

I principali impieghi delle radiazioni ionizzanti

1. Premessa

L'obiettivo del presente approfondimento è quello di presentare una panoramica dei settori in cui le radiazioni vengono correntemente utilizzate. L'utilizzo delle radiazioni ionizzanti è in continua evoluzione, quindi la presente trattazione non ha la pretesa di essere esaustiva, ma piuttosto di fornire utili informazioni che permettano di orientarsi in questo campo.

2. Settore medico

L'utilizzo delle radiazioni ionizzanti nel settore medico è vastissimo, e riguarda tecnologie utilizzate per:

- diagnosi, principalmente tecniche di "*diagnostica per immagini*", cioè tecniche di analisi che consentono di fornire immagini di aree dell'interno dell'organismo umano;
- terapia, attraverso tecniche che utilizzano le radiazioni ionizzanti prevalentemente per il trattamento delle patologie tumorali;
- metodiche miste, che associano entrambe le precedenti.

A grandi linee, le sorgenti radiogene utilizzate in campo medico possono essere: tubi radiogeni a raggi X, acceleratori di particelle e radioisotopi artificiali.

I tubi radiogeni a raggi X sono prevalentemente utilizzati per:

- radiografia convenzionale;
- tomografia (assiale) computerizzata - metodica che consente di riprodurre sezioni o strati corporei del paziente ed elaborazioni tridimensionali, con l'utilizzo di elaboratori di dati;
- altre tecniche correlate - radiologia interventiva, tecniche angiografiche, procedure terapeutiche o chirurgiche sotto guida radiologica, ecc.

Gli acceleratori di particelle (tra cui gli acceleratori lineari, o LINAC, e gli acceleratori circolari, detti ciclotroni) sono prevalentemente utilizzati per:

- trattamento in radioterapia con fasci esterni, tramite la produzione di fasci di particelle o radiazioni elettromagnetiche ad elevata energia e precisione, per il

bombardamento di aree del corpo colpite da patologie (tipicamente tumorali). Alcuni esempi non esaustivi sono costituiti da:

- telecobaltoterapia - le classiche "bombe al cobalto", attualmente obsolete, che utilizzavano il ^{60}Co ;
- adroterapia - forma particolare di radioterapia che utilizza, per trattare le patologie, particelle pesanti dette adroni, tra i quali ricordiamo gli ioni carbonio ed i protoni;
- terapia intraoperatoria (IORT, Intra-Operative RadioTherapy) - metodica terapeutica che associa la radioterapia all'intervento chirurgico;
- produzione dei radio-traccianti - ad esempio ciclotroni dedicati alla produzione di radionuclidi per le tecniche PET (vedi dopo).

I radioisotopi artificiali sono utilizzati sia in diagnostica che in terapia, ad esempio in:

- tomografia a emissione di positroni (PET, Positron Emission Tomography) - tecnica diagnostica che consente di misurare in modo quantitativo le funzioni, i processi metabolici e le reazioni biochimiche che avvengono all'interno dell'organismo umano. Tali processi vengono rappresentati mediante immagini della distribuzione spaziale e temporale di un tracciante radioattivo, preventivamente somministrato al paziente, che si distribuisce nell'organismo umano. Come traccianti vengono utilizzate molecole normalmente assimilate dal corpo umano, come il glucosio, l'acqua o l'ammoniaca, marcate con isotopi radioattivi emettitori di positroni (es. ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F) con un tempo di emivita particolarmente breve (minuti - ore), in modo da ridurre i problemi dosimetrici associati all'uso di sostanze radioattive. La PET è usata estensivamente in oncologia clinica, in cardiologia e neurologia. Pochi ospedali e Università possono permettersi l'acquisto e il mantenimento dei costosi apparati per produrre radiotraccianti, e la maggior parte dei PET clinici è supportata da fornitori esterni che riforniscono più strutture contemporaneamente;
- diagnostica in vitro - attività di laboratorio in cui vengono utilizzati come traccianti emettitori beta o gamma in piccole quantità (^{125}I , ^{51}Cr , ^{93}Tc , ecc.);
- radioterapia metabolica - tramite tecniche analoghe a quelle diagnostiche, prevede la somministrazione di radionuclidi eventualmente veicolati da farmaci, anticorpi monoclonali, peptidi e difosfonati, allo scopo di ottenere la loro localizzazione selettiva nelle zone del corpo da sottoporre a terapia. L'azione terapeutica avviene mediante l'assorbimento della dose di radiazioni nell'organo o tessuto bersaglio. In questo caso i tempi di dimezzamento dei radionuclidi sono generalmente più lunghi rispetto a quelli utilizzati nelle tecniche diagnostiche;
- brachiterapia (o curieterapia) - consiste nel posizionamento, per mezzo di speciali applicatori, di sorgenti radioattive (contenenti ^{192}Ir , ^{125}I , ecc.), per tempi limitati ed in volumi molto piccoli, all'interno del corpo umano.

3. Impianti di produzione di energia nucleare

Attualmente non è possibile installare nuovi impianti di produzione di energia nucleare in Italia; tuttavia sono presenti vecchi impianti in alcune parti d'Italia che ancora non hanno terminato la fase di "decommissioning"¹.

4. Ricerca scientifica e tecnologica

In questo campo, le radiazioni ionizzanti intervengono sia come argomento di studio sia come strumento di indagine nella fisica nucleare [INFN, 2012], 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". Inoltre, 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.

5. 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 sono di seguito descritti.

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. ¹⁹²Ir) 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 ⁶⁰Co all'²⁴¹Am), 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 meno [Tjugum & Johanse, 2002; Thyn, 2002].

¹ Smantellamento dell'impianto e rilascio del sito.

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 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 [Sowerby et alii, 2002].

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.

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. [Marucco, 2002].

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 [Dunn, 2002], oppure per valutare i parametri di crescita di crepe e rotture nelle pavimentazioni di asfalto [Braz et alii, 2002].

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 [Silverman]. 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 a solventi, invecchiamento e alte temperature;

- produzione di tessuti resistenti per uniformi, camici, ecc.;
- produzione di pellicole di confezionamento termo restringenti;
- produzione di pneumatici di automobili (processi di 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 disk, lenti a contatto, ecc.);
- trattamenti per la rifinitura superficiale di rivestimenti, lacche e inchiostri;
- trattamenti superficiali 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 fasci di particelle (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.

6. Alimenti e agricoltura

Altri due settori che utilizzano le radiazioni ionizzanti sia nelle tecniche analitiche che di trattamento sono l'agricoltura e l'industria alimentare².

Anche in questo caso, le radiografie sono usualmente utilizzate per ispezionare gli alimenti e le piante. Prodotti agricoli, come ad esempio noci, cereali ed altri 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 [Kraggerud et alii, 2009]: 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 ricercati i pesticidi contenenti metalli pesanti [Jørgehnson et alii, 2002], la birra, in cui sono ricercati i metalli pesanti ed altri elementi inorganici presenti in tracce, il miele, il polline, l'acqua minerale, il caffè [Moreira et alii, 2002; Mangala et alii, 2002; Costa et alii, 2002; Vives et alii, 2002], solo per citarne alcuni.

² Gli impianti per l'irradiazione di alimenti necessitano di specifiche stringenti autorizzazioni. In Italia vi è attualmente un solo impianto autorizzato all'irradiazione di patate, cipolle e aglio. Maggiori informazioni sono reperibili al seguente link:

http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=1166&area=sicurezzaAlimentare&menu=microbiologica.

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.

Quanto alle tecniche di irraggiamento con le radiazioni ionizzanti, queste 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. Usualmente, per questa applicazione si utilizzano sorgenti di ^{60}Co o ^{137}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 da 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 [Martin & Simmons, 2002].

L'uso delle radiazioni ha permesso lo studio e lo sviluppo di nuove tecniche antiparassitarie e di fertilizzazione che sono oggi 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.

7. Arte, archeologia, geologia e 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 [Buotaine, 2002; Milazzo 2002].

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 (XRF) 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. [Bruni et alii, 2002; Čechák et alii, 2002; Serebrjakov et alii, 2002; Janssens et alii, 2002] 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 [Rossi et alii, 2002]. 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 a 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 radioisotopi 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 [Borsaru et alii, 2002].

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 consente di monitorare la dispersione e la diffusione degli inquinanti [Meijer et alii, 2002].

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 i fasci elettronici (e-beam) 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 fasci elettronici 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 ($\text{OH}\cdot$, $\text{H}\cdot$, H_2O_2 , H_2 , e_{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.

8. Altre applicazioni

Le radiazioni ionizzanti trovano altri campi di impieghi significativi in alcune applicazioni relative alla sicurezza. Queste tecnologie utilizzano, oltre ai raggi X standard, tomografie con raggi X, radiografie gamma, ed anche svariate tecnologie basate sui neutroni [Gozani, 2002].

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, carceri, ecc..

Altre applicazioni consentono di individuare materiali esplosivi durante le operazioni di sminamento, materiali pericolosi quali agenti chimici, materiali nucleari, merce di contrabbando, droghe, ecc. [Cinausero et alii, 2002; Király et alii, 2002; Fioretto et alii, 2002; Vourvopoluos et alii, 2002].

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.

Si citano 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.

Bibliografia

- BORSARU M., BERRY M., BIGGS M. e ROJC A., *"In-situ determination of sulphur in coal seams and oberburden rock by PGNAA"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 67;
- BOUTAINE J. L., *"Techniques of examination, characterization and analysis based on ionizing radiation applied to cultural heritage artefacts"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 89;
- BRAZ D., LOPES R. T. e MOTTA L. M. G., *"Research on fatigue cracking growth parameters in asphaltic mixture using computed tomography"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 273;
- BRUNI S., MAINO G., MARTIGNANI G. e PILOTTI L., *"Microanalysis and elemental composition of historical photographs"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 84;
- CECHAK T., GERNDT J., KOPECKA I., MUSILEK L., *"X-ray fluorescence in research on Czech cultural monuments"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 85;

- CINAUSERO M., FIORETTO E., PRETE G., BARBUI M., VIESTI G., LUNARDON M., NEBBIA G., PESENTE S., "Development of a thermal neutron based sensor for ridde explosive search", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 23;
- COSTA A. C. M., ANJOS M. J., LOPES R. T., MOREIRA S. e DE JEUS E. F. O., "Multielementar analysis of minerale water using SRTXRF", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 359;
- DE MEIJER R. J., LIMBURG J. e KOOMANS R. L., "Natural radionuclides for monitoring waste dispersal on land or on the sea floor", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 109;
- DUNN W. L., "A radio-optic method for measuring relative motion", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 117;
- FIORETTO E., BARBUI M., CINAUSERO M., PRETE G., VIESTI G., LUNARDON M., NEBBIA G., PESENTE S. e GIANGRANDI S., "Neutron back-scattering sensor for the detection of land mines", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 25;
- GOZANI T., "The role of neutron based inspection techniques in the post 9/11/01 era", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 24;
- Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. <http://www.infn.it/index.php?lang=it>;
- JANSSENS K., PROOST K., BULSKA E., ORTNER H., SCHREINER M., FALKENBERG G., "Speciation and microanalysis of environmental and artistic materials by means of micro-XRF and micro-XANES", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 121;
- JORGEHNSEN N., LAURSEN J., HOLM P. E., VIKSNA A. e PIND N., "EDXRF multi-elemental mapping of heavy metal containing pesticide residue on former horticultural soil", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 351;
- KIRALY B., SANAMI T., DOCZI R. e CSIKAI J., "Detection of explosives and illicit drugs using neutrons", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 24;
- KRAGGERUD H., WOLD J. P.; HOY M., ABRAHAMSEN R. K., "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;

- MANGALA M. L., WAMWANGI M. D., RATHORE I. V. S., KATIA S. K., *"Characterization of honey, pollen and bee tissues samples for trace elements content"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 353;
- MARUCCO A., *"Low-energy ED_XRF spectrometry applications in gold assaying"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 131;
- MARTIN R. C., SIMMONS C. M. e Li X., *"Genetic mutation of seeds induced by fast neutron irradiation"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 15;
- MILAZZO M., *"X- ray fluorescence applications to archaeometry. Possibility of obtaining non-destructive quantitative analysis"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 92;
- MOREIRA S., VIVES A. E. S., DE JEUS E. F. O., *"Characterization of beers by synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence analysis"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 150;
- ROSSI M., CASALI F., ROMANI D., BONDIOLI L., MACCHIARELLI R. e ROOK L., *"Micro CT-scan in paleobiology": application to the study of dental tissues"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 83;
- SEREBRJAKOV A. S., FEDKOV E. A., DEMCHENKO E. L., KOUDRASHOV V. I, SOKOLOV A. D., *"X-ray fluorescent for investigation of artworks"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 86;
- SILVERMAN J. *"No. 3 in the series: What Can Radioisotopes Do for Man? The Application of Radiation Technology in Industrial Processes Current and Future Perspectives"*, Laboratory for Radiation and Polymer Science, University of Maryland, USA;
- SOWERBY B. D., Lim C. S. e TICKNER J. R., *"Review of radioisotope techniques for on-line determination for ash in coal"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 118;
- THYN J., *"Radiotracer applications for the analysis of complex flow structure in industrial apparatuses"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 135;
- TJUGUM S. A. e JOHANSE G. A., *"A compact low-energy multibeam gamma-ray densitometer for pipe-flow measurements"*, atti *"5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application"*, Bologna, 9-14

giugno 2002", pag. 108;

- VIVES A. E. S., SIMABUCO S. M., NASCIMENTO FILHO V. F., "Determination of metals in coffee by total refraction X-ray fluorescence analysis", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 371;
- VOURVOPOLUOS G., WOMBLE P. C., PASCHAL J., NOVIKOV I. e BARZILOV A., "The use of pulsed neutrons for the detection of explosives and illicit drugs", atti "5th International topical meeting on industrial radiation and radioisotope measurement application", Bologna, 9-14 giugno 2002, pag. 27.

Data di chiusura del documento

25/08/2017

Conoscere il rischio

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Contarp è la struttura tecnica dell'Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione.

Per informazioni

contarp@inail.it