

Le tecniche neutroniche applicate ai beni culturali

Negli ultimi anni il numero di tecniche neutroniche applicate al campo dei beni culturali è cresciuto enormemente e numerosi sono stati gli sforzi internazionali per sviluppare postazioni per misure dedicate nelle large-scale facility, diffuse in Europa e nel mondo, per produrre e utilizzare i neutroni. ENEA supporta ormai da anni la ricerca nell'ambito dello sviluppo di tecnologie per i beni culturali e sta valutando la possibilità di dotare il territorio della regione Lazio di un impianto adatto per l'applicazione di tecniche neutroniche nel campo dei beni culturali.

DOI 10.12910/EAI2022-038

di Valentina Nigro, *Laboratorio Micro e Nanostrutture per la Fotonica*, Roberta Fantoni, *Responsabile Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute*, Rosa Maria Montereali, *Responsabile Laboratorio Micro e Nanostrutture per la Fotonica*, Mario Pillon, *Laboratorio Tecnologie Nucleari - ENEA*

Il ruolo che la scienza e la tecnologia hanno assunto nella tutela del patrimonio culturale è cresciuto enormemente negli ultimi anni, grazie alla capacità di proporre metodi innovativi di datazione e autenticazione, indagini macro e microstrutturali e analisi quantitative della composizione dei materiali. Queste metodologie offrono, infatti, un enorme contributo conoscitivo nella gran parte degli studi sui beni culturali, fondamentale per la corretta determinazione del contesto storico e artistico degli artefatti, del metodo di produzione e della loro localizzazione temporale e spaziale, oltre che all'identificazione dei trattamenti più adeguati e delle condizioni ambientali ideali per la loro corretta conservazione. Nonostante il grande numero di tecniche impiegate nella caratterizzazione di beni di rilievo culturale, molti di questi metodi non possono essere considerati del tutto non-in-

vasivi e spesso non consentono studi sull'intero volume dell'artefatto senza ricorrere al campionamento o addirittura al danneggiamento dell'intera opera.

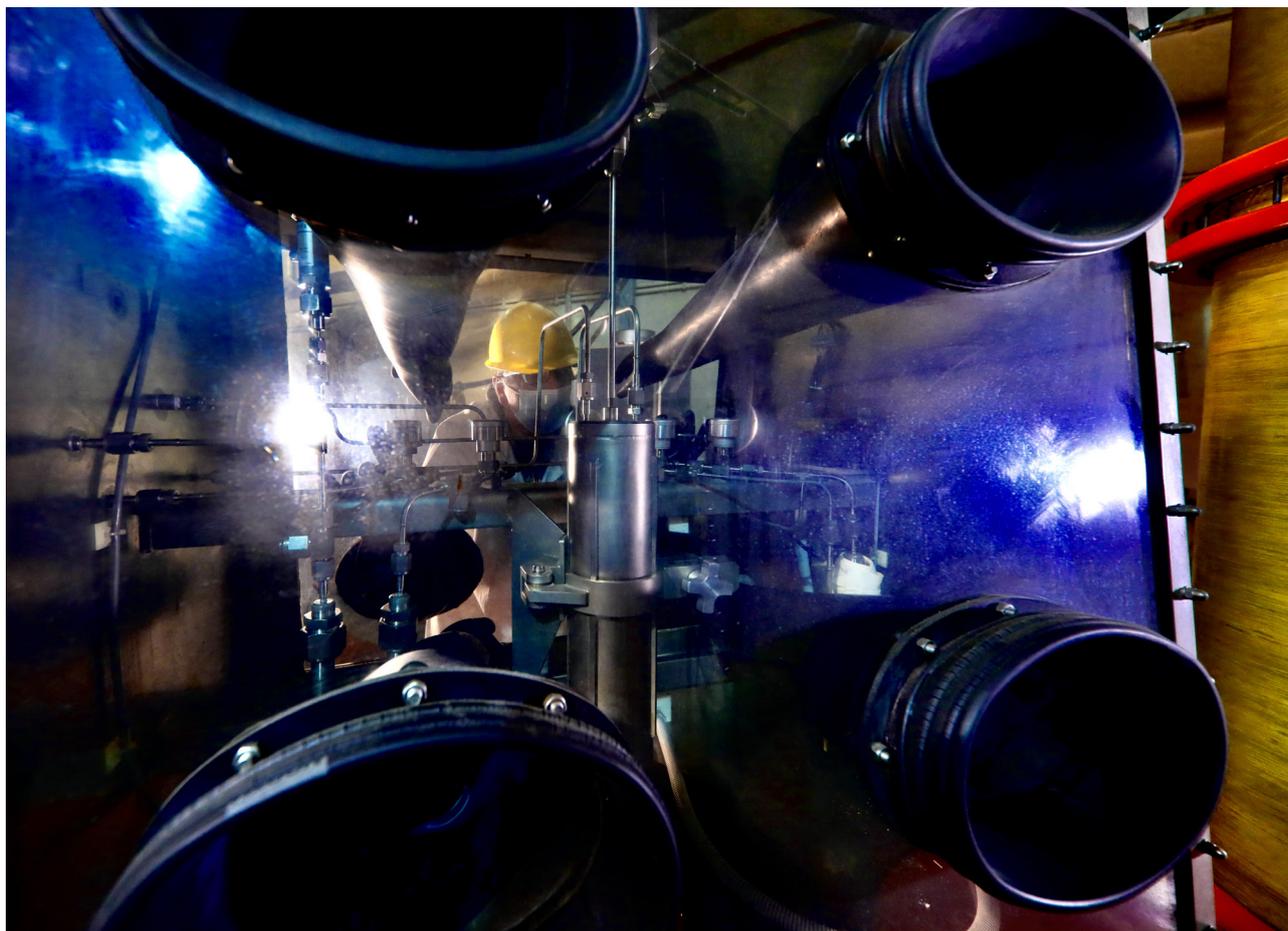
Uno strumento sempre più allettante per diagnostiche su beni culturali di natura diversa

Negli ultimi decenni le tecniche neutroniche, inizialmente impiegate nel settore della fisica di base, hanno acquisito un'importanza sempre più rilevante nel campo della scienza dei materiali. Il loro possibile utilizzo in indagini non distruttive le ha rese uno strumento sempre più allettante per diagnostiche su beni culturali di natura diversa [1]. I neutroni sono infatti in grado di penetrare strati profondi di materiale, a seconda della loro energia, senza subire una significativa attenuazione lungo il percorso. Questa caratteristica rende i neutroni ideali per studiare e visualizzare l'in-

tero artefatto, ottenendo così informazioni su reperti il cui interno è di difficile accesso, come il contenuto di vasi e anfore o la struttura interna di sculture e oggetti di diversa natura.

Negli ultimi anni il numero di tecniche neutroniche applicate al campo dei beni culturali è cresciuto enormemente e numerosi sono stati gli sforzi internazionali per sviluppare postazioni per misure dedicate nelle large-scale facility diffuse in Europa e nel mondo, costruite per la produzione e l'utilizzo dei neutroni.

ENEA supporta ormai da anni la ricerca nell'ambito dello sviluppo di tecnologie per i beni culturali e sta valutando anche l'opportunità di dotare il territorio della regione Lazio di un impianto adatto per l'applicazione di tecniche neutroniche nel campo dei beni culturali. In particolare queste finalità sono state uno degli obiettivi del **progetto ADAMO** (Tecnologie di Analisi, Diagnostica e Monitoraggio per la conservazione e il restauro di



beni culturali, <http://progettoadamo.enea.it/>), finanziato dalla Regione nell'ambito del Distretto Tecnologico Beni e Attività Culturali – Centro di Eccellenza DTC.

Tra le sorgenti di neutroni presenti sul territorio, il Frascati Neutron Generator (FNG) rappresenta uno degli impianti di maggiore interesse per lo sviluppo di diagnostiche basate sull'utilizzo di neutroni veloci [2]. FNG è, infatti, un generatore di neutroni a 14 MeV progettato e messo a punto nel Centro Ricerche di Frascati dell'ENEA per attività di ricerca nel campo della neutronica.

Il fascio di neutroni di energia 14 MeV e intensità fino a 10^{11} s^{-1} viene prodotto mediante la reazione di fusione

deuterio-trizio, realizzata attraverso un acceleratore lineare di deutoni ionizzati incidenti su un bersaglio di metallo contenente trizio. Gli sviluppi

successivi di FNG hanno consentito di estendere sensibilmente lo spettro dei neutroni anche alle basse energie, arrivando fino a 2.5 MeV con un'intensità

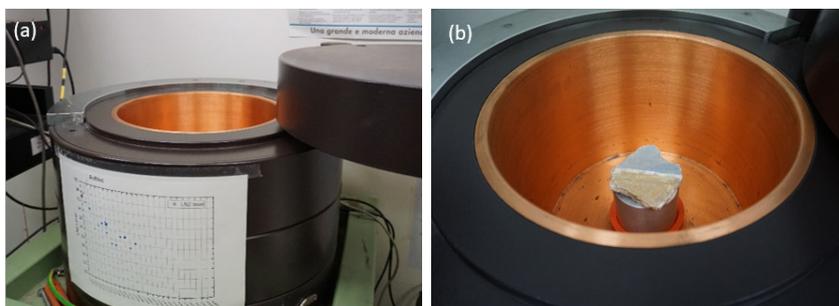


Fig. 1 (a) Pozzetto in piombo dove alloggia il rivelatore al germanio HPGe utilizzato per l'acquisizione degli spettri di decadimento gamma dopo l'irraggiamento con neutroni presso FNG. (b) Frammento di affresco romano proveniente dalla Villa della Piscina (RM) posizionato nel pozzetto in piombo dopo l'irraggiamento con neutroni di energia 14 MeV.

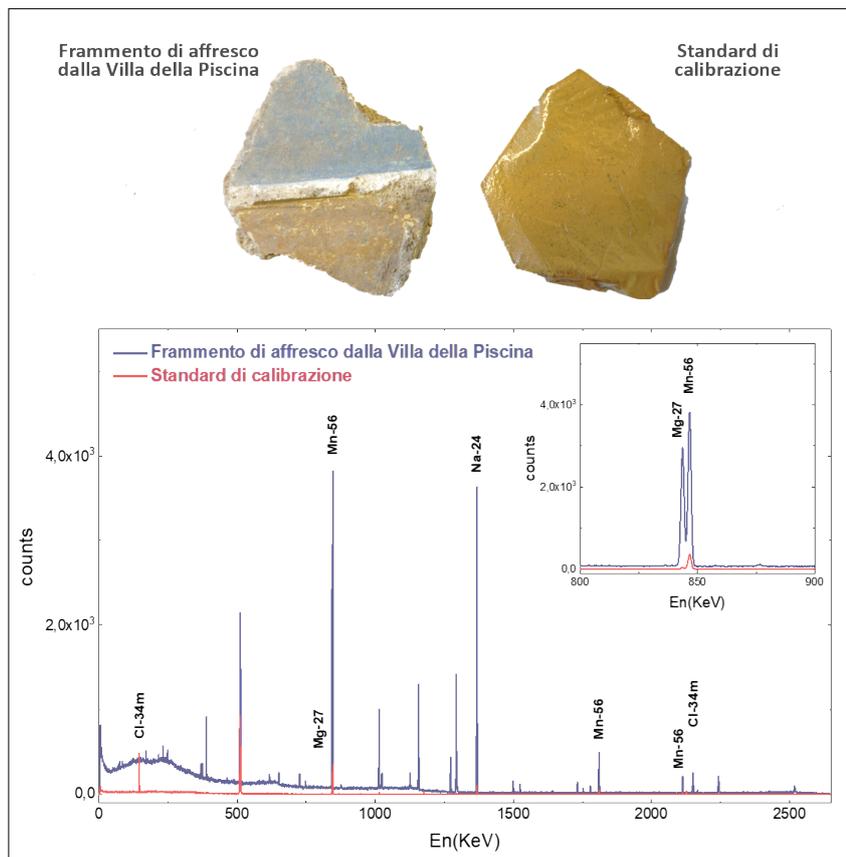


Fig. 2 Spettri gamma del frammento di affresco dalla Villa della Piscina (RM) e dello standard di calibrazione misurati dal rivelatore al germanio HPGe per un tempo di acquisizione pari a 700 s. Inset: Ingrandimento nella regione tra 800 e 900 keV sui picchi del ^{56}Mn e del ^{27}Mg che confermano, rispettivamente, la presenza di Fe, attribuibile all'ocra gialla, e Al.

di 10^9 s^{-1} utilizzando la reazione di fusione deuterio-deuterio.

Le caratteristiche di FNG mettono in evidenza le sue potenzialità per la caratterizzazione di materiali attraverso analisi per attivazione neutronica (NAA, Neutron Activation Analysis), una delle tecniche fondamentali per l'analisi qualitativa e quantitativa degli elementi in tracce [3]. Basata sull'interazione neutrone-nucleo per la produzione di isotopi radioattivi, tale tecnica permette di determinare le concentrazioni elementari in un campione misurando la radioattività indotta. I neutroni incidenti vengono infatti assorbiti da nuclidi bersaglio,

producendo isotopi radioattivi che decadono con emissione di particelle beta e/o raggi gamma (nuclidi figli). Nel passaggio allo stato fondamentale i nuclei figli emettono molto frequentemente raggi gamma, la cui identificazione e misura permette di determinare il tipo e la quantità di elementi nei campioni irraggiati.

Nel campo dei beni culturali l'analisi per attivazione neutronica rappresenta una delle tecniche di base per l'analisi di routine di elementi come Fe, Au, Mg, Al, Si, Cl, Ca, Co, Ni, Na, K. Lo studio degli elementi in tracce è infatti di fondamentale importanza per individuare la provenienza

dei materiali utilizzati per i pigmenti dei manufatti e ricostruire la rete di relazioni tra le popolazioni. Inoltre, l'analisi per attivazione neutronica è una delle poche tecniche in grado di superare uno dei limiti principali delle diagnostiche fino ad ora messe in campo: l'impossibilità di ottenere informazioni quantitative sugli elementi presenti in ciascun pigmento.

L'analisi per attivazione neutronica permette infatti analisi dei materiali in profondità, tipicamente contenuti in recipienti chiusi, è sensibile anche ad elementi leggeri, permettendo quindi l'identificazione anche di materiali organici, e fornisce dati quantitativi dal confronto con standard di riferimento di cui sia nota la composizione.

I test con Fast Neutron Activation Analysis

Nel 2019 la sorgente di neutroni FNG è stata protagonista dei primi test di fattibilità per l'utilizzo di neutroni veloci per lo studio di beni di interesse culturale. I test hanno permesso di evidenziarne punti di forza e eventuali criticità con l'obiettivo di definire i requisiti di una facility per lo sviluppo di diagnostiche basate su Fast Neutron Activation Analysis (FNAA) [4]. Le caratteristiche della sorgente, insieme a quelle del rivelatore dei raggi gamma di decadimento utilizzato negli esperimenti, hanno imposto la scelta di campioni con alcune proprietà fondamentali. L'utilizzo di neutroni veloci a 14 MeV e l'impossibilità di selezionare la zona di indagine può rendere infatti piuttosto complessa l'analisi degli spettri gamma, ma selezionare campioni di dimensioni ridotte e con un numero limitato di pigmenti caratteristici rende relativamente semplice il confronto con uno standard di riferimento.

Il primo test è stato effettuato su un campione di riferimento preparato presso ENEA e INFN Frascati stendendo uno dei pigmenti puri

caratteristici dei reperti da studiare, l'ocra rossa (pigmento a base di ferro derivato da ematite Fe_2O_3), su un supporto di intonachino ($\text{CaCO}_3(\text{OH})_2$). Dopo irraggiamento con neutroni a 14 MeV per 3600 s, il campione è stato posizionato all'interno di un pozzetto in piombo ad una distanza di 10 cm dal rivelatore al germanio iperpuro HPGe (Figura 1(a)) e gli spettri gamma sono stati raccolti con tempi di acquisizione consecutivi per monitorare la presenza di radionuclidi con tempi di dimezzamento diversi.

Grazie a queste prime misure è stato definito un protocollo di misura essenziale per lo sviluppo di diagnostiche applicate ai beni culturali: informazioni quantitative possono infatti essere ottenute solo irraggiando contemporaneamente un frammento di affresco e il relativo standard di riferimento in modo da garantire l'utilizzo di un fascio di neutroni nelle stesse condizioni di energia e flusso/tempo, così da permettere il confronto diretto tra le aree dei picchi degli spettri gamma raccolti dal rivelatore al germanio.

Un frammento di affresco romano proveniente da uno dei siti archeolo-

gici di maggior interesse nell'ambito del progetto ADAMO, la Villa della Piscina di Centocelle (RM), è stato quindi irraggiato simultaneamente con lo standard di calibrazione ottenuto da due dei pigmenti puri caratteristici del campione, l'ocra gialla ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e il blu egizio ($\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$ o $\text{CaOCuO}(\text{SiO}_2)_4$) [5] ed è stato posizionato all'interno del pozzetto in piombo ad una distanza di 10 cm dal rivelatore al germanio HPGe (Figura 1(b)).

Gli spettri gamma così raccolti, mostrati in Figura 2, hanno confermato con certezza la presenza di Fe, sia nel frammento di affresco che nello standard di riferimento, segnalata dalla formazione del ^{56}Mn , mettendo in evidenza la possibilità, non scontata, di rivelarne la traccia tramite FNAA. Inoltre attraverso FNAA è stata rivelata anche la presenza di altri elementi: la formazione di ^{27}Mg con un tempo di dimezzamento breve (circa 9 minuti) indica con grande probabilità la presenza di Al sia nel campione che nello standard di riferimento, confermata anche dalla formazione del ^{24}Na , mentre il ^{24}Cl che osserviamo nello spettro dello standard è con tutta probabilità dovuto

allo strato di PVC ($\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$) utilizzato come substrato per il pigmento. I test di fattibilità condotti hanno quindi messo in luce alcune potenzialità interessanti dell'acceleratore e hanno permesso di identificare, per la prima volta su FNG, un protocollo dedicato per misure di attivazione con neutroni veloci che preveda l'analisi preliminare sul campione, la preparazione di standard di riferimento e l'irraggiamento simultaneo del campione e del relativo standard. La presenza di elementi come Fe, Mg, Al, Na e Cl è stata confermata attraverso Fast Neutron Activation Analysis aprendo la strada ad ulteriori sviluppi che possano permettere una stima quantitativa e immediata di ciascun elemento attraverso il confronto tra il campione e il suo riferimento.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Sovrintendenza capitolina per la disponibilità del campione di affresco esaminato.

Per info: valentina.nigro@enea.it

BIBLIOGRAFIA

1. N. Kardjilov et al., Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage, Springer, Cham (2017)
2. S. Fiore et al., The Frascati Neutron Generator: Present activities and future upgrades, IEEE NSS/MIC/RTSD, 1-3 (2016).
3. M. D. Glascock et al., Neutron activation analysis and provenance research in archaeology, Meas. Sci. Technol. 14, 1516 (2003)
4. R.F. Coleman, The determination of trace elements by fast-neutron activation analysis, Analyst, 86, 39-44 (1961)
5. L. Pronti et al., Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali, 31, 2, 485-493 (2020)