based on ionizing radiation applied to cultural heritage artefacts*, rif. 4 pag. 89;

b) M. MILAZZO: *X- ray fluorescence applications to archaeometry. Possibility of obtaining non-destructive quantitative analysis*, rif. 4 pag. 92.

[17] a) S. BRUNI, G. MAINO, G. MARTIGNANI, L. PILOTTI: *Microanalysis and elemental composition of historical photographs*, rif. 4 pag. 84; b) T. ČECHÁK, J. GERNDT, I. KOPECKÁ, L. MUSÍLEK, *X-ray fluorescence in research on Czech cultural monuments*, pag. 85; c) A.S. SEREBRIAKOV, E.A. FEDKOV, E.L. DEMCHENKO, V.I. KOUDR-JASHOV, A.D. SOKOLOV, *X-ray fluorescent for investigation of artworks*, pag. 86; d) K. JANSSENS, K. PROOST, E. BULSKA, H. ORTNER, M. SCHREINER, G. FALKENBERG, *Speciation and microanalysis of environmental and artistic materials by means of micro-XRF and micro-XANES*, pag. 121.

[18] M. ROSSI, F. CASALI, D. ROMANI, L. BONDIOLI, R. MACCHIARELLI, L. ROOK: *Micro CT-scan in paleobiology: application to the study of dental tissues*, rif. 4 pag. 83.

[19] M. BORSARU, M. BERRY, M. BIGGS, A. ROJC: *In-situ determination of sulphur in coal seams and oberburden rock by PGNA*, rif. 4 pag. 67.

[20] R.J. DE MEIJER, J. LIMBURG, R.L. KOOMANS: *Naturale radionuclides for monitoring waste dispersal on land or on the sea floor*, rif. 4 pag. 109.

[21] T. GOZANI: *The role of neutron based inspection techniques in the post 9/11/01 era*, rif. 4 pag. 24.

[22] a) M. CINAUSERO, E. FIORETTO, G. PRETE, M. BARBUI, G. VIESTI, M. LUNARDON, G. NEBBIA, S. PESENTE: *Development of a thermal neutron based sensor for explosive search*, rif. 4 pag. 23; b) B. KIRÁLY, T. SANAMI, R. DÓCZI E J. CSIKAI, *Detection of explosives and illicit drugs using neutrons*, pag. 24; c) E. FIORETTO, M. BARBUI, M. CINAUSERO, G. PRETE, G. VIESTI, M. LUNARDON, G. NEBBIA, S. PESENTE, S. GIANGRANDI, *Neutron back-scattering sensor for the detection of land mines*, pag. 25; d) G. VOURVOPOLUOS, P. C. WOMBLE, J. PASCHAL, I. NOVIKOV AND A. BARZILOV, *The use of pulsed neutrons for the detection of explosives and illicit drugs*, pag. 27.