

Scheda 2 – Nucleare per l’Ambiente e per i Beni Culturali

In collaborazione con newcleo

A cura di Andrea Pola ingegnere nucleare e professore ordinario di Misure e Strumentazione Nucleari presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano

Articolo di giornale

Estratto dall’articolo “*Da Picasso al Louvre a Leonardo in Italia: così gli acceleratori di particelle salvano i capolavori*”

di Alessia Cruciani, pubblicato il 01/03/2021 nel *Corriere Innovazione*.

<https://corriereinnovazione.corriere.it/cards/da-picasso-louvre-leonardo-italia-cosi-acceleratori-particelle-salvano-capolavori/primato-mondiale.shtml>

Il gioiello del Louvre

Dietro al sorriso della Mona Lisa si nascondono anni di ricerche scientifiche. Leonardo Da Vinci aveva studiato attentamente i muscoli e i nervi coinvolti in quel delicato movimento della bocca. Per questo il risultato è così perfetto. Il genio del Rinascimento aveva capito prima di tutti che l’arte non può essere divisa dalla scienza. Chissà quanto si divertirebbe oggi se potesse frequentare i laboratori che sia nella sua Firenze sia a Parigi - dove portò quel ritratto di donna diventato il quadro più famoso del mondo - ospitano la massima espressione di scienza e tecnologia: acceleratori di particelle fondamentali per proteggere, conservare e restaurare i capolavori dell’arte. Non a caso si trova proprio al Louvre, esattamente nel museo dove è esposta la Gioconda, l’acceleratore di particelle Aglae (Accélérateur Grand Louvre d’Analyse Élémentaire), unico al mondo nel suo genere. «Prima di tutto per la collocazione in uno dei musei più importanti, e poi perché è l’unico dedicato solo al patrimonio culturale», spiega con orgoglio Claire Pacheco, scienziata dei materiali archeologici, da dieci anni a capo di Aglae.

I fake non hanno scampo

«Mandando dei fasci di ioni sull’opera, l’interazione tra i materiali e le particelle ci fornisce molte informazioni - continua Pacheco -. L’uso dei raggi X e gamma dice quali elementi compongono l’opera. Con la tecnica Pixe è possibile stabilire la provenienza e l’epoca a cui risalgono elementi come gemme, pietre, minerali, metalli. E, soprattutto, si tratta di una tecnica non invasiva. Possiamo preservare l’integrità degli oggetti analizzati». L’acceleratore da due milioni di volt, lungo 27 metri per 5 tonnellate di peso, «spara i suoi fasci soprattutto su oggetti, come ceramiche, reperti archeologici o sculture, inclusi i capolavori di Rodin e Picasso. Ed è capace di riconoscere se un’opera è originale», aggiunge l’esperta di fisica e chimica, ricordando anche il fake più celebre scovato da Aglae: la testa egiziana in vetro blu, considerata un antico ritratto di Tutankhamon. La presenza di piombo e arsenico ha rivelato che invece è un oggetto moderno, successivo al XVIII secolo. Pur trovandosi al Louvre, Aglae appartiene al Centro di ricerche e di restauro dei musei di Francia e analizza opere che vengono da tutti i musei del Paese.

Sotto esame Leonardo, Raffaello e Galileo

Eppure i primi a usare questa tecnologia sono stati proprio i fisici italiani, a Firenze. Dove entro l’anno esordirà un acceleratore di particelle ancora più innovativo, perché mobile, sviluppato dall’Istituto nazionale di fisica nucleare con il Cern di Ginevra. A guidare il Labec (Laboratorio di tecniche nucleari applicate all’Ambiente e ai Beni Culturali, gestito dalla sezione locale dell’Infn con il dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Firenze) c’è la dottoressa Speranza Falciano, fisica nota a livello internazionale (ha collaborato al Cern alla scoperta del Bosone di Higgs) e convinta che le tecnologie più innovative debbano trovare diverse applicazioni:

«Ecco perché un acceleratore è servito anche per capire quali materiali hanno usato Mantegna, Leonardo, Raffaello».

Il Labec ospita dal 2003 un acceleratore Tandem da tre milioni di volt che accelera particelle, in genere protoni, in un tubo a vuoto. Il fascio di particelle accelerate viene estratto in aria in una stazione di misura dove è posizionata l'opera da esaminare. «Così possiamo capire quali sono i materiali moderni più compatibili con gli originali in caso di restauro e stabilire la data del manufatto», chiarisce la dottoressa Falciano che poi ammette tra il serio e l'ironico: «Siccome eravamo invidiosi che il Louvre avesse un acceleratore esclusivo per i beni culturali abbiamo pensato di realizzarne uno anche noi, ma compatto e portatile da portare nei nostri musei e centri di restauro, come l'Opificio delle Pietre Dure di Firenze».

...

Introduzione

Le tecnologie nucleari per scopi non energetici hanno trovato applicazioni cruciali al di là della medicina, rivestendo un ruolo fondamentale nella cura dell'ambiente e nella tutela dei beni culturali e archeologici. L'articolo di A. Cruciani mette in chiara evidenza come l'impiego di metodi e strumenti del mondo nucleare, ovvero particelle accelerate e radioisotopi naturali o artificiali, renda possibile lo studio di opere d'arte e di reperti storici in modo completamente non invasivo. Anche se può sembrare strano, le stesse capacità sono sfruttate in settori completamente diversi come quello ambientale. Infatti, metodi e strumenti nucleari sono anche impiegati per analizzare e monitorare in tempo reale il suolo, le acque, l'aria e persino i cambiamenti climatici.

L'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) promuove da anni la ricerca e l'uso di questi strumenti, sottolineando l'importanza delle tecniche nucleari per la gestione sostenibile delle risorse e per la protezione del patrimonio naturale e culturale. In campo agricolo, ad esempio, le radiazioni consentono la sterilizzazione controllata degli insetti nocivi, il miglioramento delle sementi e il potenziamento della sicurezza alimentare. Nell'ambito dell'economia circolare, la strumentazione nucleare viene impiegata per il trattamento dei rifiuti, l'analisi, la separazione e il recupero dei materiali critici, nonché la decontaminazione di plastica e componenti elettronici.

Questa scheda mira ad approfondire questi temi, con una prospettiva scientifica, ambientale e culturale, mostrando come il nucleare contribuisca in maniera concreta alla tutela dell'ambiente e alla conservazione del patrimonio umano.

1. Radiazioni nucleari per l'ambiente e l'agricoltura

Le tecniche nucleari hanno un ruolo fondamentale nella gestione e nella tutela dell'ambiente, offrendo strumenti di analisi e monitoraggio precisi ed altamente affidabili. Grazie all'uso di nuclei radioattivi naturali e artificiali, nonché di acceleratori di particelle, è possibile studiare processi complessi che coinvolgono aria, acqua, suolo e biodiversità, raccogliendo informazioni che sarebbero impossibili da ottenere con metodi tradizionali. Possiamo dire che la radioattività, ovvero il processo di emissione spontanea di radiazioni da parte di alcuni nuclei atomici, diviene un alleato davvero importante, soprattutto perché le radiazioni, con la loro capacità di viaggiare attraverso i materiali, possono essere individuate e misurate con ragionevole facilità.

Nel settore atmosferico, ad esempio, i radioisotopi vengono impiegati per monitorare la **qualità dell'aria**, rivelando polveri sottili, inquinanti chimici e tracce di sostanze radioattive. Questi dati sono essenziali non solo per valutare l'impatto dell'industrializzazione e dei trasporti, ma anche per prevenire rischi per la salute umana e per gli ecosistemi. L'analisi dell'aria tramite traccianti radioattivi consente di determinare l'origine degli inquinanti, distinguendo tra fonti naturali, come eruzioni vulcaniche o polveri desertiche trasportate dai venti, e fonti antropiche, come le emissioni industriali o agricole.

Il **suolo** rappresenta un altro ambito di grande interesse. Le radiazioni nucleari permettono di identificare contaminazioni chimiche o la presenza di metalli pesanti accumulati nel terreno, di studiare i processi di erosione e deposizione e di comprendere il ciclo dei nutrienti essenziali per la crescita delle piante. L'utilizzo di nuclei radioattivi traccianti consente di seguire il movimento di elementi chimici attraverso strati diversi di terreno, offrendo indicazioni preziose per interventi di bonifica mirati e sostenibili. Queste analisi sono particolarmente utili in contesti agricoli intensivi o in aree prossime a siti industriali, dove il rischio di contaminazione del suolo è più elevato.

Le **acque superficiali e sotterranee** rappresentano un altro settore di applicazione critica. I radioisotopi vengono utilizzati per tracciare il percorso di inquinanti, nutrienti o sedimenti all'interno di fiumi, laghi e falde acquifere. Questo monitoraggio è funzionale a garantire la sicurezza dell'acqua destinata al consumo umano, per proteggere ecosistemi fragili e per pianificare interventi di gestione sostenibile delle risorse idriche. La capacità di seguire in tempo reale il movimento di sostanze chimiche permette di prevenire contaminazioni diffuse e di ottimizzare l'uso delle acque a fini agricoli o industriali.

Un'altra applicazione di grande impatto riguarda il monitoraggio dei **cambiamenti climatici**. Utilizzando isotopi traccianti e tecniche di datazione radiometrica, ovvero basato sulle leggi del decadimento nel tempo (decadimento) della radioattività dei nuclei atomici, risulta possibile analizzare lo scioglimento dei ghiacciai, la variazione dei livelli dei fiumi, l'alterazione dei cicli naturali e la distribuzione delle piogge. Queste informazioni sono essenziali per comprendere le dinamiche ambientali su scala locale e globale, valutare gli effetti dell'innalzamento delle temperature e progettare strategie di adattamento ai cambiamenti climatici.

Parallelamente agli usi ambientali, le radiazioni nucleari trovano applicazioni innovative anche in **agricoltura**. La tecnica degli insetti sterili (Sterile Insect Technique, SIT), ad esempio, è una metodologia che utilizza radiazioni per sterilizzare insetti nocivi. Questi insetti, incapaci di riprodursi, non contribuiscono alla diffusione di specie dannose, e permettono di ridurre in maniera naturale la pressione sugli ecosistemi e sulle colture agricole. Rispetto ai pesticidi chimici tradizionali, la SIT non provoca contaminazioni ambientali né danneggia altre specie utili, come impollinatori e predatori naturali, contribuendo alla conservazione della biodiversità. Questa tecnica è stata applicata con successo in varie parti del mondo per il controllo di mosche della frutta, tignole del cotone e zanzare vettori di malattie, dimostrando l'efficacia delle radiazioni nella gestione sostenibile delle coltivazioni.

Un ulteriore utilizzo agricolo delle radiazioni riguarda il miglioramento controllato delle sementi. Irradiando semi con dosi controllate di radiazioni, è possibile stimolare **mutazioni genetiche favorevoli** che aumentano la resistenza a malattie, parassiti e condizioni climatiche avverse, migliorando produttività e qualità dei raccolti. Questa pratica consente di selezionare varietà più adatte a specifici ambienti, riducendo la necessità di pesticidi e fertilizzanti chimici, con benefici sia economici sia ambientali.

2. Economia circolare e gestione dei rifiuti

La strumentazione nucleare ha un ruolo sempre più strategico nell'ambito dell'economia circolare, offrendo strumenti avanzati per l'analisi, la separazione e il recupero di materiali critici dai rifiuti industriali ed elettronici. Grazie all'impiego di radiazioni ionizzanti e di tecniche di rivelazione basate su isotopi traccianti, è possibile identificare con precisione la composizione chimica dei materiali, distinguendo tra metalli preziosi, componenti plastici, leghe complesse e sostanze contaminanti. Questa capacità permette di intervenire in maniera mirata, recuperando risorse e riducendo la quantità di rifiuti destinati alle discariche.

Un esempio concreto riguarda i rifiuti elettronici, sempre più presenti nella vita quotidiana a causa della diffusione di smartphone, computer, elettrodomestici e altri dispositivi tecnologici. Tra le tecniche nucleari più efficaci per analizzare questi materiali, spicca l'**analisi di attivazione neutronica** (Neutron Activation Analysis, NAA). Questo metodo consiste nell'esporre i materiali ad

un fascio di neutroni, tipicamente prodotti tramite opportune sorgenti o un acceleratore di particelle, il quale induce nei nuclei atomici presenti nei rifiuti una reazione nucleare. Come conseguenza, alcuni di questi nuclei diventano radioattivi ed emettono raggi gamma specifici. Misurando l'emissione di tale radiazione con strumenti ad alta risoluzione, quali i rivelatori al germanio iperpuro, è possibile determinare con grande accuratezza la composizione chimica dei materiali, individuando anche tracce di elementi presenti in quantità irrisorie.

Grazie alla NAA, è possibile identificare e separare metalli preziosi come oro, argento e platino, ma anche materiali strategici come tantalio, cobalto, litio, fondamentali per la produzione di batterie, semiconduttori e componenti elettronici avanzati. L'analisi è altamente selettiva e non distruttiva, il che significa che i componenti dei rifiuti possono essere recuperati e riutilizzati senza alterarne la struttura o comprometterne le proprietà chimico-fisiche.

L'impiego della NAA per i rifiuti elettronici riduce drasticamente la necessità di estrarre nuove materie prime dai giacimenti minerari, limitando così l'impatto ambientale associato all'estrazione e alla lavorazione dei metalli, che spesso comporta consumo di energia, inquinamento e degrado del territorio. Inoltre, il recupero di **materiali critici** attraverso tali tecniche aumenta l'efficienza dell'economia circolare, trasformando rifiuti complessi in risorse preziose e contribuendo a creare un ciclo produttivo più sostenibile.

Le radiazioni trovano applicazione anche nel trattamento dei rifiuti plastici e industriali. Tecniche come l'irraggiamento con fasci di elettroni o di fotoni permettono di decontaminare materiali contenenti sostanze chimiche nocive, microinquinanti o batteri, rendendoli sicuri per ulteriori processi di riciclo. Questo tipo di intervento è particolarmente rilevante in settori come l'imballaggio alimentare, dove la sicurezza dei materiali è essenziale, o nella gestione dei rifiuti ospedalieri, dove è necessario eliminare microrganismi potenzialmente pericolosi.

Il ruolo dell'IAEA è fondamentale anche in questo settore. L'agenzia promuove protocolli standardizzati per l'utilizzo sicuro delle radiazioni nei processi di riciclo e recupero dei materiali, fornisce linee guida per minimizzare i rischi ambientali e supporta programmi internazionali volti a ottimizzare l'efficienza della gestione dei rifiuti industriali e elettronici. Attraverso la formazione e lo scambio di conoscenze tra paesi membri, l'IAEA contribuisce a diffondere pratiche sostenibili e sicure, garantendo che le tecnologie nucleari siano utilizzate in maniera responsabile.

3. Tecnologie nucleari per la tutela dei beni culturali

Come evidenziato dall'articolo del Corriere Innovazione, gli acceleratori di particelle e altre tecnologie nucleari stanno rivoluzionando la conservazione e lo studio del patrimonio culturale, permettendo analisi dettagliate di reperti, opere d'arte e monumenti in maniera completamente non distruttiva. Molti laboratori e centri di ricerca hanno sviluppato e continuano a sviluppare metodologie di indagine avanzate che consentono di ottenere informazioni chimiche, fisiche e strutturali senza prelevare campioni né alterare gli oggetti studiati.

Tra le tecniche più diffuse risalta la **Particle Induced X-ray Emission (PIXE)**, che sfrutta fasci di protoni o ioni leggeri per stimolare l'emissione di raggi X caratteristici dagli elementi chimici presenti nei materiali. Grazie a questa metodologia, è possibile identificare la composizione chimica dei pigmenti e dei materiali utilizzati dagli artisti, distinguere diverse tipologie di minerali o leganti e rivelare tracce di elementi rari che possono indicare la provenienza geografica o la tecnica utilizzata. La PIXE è particolarmente utile per analizzare dipinti, manoscritti e reperti metallici, dove ogni dettaglio chimico può rivelare informazioni storiche preziose.

Quando un elettrone atomico viene espulso, si crea un "vuoto" nel corrispondente livello di energia. Un altro elettrone di un guscio più esterno "cade" per riempire questo vuoto. In questo passaggio rilascia energia sotto forma di **fotone X**.

Questi raggi X vengono detti **caratteristici** perché la loro energia dipende solo dall'elemento chimico a cui appartiene l'atomo. Per questo motivo, osservando i raggi X emessi, si può capire di quale elemento si tratta: è come una vera e propria "firma" dell'atomo.

Queste tecnologie consentono, inoltre, di osservare stratificazioni nascoste sotto la superficie di dipinti e sculture, permettendo di distinguere gli strati originali dai restauri successivi e di identificare alterazioni dovute al tempo, all'umidità o all'inquinamento ambientale. In questo modo, è possibile documentare la storia del manufatto ed intervenire con metodi di conservazione mirati, evitando danni accidentali dovuti ad analisi invasive o distruttive.

Un altro esempio di tecnica innovativa riguarda la **tomografia muonica**, basata sull'osservazione dei muoni, particelle prodotte naturalmente dai raggi cosmici. I muoni, penetrando nei materiali, permettono di visualizzare strutture interne di monumenti e reperti archeologici, anche in contesti inaccessibili o delicati, come piramidi, tombe o grandi sculture. La tomografia muonica consente di individuare cavità nascoste, stratificazioni o deterioramenti senza alcun contatto diretto con la struttura, fornendo dati essenziali per la conservazione preventiva e la pianificazione di interventi di restauro.

L'impiego di queste tecnologie non ha solo finalità conservativa, ma contribuisce anche ad approfondire la conoscenza storica e artistica. Analizzando i materiali e le tecniche costruttive, gli storici dell'arte e gli archeologi possono ricostruire i processi creativi degli artisti, comprendere le pratiche artigianali delle epoche passate e identificare scambi culturali tra diverse aree geografiche. Inoltre, l'uso di metodi non distruttivi permette di proteggere il patrimonio culturale per le generazioni future, combinando ricerca scientifica, tutela ambientale e valorizzazione culturale.

Traccia per l'attività in classe

1. Applicazioni ambientali e agricole delle radiazioni nucleari

- Come le tecniche nucleari permettono di tracciare il movimento degli inquinanti e dei nutrienti nel suolo e nelle acque?
- Spiega come funziona la Sterile Insect Technique (SIT) e perché riduce l'uso dei pesticidi chimici.
- *Discussione*: come queste tecniche contribuiscono a una agricoltura più sostenibile e rispettosa della biodiversità?

2. Economia circolare e gestione dei rifiuti

- Quale il principio base dell'analisi di attivazione neutronica (NAA)?
- Quale ruolo riveste l'analisi di attivazione neutronica nel recupero di materiali dai rifiuti elettronici?
- *Discussione*: quali effetti ambientali ed economici può avere il recupero di materiali tramite tecniche nucleari?

3. Applicazioni delle tecnologie nucleari per la tutela dei beni culturali

- Come la Particle Induced X-ray Emission (PIXE) permette di analizzare pigmenti e materiali senza danneggiare le opere?
- *Discussione*: perché l'uso di tecniche non distruttive è fondamentale per conservare e valorizzare il patrimonio culturale?
- *Discussione*: in che modo la cooperazione internazionale può accelerare l'innovazione e la protezione del patrimonio naturale e culturale?