

## Principali impieghi delle radiazioni ionizzanti

### 1. Introduzione

L'obiettivo del presente approfondimento è presentare una panoramica dei settori in cui le radiazioni ionizzanti di origine artificiale vengono correntemente e deliberatamente utilizzate. In questo contesto non saranno prese in considerazione le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti.

La presente trattazione non ha la pretesa di essere esaustiva, ma piuttosto di fornire utili informazioni che permettano di orientarsi in questo campo.

L'impiego diretto o indiretto delle radiazioni ionizzanti riguarda un numero sempre crescente di settori<sup>1</sup>, ed è in continua evoluzione, a dispetto della percezione comune che lo relega ad ambiti quali quello medico e della produzione di energia nucleare (attualmente non consentita nel nostro paese).

La capacità delle radiazioni ionizzanti di vedere attraverso la materia opaca rispetto alle radiazioni ottiche e la semplicità con cui le molecole marcate (in cui uno o più atomi sono sostituiti da radionuclidi) possono essere monitorate sono proficuamente utilizzate nelle più disparate applicazioni.

L'uso delle radiazioni ionizzanti spesso risulta assai più vantaggioso di altre tecnologie disponibili e in alcuni casi è divenuto difficilmente sostituibile o addirittura insostituibile: come esempi si possono citare i processi di sterilizzazione, i controlli di qualità di molti manufatti, la produzione di materiali ad alta ingegnerizzazione, la conservazione delle opere d'arte e i controlli di sicurezza.

### 2. Settore medico

Nella medicina contemporanea l'utilizzo delle radiazioni ionizzanti è vastissimo<sup>2</sup>; i benefici per i pazienti di tali applicazioni sono stati ampiamente dimostrati, ed è difficile immaginare un sistema sanitario senza le moderne tecniche diagnostiche o interventistiche guidate dall'*imaging* radiologico.

---

<sup>1</sup> "Encyclopedia of Nuclear Energy", Editor-in-chief Ehud Greenspan, ELSEVIER, 2021:  
<https://www.sciencedirect.com/book/9780128197325/encyclopedia-of-nuclear-energy>

<sup>2</sup> "Application of ionising radiation in healthcare":  
[http://icrpaedia.org/Application\\_of\\_ionising\\_radiation\\_in\\_healthcare](http://icrpaedia.org/Application_of_ionising_radiation_in_healthcare).

Pertanto, non è difficile comprendere perché le radiazioni ionizzanti usate per scopo medico costituiscano la maggiore fonte di esposizione dell'uomo alle radiazioni artificiali [WHO, 2016].

In medicina le radiazioni ionizzanti sono utilizzate sia per la diagnosi che per la terapia, eventualmente associate insieme con metodiche miste. Queste due categorie possono essere ulteriormente suddivise a seconda se la radiazione ionizzante sia somministrata attraverso sorgenti esterne o interne, come di seguito schematizzato:

### 1. Diagnosi:

- Sorgenti esterne a raggi X: radiografia, fluoroscopia, tomografia computerizzata. In questo caso la diagnosi è effettuata principalmente attraverso tecniche di "radiologia diagnostica", che usano macchine a raggi X per ottenere immagini di aree dell'interno dell'organismo umano;
- Sorgenti interne non sigillate: radiofarmaci impiegati in medicina nucleare<sup>3</sup> diagnostica, somministrati al paziente per la visualizzazione delle immagini di organi e tessuti in scintigrafia nucleare e nella PET (Positron Emission Tomography).

2. Terapia<sup>4</sup>: le tecniche di radioterapia sfruttano la capacità delle radiazioni di distruggere i tessuti patologici. Molte tipologie di sorgenti di radiazioni ionizzanti sono utilizzate per il trattamento di patologie tumorali o altre malattie.

- Sorgenti esterne: terapia con fasci di radiazione esterna (EBRT, External Beam Radiation Therapy, chiamata anche teleterapia), generati attraverso:
  - macchine a raggi X;
  - acceleratori lineari che generano raggi X ad alta energia;
  - capsule che racchiudono sorgenti radioattive sigillate (ad esempio <sup>60</sup>Co nella radiochirurgia stereotassica gamma o unità "gamma knife"<sup>5</sup>).
- Sorgenti interne (radionuclidi):
  - Sigillate: brachiterapia [De Sanctis et alii, 2021] (chiamata anche radioterapia interventistica);
  - Non sigillate: radiofarmaci impiegati in medicina nucleare terapeutica.

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;

---

<sup>3</sup> "Nuclear medicine": [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_medicine](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_medicine).

<sup>4</sup> "Radiation therapy": [https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation\\_therapy](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_therapy).

<sup>5</sup> "Gamma knife": [https://it.wikipedia.org/wiki/Gamma\\_Knife](https://it.wikipedia.org/wiki/Gamma_Knife).

- tomografia computerizzata (CT, Computerized Tomography), metodica che consente di riprodurre sezioni o strati corporei del paziente ed elaborazioni tridimensionali, con l'utilizzo dei raggi X e 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 macchinari molto grandi che emettono raggi X ad alta energia e fasci di elettroni. Sono i più comuni dispositivi usati in oncologia radiologica, e 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:
  - 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 (utilizzando elettroni, raggi X e brachiterapia) all'intervento chirurgico;
- produzione dei radio-traccianti: ad esempio ciclotroni dedicati alla produzione di radionuclidi per le tecniche PET.

I radioisotopi artificiali sono utilizzati sia in diagnostica sia in terapia nelle tecniche di medicina nucleare. Queste differiscono dalla radiologia generale in quanto l'esposizione alle radiazioni ionizzanti avviene per somministrazione di una sostanza radioattiva, per cui il paziente diventa radioattivo per un breve periodo; in tal modo si può determinare il funzionamento degli organi, il flusso sanguigno, ecc. Alcuni esempi di usi dei radioisotopi sono:

- tomografia a emissione di positroni (PET) – 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.  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$ ) 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;
- diagnostica in vitro – attività di laboratorio in cui vengono utilizzati come traccianti emettitori beta o gamma in piccole quantità ( $^{125}\text{I}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{93}\text{Tc}$ , 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 - consiste nel posizionamento in volumi molto piccoli all'interno del corpo umano di sorgenti radioattive (contenenti  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{125}\text{I}$ , ecc.) per mezzo di speciali applicatori. Tali sorgenti sono poste all'interno o vicino un tumore, esponendolo ad un costante flusso di radiazioni finché la radioattività decade. Talvolta gli impianti sono temporanei (24-48 ore) e sono quindi rimossi, oppure possono essere posti permanentemente nel tumore;
- radiocirurgia stereotassica gamma o unità "gamma knife": tecnica di radioterapia usata per il trattamento dei tumori cerebrali (o altre patologie) per mezzo di sorgenti al  $^{60}\text{Co}$ , posizionati in una matrice schermata. Il dispositivo produce raggi gamma ad alta intensità che vengono diretti e concentrati su punti di destinazione nel cervello del paziente, in modo da trattare selettivamente il tumore, lasciando i tessuti cerebrali circostanti relativamente risparmiati.

Infine, altre due importantissime applicazioni delle radiazioni ionizzanti in campo medico sono:

- la sterilizzazione di materiali sanitari, presidi chirurgici, farmaci, mediante impianti di sterilizzazione con sorgenti radioisotopiche o acceleratori di elettroni [Jacobs, 2022];
- lo sviluppo di nuovi farmaci, mediante l'uso di radiotraccianti [Venkatech].

### **3. Impianti di produzione di energia nucleare**

L'energia nucleare, responsabile dei legami tra protoni e neutroni nei nuclei atomici, può essere liberata ed estratta in vari modi:

- Fissione nucleare, in cui il nucleo atomico di un elemento chimico pesante (ad esempio  $^{235}\text{U}$  o  $^{239}\text{Pu}$ ) decade in frammenti o nuclei atomici di minori dimensioni, con emissione di una grande quantità di energia e radioattività. Può avvenire spontaneamente in natura oppure essere indotta artificialmente tramite bombardamento con neutroni. È la reazione nucleare comunemente utilizzata nei reattori nucleari per la produzione di energia (termica ed elettrica) e nei tipi più semplici di arma nucleare, quali le bombe all'uranio o al plutonio;
- Fusione nucleare, nella quale i nuclei di due o più atomi si uniscono tra loro formando il nucleo di un nuovo elemento chimico. La fusione degli elementi leggeri (fino al numero atomico 28 - nichel) è una reazione esotermica. Il processo di fusione di nuclei atomici è il meccanismo alla base della formazione delle stelle, ed è stata prodotta artificialmente per amplificare la potenza di una bomba atomica. I reattori a fusione sono ancora in corso di progettazione e di costruzione, in quanto al momento consumano complessivamente più energia elettrica di quella che producono.

- Decadimento radioattivo, insieme di processi fisici attraverso cui i nuclei atomici instabili tendono a perdere l'energia in eccesso attraverso l'emissione di radiazioni. Un'applicazione è costituita dalle batterie nucleari, che riescono a generare corrente mediante il decadimento radioattivo in esse contenute, principalmente plutonio.

In Italia tutte le installazioni nucleari realizzate nel contesto del programma nazionale nucleare durante gli anni 60-80 sono state definitivamente chiuse nel 1987, dopo tre referendum concernenti l'energia nucleare, con la sola eccezione di alcuni reattori di ricerca.

Pertanto le attività presenti nel territorio italiano sono indirizzate al *decommissioning* (cioè lo smantellamento degli impianti ed il rilascio dei siti) delle installazioni nucleari ancora presenti, con la gestione delle problematiche relative allo spegnimento del combustibile, dei rifiuti radioattivi di questi impianti, la previsione e le attività relative al collocamento e alla costruzione del deposito nazionale per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa e media intensità (LLW/ILW) e di un deposito temporaneo per lo stoccaggio dei rifiuti a media ed alta intensità (ILW/HLW)<sup>6</sup>.

Comunque, è da notare che in numerosi paesi, anche vicini all'Italia, sono presenti impianti nucleari, pertanto le problematiche di radioprotezione della popolazione legati a questo tipo di impianti sono sempre attuali, e mettono in evidenza la necessità dell'analisi e del monitoraggio ambientale delle relative eventuali emissioni, ad esempio in caso di incidente e *fall-out* radioattivo.

Infine, non ci si può esimere dal ricordare che in Europa vi è attualmente un acceso dibattito in merito sull'energia nucleare "pulita" (cosiddetti nuovi impianti di "quarta generazione") nell'ambito della politica europea sulla decarbonizzazione e che le moderne installazioni nucleari, che offrano sufficienti garanzie di sicurezza, sono state attualmente comprese nella tassonomia verde o "green"<sup>7</sup>.

#### 4. Ricerca scientifica e tecnologica

Nella ricerca scientifica e tecnologica, le radiazioni ionizzanti intervengono sia come argomento di studio sia come strumento di indagine nella fisica nucleare<sup>8</sup>, nell'astrofisica, nella chimica, nella biochimica, ecc. Le applicazioni sono innumerevoli, e di seguito di riportano alcuni argomenti non esaustivi<sup>9</sup>.

---

<sup>6</sup> a) Governo Italiano, "Implementation of Council Directive 2009/71/EURATOM of 25 June 2009 Establishing a Community framework for the nuclear safety of nuclear installations as amended by the Council Directive 2014/87/EURATOM of 8 July 2014, Second Italian National Report", 2020: [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2021-03/15\\_it\\_2nd\\_2020\\_report\\_a-nsd\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2021-03/15_it_2nd_2020_report_a-nsd_0.pdf);

b) <https://www.depositonazionale.it/>.

<sup>7</sup> La tassonomia "verde" dell'Unione europea è una classificazione delle attività economiche che possono essere considerate sostenibili dal punto di vista ambientale. La Commissione europea ha incluso il gas naturale e l'energia nucleare nell'elenco delle attività che ritiene "sostenibili" per la nuova strategia finanziaria europea. Il documento introduce dei rigidi requisiti, basati su analisi scientifiche, per stabilire se un'attività possa essere considerata verde o meno. Si veda il portale "Eu taxonomy for sustainable activities": [https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance/eu-taxonomy-sustainable-activities\\_en](https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance/eu-taxonomy-sustainable-activities_en).

<sup>8</sup> Istituto Nazionale di Fisica Nucleare: <https://home.infn.it/it/>.

<sup>9</sup> "Radiation Physics and Chemistry":

- Rilevazione e misura tramite radiazioni: 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. Di seguito si riportano esempi di alcune tecniche analitiche che utilizzano radiazioni ionizzanti:
  - Tecniche radiografiche (che utilizzano raggi X, raggi gamma, particelle beta, elettroni secondari, neutroni), radiografie ad emissione di elettroni, tomografiche, 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;
  - Microscopia a *ion beam*;
  - Spettroscopia Raman;
  - Spettroscopia Mössbauer;
  - Datazione con Carbonio-14;
  - Tecniche di scattering a raggi gamma.
  - 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.
- Processi fondamentali nella fisica delle radiazioni
- Chimica/biochimica: 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".

### 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. [IAEA, 2020]. Alcuni di questi esempi sono di seguito descritti.

**Radiografie industriali** [CRANE, 2018]: un'applicazione molto diffusa riguarda l'impiego di intensi fasci di raggi X o gamma per radiografare componenti industriali 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

---

<https://www.sciencedirect.com/journal/radiation-physics-and-chemistry>.

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:** 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 meno [Tjugum et alii, 2002; Thýn et alii, 2004].

**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.

Inoltre, 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, 2009].

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, con le stesse metodiche accennate nel capitolo precedente: ad esempio viene misurata la percentuale dei diversi metalli presenti nelle leghe metalliche, comprese quelle di gioielleria [Marucco, 2004], negli impianti, nelle saldature industriali, ecc.

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, 2004], oppure per valutare i parametri di crescita di crepe e rotture nelle pavimentazioni di asfalto [Braz et alii, 2004].

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, ecc.) dei reagenti, e senza l'aggiunta di catalizzatori o di additivi. Ad esempio, questa proprietà è ampiamente sfruttata nella tecnologia dei polimeri [Ferry et alii, 2016], nei processi di sintesi, polimerizzazione, modifica delle proprietà, reticolazione, degradazione e sintesi di compositi. 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. 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;
- sintesi e trattamenti superficiali di nanomateriali [Flores-Roja et alii, 2020];
- produzione di membrane di filtrazione autopulenti e chimicamente resistenti (iontrack);
- 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 alimentare<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Maggiori informazioni sono reperibili al seguente link:

[http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2\\_6.jsp?lingua=italiano&id=1166&area=sicurezzaAlimentare&me](http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=1166&area=sicurezzaAlimentare&me)



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 formaggi [Auer et alii, 2021]: 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 [Jørgensen et alii, 2005], la birra [Gama et alii, 2017], in cui sono ricercati i metalli pesanti ed altri elementi inorganici presenti in tracce, il miele, il polline, le api [Kump et alii, 1996], il latte [De Araújo et alii, 2019], il caffè [Cloete et alii, 2019], 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.

Le tecniche di irradiazione con le radiazioni ionizzanti di prodotti agricoli ed alimentari in genere consistono nel trattamento con dosi ben definite di radiazioni ionizzanti, come raggi gamma, raggi X, o fasci di elettroni, e vengono estensivamente impiegate per la sterilizzazione e la conservazione di alimenti<sup>11</sup> e prodotti agricoli [IAEA, 2004].

Usualmente, per questa applicazione si utilizzano sorgenti di <sup>60</sup>Co o <sup>137</sup>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*). Questa tecnologia di conservazione migliora la sicurezza e la qualità igienica degli alimenti, riducendo il rischio di malattie provocate dal cibo. Tale trattamento quando applicato con procedure corrette è ritenuto efficace e sicuro.

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);
- disinfezione da insetti e parassiti vari, tipo scarafaggi, falene ed altri;
- ritardo della germogliazione e della maturazione (tecnica utilizzata per patate, cipolle, prodotti ortofrutticoli).

---

[nu=microbiologica](#).

<sup>11</sup> Istituto Superiore di Sanità (ISS), "Alimentazione, nutrizione e sicurezza degli alimenti, Alimenti irradiati": [https://www.iss.it/sicurezza-microbiologica-degli-alimenti/-/asset\\_publisher/3dUYTNU4YVv2/content/alimenti-irradiati](https://www.iss.it/sicurezza-microbiologica-degli-alimenti/-/asset_publisher/3dUYTNU4YVv2/content/alimenti-irradiati).

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 radiazioni ionizzate sono state e sono tutt'ora utilizzate estensivamente per lo sviluppo di nuove varietà di piante<sup>12</sup>. Infatti, l'irradiazione con raggi gamma e X può indurre mutazioni e quindi accelerare considerevolmente il processo di selezione di nuove caratteristiche nelle piante interessanti ed utili dal punto di vista agronomico, mimando il processo naturale di mutazione spontanea.

Infine, 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, ambiente, geologia**

Le metodiche analitiche che utilizzano radiazioni ionizzanti (analisi per attivazione neutronica, fluorescenza a raggi X, radiografia a raggi X, spettrometria a raggi gamma, ecc.) sono molto diffuse nello studio e nella caratterizzazione dei beni culturali: 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, sulla ricerca di elementi in tracce, senza distruggerle [IAEA, 2017].

Ad esempio, nel settore della pittura le tecniche radiografiche sono preziose alleate per avere informazioni sul supporto e sull'imprimitura, sul disegno preparatorio, sul colore e sui pennelli impiegati, consentendo di svelare ripensamenti dell'artista o di scoprire clamorosi falsi. Inoltre, tramite la fluorescenza a raggi X si possono determinare gli elementi presenti in un materiale e studiare la composizione dei pigmenti utilizzati: questa tecnica permette di stabilire, per esempio, se un quadro è

---

<sup>12</sup> International Atomic Energy Agency (IAEA), "Mutation breeding": <https://www.iaea.org/topics/mutation-breeding>.

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. [Hložek et alii, 2019; Stefanik et alii, 2019; Cortella et alii, 2020] 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, 2004]. 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 naturali 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, 2004].

Nuove tecnologie prevedono di misurare tramite spettrometria gamma le variazioni di concentrazione di elementi radioattivi naturali nel suolo, per mappare l'eventuale presenza di giacimenti di idrocarburi [Senouci et alii, 2020].

L'uso dei traccianti radioattivi o di radionuclidi naturali o artificiali già presenti nell'ambiente consente inoltre di studiare la mappatura delle falde acquifere e delle risorse idriche sotterranee [Michel et alii, 2009], di analizzare e misurare l'accumulo

dei sedimenti sul fondo marino e in altri distretti ambientali [Bezuidenhout et alii, 2020], di seguire il corso delle correnti oceaniche e atmosferiche e di misurare il tasso di accumulo dei ghiacci nelle calotte polari.

L'uso dei traccianti radioattivi consente di monitorare la dispersione e la diffusione ambientale degli inquinanti (acque contaminate, microplastiche, ecc. [Lanctôt et alii, 2018]).

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 [Nakhla et alii, 2022; Folcik et alii, 2020].

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 ( $\text{OH}\cdot$ ,  $\text{H}\cdot$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{e}_{\text{aq}}^-$ ), 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.

### **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, e tecnologie basate sui neutroni [Gozani, 2004].

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, alle dogane, nelle carceri, ecc.

Varie tipologie di monitor e sensori mobili per le radiazioni [Kim et alii, 2019; Zao et alii, 2019]<sup>13</sup> sono stati sviluppati per l'utilizzo nei porti, negli aeroporti e nelle aree urbane per rilevare la presenza di materiali radioattivi illegali.

---

<sup>13</sup> Radiation portal monitor, [https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation\\_portal\\_monitor](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_portal_monitor).

Altre applicazioni consentono di individuare materiali esplosivi durante le operazioni di smontaggio, materiali pericolosi quali agenti chimici, materiali nucleari, merce di contrabbando, droghe, ecc. [Nebbia et alii, 2005; Ferreira et alii 2010].

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 ( $^{241}\text{Am}$ ).

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.

## 9. Conclusioni

Come si è cercato di evidenziare, le radiazioni ionizzanti sono oggi impiegate in svariatissimi settori della vita moderna, medici, scientifici, ma anche industriali, artistici, ambientali, ecc., ed il numero delle loro 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, sia agli eventuali rischi che presentano.

## Bibliografia

- J. Auer, M. Reiter, S. Senck, A. Reiter, J. Kastner, K. Mathmann, "Investigation of opening eye defects and effects of different ripening profiles on eye structure in semi-hard cheese using X-ray micro-computed tomography", *Food Structure*, 2021, 28: <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100190>.
- J. Bezuidenhout, "The investigation of natural radionuclides as tracers for monitoring sediment processes", *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 181: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104135>.
- M. Borsaru, M. Berry, M. Biggs, A. Rojc, "In situ determination of sulphur in coal seams and overburden rock by PGNA", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, 213, pp. 530-534: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01623-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01623-9).

- D. Braz, R. T. Lopes, L. M. G. Motta, "Research on fatigue cracking growth parameters in asphaltic mixtures using computed tomography", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 213, pp. 498-502: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01610-0](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01610-0).
- K. J. Cloete, Ž. Šmit, R. Minnis-Ndimba, P. Vavpetič, A. du Plessis, S. G. le Roux, P. Pelicon, "Physico-elemental analysis of roasted organic coffee beans from Ethiopia, Colombia, Honduras, and Mexico using X-ray micro-computed tomography and external beam particle induced X-ray emission", Food Chemistry: X, 2019, 2: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2019.100032>.
- L. Cortella, C. Albino, Q. K. Tran, K. Froment, "50 years of French experience in using gamma rays as a tool for cultural heritage remedial conservation", Radiation Physics and Chemistry, 2020, 171: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108726>.
- R. L. Crane "Radiographic Inspection of Composite Materials", Editor(s): Peter W.R. Beaumont, Carl H. Zweben, Comprehensive Composite Materials II, Elsevier, 2018, pp. 167-194: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03928-X>.
- U. B. De Araújo, A. C. M. da Costa, D. F. de Oliveira, E. F. O. de Jesus, M. J. Anjos, E. Teixeira Mársico, C. da Silva Carneiro, R. de Oliveira Resende Ribeiro, R. T. Lopes, "Analysis of milk trace elements with a home-made portable automated total reflection x-ray fluorescence system", Radiation Physics and Chemistry, 2019, 156, pp. 216-221: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.10.026>.
- V. De Sanctis, G. Facondo, G. Vullo, "Principles and indications of brachytherapy", Reference Module in Biomedical Sciences, Elsevier, 2021: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822960-6.00063-6>.
- W. L. Dunn, "A radio-optic method for measuring relative motion", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 213, pp. 481-485: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01606-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01606-9).
- F. J. O. Ferreira, V. R. Crispim, A. X. Silva, "Detection of drugs and explosives using neutron computerized tomography and artificial intelligence techniques", Applied Radiation and Isotopes, 2010, 68 (6), pp. 1012-1017: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.01.019>.
- M. Ferry, Y. Ngono-Ravache, C. Aymes-Chodur, M. C. Clochard, X. Coqueret, L. Cortella, E. Pellizzi, S. Rouif, S. Esnouf, "Ionizing Radiation Effects in Polymers", Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2016: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02095-6>.
- G. G. Flores-Rojas, F. López-Saucedo, E. Bucio, "Gamma-irradiation applied in the synthesis of metallic and organic nanoparticles: A short review", Radiation Physics and Chemistry, 2020, 169: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X17313439>.



- A. M. Folcik, S. D. Pillai, "A critical review of ionizing radiation technologies for the remediation of waters containing Microcystin-LR and *M. aeruginosa*", *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 177: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109128>.
- E. M. Gama, C. C. Nascentes, R. P. Matos, G. de C. Rodrigues, G. D. Rodrigues, "A simple method for the multi-elemental analysis of beer using total reflection X-ray fluorescence", *Talanta*, 2017, 174, pp. 274-278: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.05.059>.
- T. Gozani, "The role of neutron based inspection techniques in the post 9/11/01 era", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, 213, pp. 460-463: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01590-8](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01590-8).
- M. Hložek, T. Trojek, R. Prokeš, V. Linhart, "Mediaeval metal threads and their identification using micro-XRF scanning, confocal XRF, and X-ray micro-radiography", *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, 155, pp. 299-303: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.04.016>.
- "Irradiation as a phytosanitary treatment of food and agricultural commodities", *Proceedings of a final research coordination meeting organized by the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture*, IAEA, 2004: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1427\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1427_web.pdf).
- "Uses of ionizing radiation for tangible cultural heritage conservation", *IAEA Radiation Technology Series N. 6*, International Atomic energy agency (IAEA), Vienna, 2017: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/16-17821\\_PUB1747\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/16-17821_PUB1747_web.pdf).
- "Industrial applications of sealed radioactive sources", *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, Vienna, 2020: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1925web.pdf>.
- G. P. Jacobs, "Irradiation of pharmaceuticals: A literature review", *Radiation Physics and Chemistry*, 2022, 190: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109795>.
- N. Jørgensen, J. Laursen, A. Viksna, N. Pind, P. E. Holm, "Multi-elemental EDXRF mapping of polluted soil from former horticultural land", *Environment International*, 2005, 31 (1), pp. 43-52: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.06.007>.
- Y. Kim, M. Kim, K. T. Lim, J. Kim, G. Cho, "Inverse calibration matrix algorithm for radiation detection portal monitors", *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, 155, pp. 127-132: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.07.022>.
- P. Kump, M. Nečemer, J. Šnajder, "Determination of trace elements in bee honey, pollen and tissue by total reflection and radioisotope X-ray fluorescence spectrometry", *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1996, 51 (5), pp. 499-507: [https://doi.org/10.1016/0584-8547\(95\)01435-7](https://doi.org/10.1016/0584-8547(95)01435-7).



- C. M. Lanctôt, M. Al-Sid-Cheikh, A. I. Catarino, T. Cresswell, B. Danis, H. K. Karapanagioti, T. Mincer, F. Oberhänsli, P. Swarzenski, I. Tolosa, M. Metian, "Application of nuclear techniques to environmental plastics research", *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, 192, pp. 368-375: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.07.019>.
- A. Marucco, "Low-energy ED-XRF spectrometry application in gold assaying", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, 213, pp. 486-490: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01608-2](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01608-2).
- R. L. Michel, Chapter 5 "Radionuclides as Tracers and Timers in Surface and Groundwater", Editor(s): Klaus Froehlich, *Radioactivity in the Environment*, Elsevier, 2009, 16, pp. 139-230: [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(09\)01605-2](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(09)01605-2).
- S. F. Nakhla, A. Arafa, I. S. Naga, M. Mohamed, H.A. Alsherbeny, N. M. Fahmi, H. Hosny, S. Moussa, "Primary and secondary sludge treatment using ionizing radiation technology in Alexandria, Egypt", *Applied Radiation and Isotopes*, 2022: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110101>.
- G. Nebbia, S. Pesente, M. Lunardon, S. Moretto, G. Viesti, M. Cinausero, M. Barbui, E. Fioretto, V. Filippini, D. Sudac, K. Nađ, S. Blagus, V. Valković, "Detection of hidden explosives in different scenarios with the use of nuclear probes", *Nuclear Physics A*, 2005, 752, pp. 649-658: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.02.091>.
- M. Rossi, F. Casali, D. Romani, L. Bondioli, R. Macchiarelli, L. Rook, "MicroCT Scan in paleobiology: application to the study of dental tissues", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, 213, pp. 747-750: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01697-5](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01697-5).
- M. Senouci, K. Allek, "Application of Bayesian classifier to magnetic and gamma ray spectrometry data for targeting hydrocarbon microseepages", *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 181: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104145>.
- B. D. Sowerby, "Nuclear techniques for the on-line bulk analysis of carbon in coal-fired power stations", *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, 67 (9), pp. 1638-1643: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.04.007>.
- M. Stefanik, L. Sklenka, O. Huml, J. Rataj, "Activation analysis of Tibetan coins and thermal neutron flux measurement at the VR-1 training reactor", *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, 155, 2019, pp. 304-309: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.06.032>.
- J. Thýn, R. Žitný, "Radiotracer applications for the analysis of complex flow structure in industrial apparatuses", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, 213, pp. 339-347: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01648-3](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01648-3).

- S. A. Tjugum, J. Frieling, G. A. Johansen, "A compact low energy multibeam gamma-ray densitometer for pipe-flow measurements", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2002, 197 (3-4), pp. 301-309: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01481-7](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01481-7).
- M. Venkatech, A. Korde, "Medicine: new drug developments", rif. 1, Volume 4, section 12, pp. 274-279.
- "Communicating radiation risks in paediatric imaging – information to support healthcare discussions about benefit and risk", World Health Organization (WHO), 2016: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/205033>.
- J. Zhao, C. J. Sullivan, "Detection and parameter estimation of radioactive sources with mobile sensor networks", Radiation Physics and Chemistry, 2019, 155, pp. 265-270: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.06.018>.

### **Data di chiusura del documento**

**Febbraio 2022**

### **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](mailto:contarp@inail.it)