

Analizzare senza distruggere

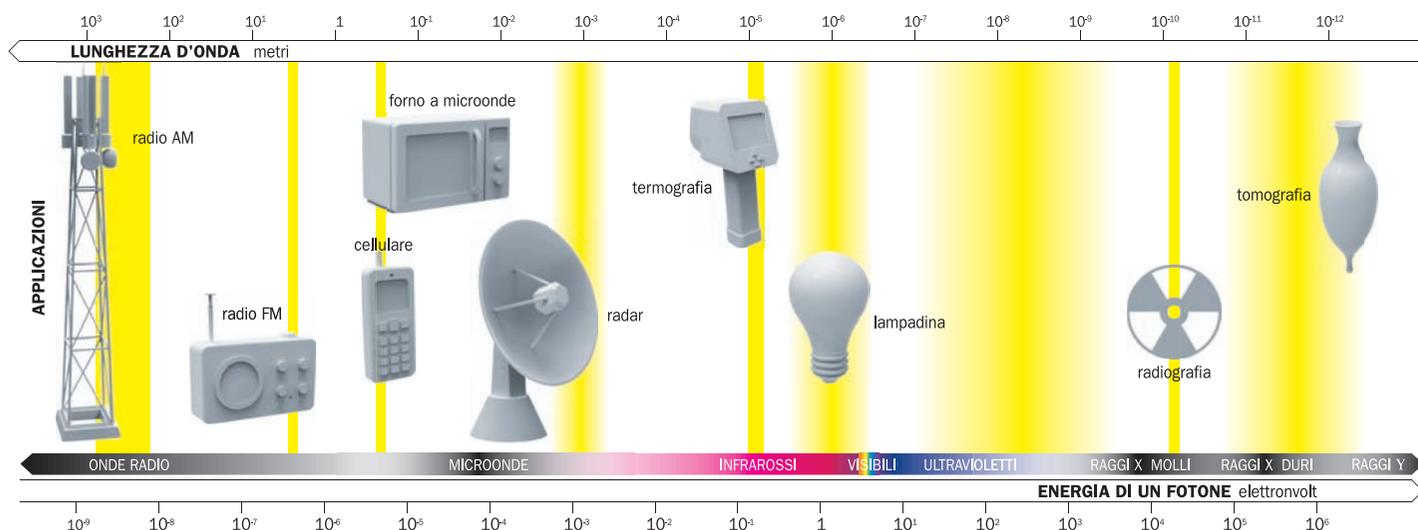
Fotoni al servizio dei beni culturali

di Francesca Rizzo

Che i fotoni siano indispensabili per la nostra vita quotidiana, è un dato di fatto: senza di loro non avremmo la radio (che utilizza fotoni di lunghezza d'onda molto ampia, vd. fig. a), né la televisione, né le antenne radar che permettono di localizzare, ad esempio, un aereo (fotoni della zona delle microonde). Senza parlare poi della luce che ci circonda (ovvero i fotoni nel visibile), grazie ai quali non ci troviamo al buio! Ma in pochi sanno che i fotoni di lunghezze d'onda molto piccole, quelli che corrispondono alla radiazione elettromagnetica dei raggi X o raggi gamma, sono utilissimi per analizzare reperti archeologici e artistici, oltre che in medicina (vd. approfondimento p. 38).

Reperti archeologici e artistici hanno un enorme valore per l'umanità e, quindi, quando si analizzano, bisogna preservarli integri. Ci sono varie tecniche di analisi "non distruttiva", sviluppate anche nell'ambito dell'Infn, in particolare presso i Laboratori del Sud (Lns) di Catania e presso il Laboratorio di Tecniche Nucleari per i Beni Culturali (Labec) di Firenze. Prima fra tutte, la tecnica Xrf (X Ray Fluorescence) è in grado di svelare gli elementi chimici presenti in un reperto. Questa è un'informazione che può essere di estremo interesse per gli studiosi di arte e archeologia e per i restauratori. Inoltre, la Xrf è una tecnica che può essere utilizzata *in situ*, il che è di

a.
Lo spettro elettromagnetico. A ciascuna lunghezza d'onda corrisponde un'applicazione nella vita quotidiana.

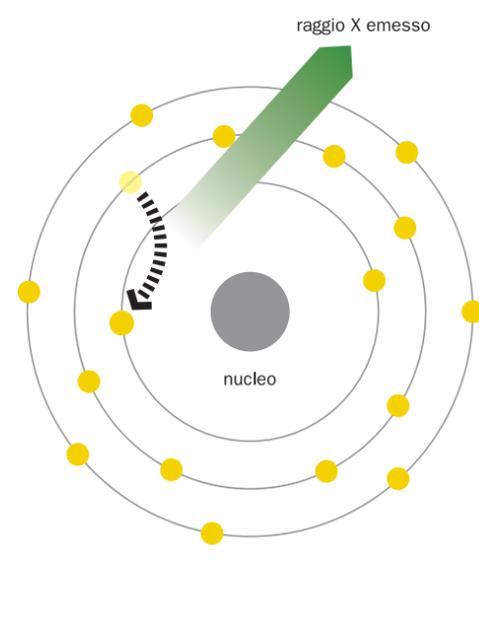
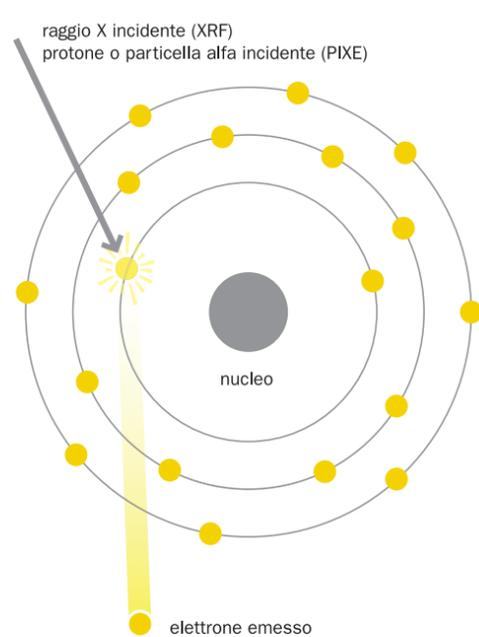


particolare importanza se i campioni da analizzare non sono trasferibili presso i laboratori, come accade, ad esempio, per gli affreschi e le opere d'arte di particolare pregio custodite nei musei. La tecnica Xrf consiste nell'utilizzare un fascio di raggi X, prodotto da un tubo radiogeno o da una sorgente radioattiva, che incide sul campione da analizzare. Quando l'energia dei raggi X incidenti su un atomo è maggiore dell'energia di legame degli elettroni atomici, può avvenire l'espulsione di uno degli elettroni interni che circondano il nucleo, producendo così un "buco" nell'orbitale e lasciando l'atomo in una condizione energetica instabile (vd. fig. b). Il suo ritorno all'equilibrio avviene, quando un elettrone di un orbitale esterno va a riempire il buco prodotto, un processo che è accompagnato, tra l'altro, dall'emissione di uno o di più *raggi X di fluorescenza*, la cui energia è tipica dell'elemento chimico in esame. La rivelazione dei raggi X grazie ad appositi sensori produrrà uno spettro, in cui la posizione energetica dei picchi può essere considerata come una "impronta digitale" degli elementi chimici presenti nel campione. Un analogo meccanismo lo si ha anche se a incidere è una particella carica, come

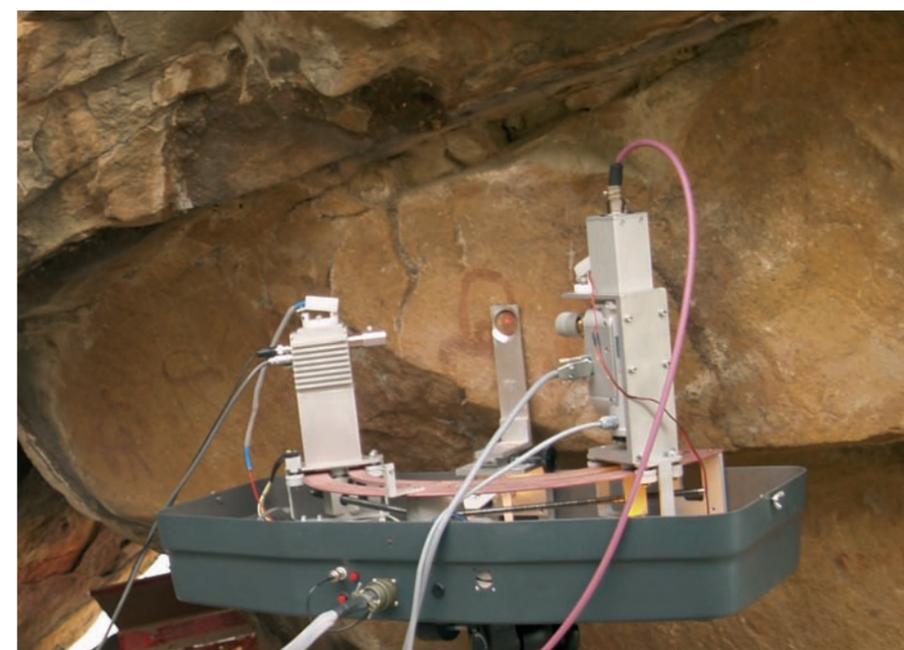
un protone o una particella alfa (come avviene nella tecnica Particle Induced X ray Emission, abbreviata Pixe). Gli elementi chimici rivelabili con queste tecniche di emissione di raggi X di fluorescenza vanno da elementi leggeri, nel caso della Pixe, ai più pesanti, nel caso della Xrf, e in concentrazioni che variano dal 100% a qualche parte per milione. In alcuni casi è necessario effettuare misure su differenti zone di piccole dimensioni del campione in esame (ovvero una *mappatura*) oppure su un campione di dimensioni molto piccole. Gli spettrometri da utilizzare in questo caso sono il Micro-Xrf e/o il Micro-Pixe. Quest'ultima tecnica viene utilizzata prevalentemente presso il Labec. Tali strumenti permettono di inviare un fascio di dimensioni estremamente piccole, fino a pochi micron di diametro. Con il Micro-Xrf sono stati analizzati, ad esempio, gli inchiostri neri e rossi della *Chartula* di Assisi, unico documento autografo attribuito a San Francesco, custodita nella Sala delle Reliquie del Sacro Convento di Assisi. Il risultato dell'analisi ha messo in evidenza che i principali componenti degli inchiostri sono di tipo inorganico (ferro e mercurio, rispettivamente, per l'inchiostro

nero e rosso) e non organico (più deperibile) e questa informazione, oltre a permettere una più mirata azione di restauro, ci rassicura sulla possibilità di osservare le scritture ancora per molti secoli a venire. È a Catania al Landis (Laboratorio di Analisi Non Distruttiva In Situ) dei Lns dell'Infn che sono stati costruiti e/o messi a punto strumenti portatili, sia per la Xrf (il Bsc-Xrf ovvero un Xrf con controllo della stabilità del fascio di raggi X) che, sin dal 1996, per la Pixe (il cosiddetto Pixe- α), dove l'emissione di fluorescenza viene indotta da particelle α emesse da una sorgente radioattiva di polonio. A volte questi spettrometri vengono usati anche insieme, come è accaduto nel 2003 durante la campagna di misure effettuata su 12 sculture appartenenti alla ricca collezione conservata nel Museo del Bargello a Firenze. In particolare è stata effettuata l'analisi dei pigmenti blu delle ceramiche come, ad esempio, nella "Madonna che adora il Bambino" di Luca Della Robbia (1470) (vd fig. c). In questa e in numerose altre opere dello stesso periodo, l'analisi ha evidenziato l'assenza di arsenico come elemento *in traccia* (ovvero con una presenza percentuale dell'elemento

minore del 1%); l'arsenico è invece presente nei pigmenti blu usati dopo il 1520. Questa informazione può quindi essere usata per datare opere, di cui è ignoto il periodo di esecuzione. Nel 2007 le due tecniche Pixe- α e Xrf sono state raggruppate in un unico strumento di nome Xpixe, sempre ideato e realizzato dai ricercatori del Landis. Lo strumento Xpixe permette una misura simultanea di elementi leggeri e pesanti su campioni estesi e omogenei, come vetri, ossidiane ecc. Infine, va citata un'ultima tecnica, che utilizza i fotoni per analizzare reperti archeologici e artistici, la Xrd (X Ray Diffraction). Tale tecnica si basa sulla diffrazione di raggi X da parte degli atomi disposti regolarmente lungo i piani reticolari della sostanza cristallina in esame (affresco, smalto ecc.). L'osservazione dell'interferenza costruttiva dei raggi X diffusi a un certo angolo di osservazione (laddove è posto il rivelatore) permette di determinare la composizione mineralogica del campione. Se, ad esempio, la Pixe- α è in grado di dire quali elementi chimici compongono un affresco (alluminio, silicio, calcio, ferro, zolfo, mercurio), la Xrd stabilisce in che composizione mineralogica sono combinati (ematite, argilla, cinabro, calcite ecc.). Un'applicazione della strumentazione Xrd, anch'essa portatile (pesa ca. 30 kg), può essere vista in fig. d durante l'analisi dei pigmenti utilizzati per le pitture rupestri di epoca preistorica presso il Rifugio Cassatario (Centuripe, provincia di Enna). Le misure hanno consentito di determinare l'utilizzo di ocra per la realizzazione del pigmento. Attualmente sono in corso analisi sui materiali presenti nei suoli residuali limitrofi al Rifugio, per sapere se l'ocra ha un'origine locale e stabilire quindi, di contro, se fin dalla preistoria esistevano importanti flussi di migrazione. Grazie a conoscenze sempre più approfondite delle proprietà dei fotoni è dunque possibile conoscere meglio il nostro patrimonio artistico e culturale e preservarlo così per lungo tempo.



b. Schematizzazione del processo di emissione di raggi X indotta da particelle cariche incidenti (protoni o particelle α), nel caso della tecnica Pixe, o da raggi X incidenti, nel caso della tecnica Xrf. A sinistra è visibile come uno degli elettroni interni che circondano il nucleo viene emesso e produce un "buco" nell'orbitale. A destra, un elettrone di un orbitale esterno va a riempire il buco prodotto e viene emesso uno o più raggi X di fluorescenza (freccia verde), la cui energia è tipica dell'elemento chimico in esame.

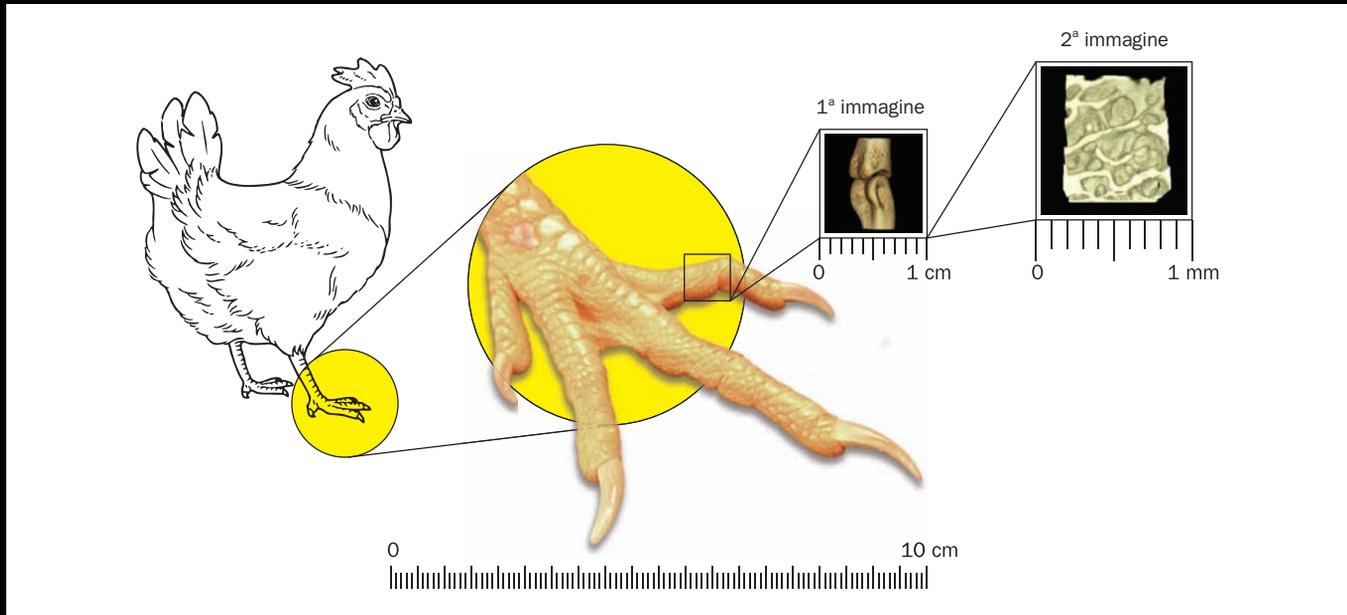


c. Analisi dei pigmenti blu presenti nella ceramica della "Madonna che adora il Bambino" (Luca Della Robbia, 1470, Museo del Bargello, Firenze) tramite gli spettrometri Pixe- α e Xrf.

d. Il Rifugio Cassatario a Centuripe, in provincia di Enna, dove pitture rupestri di epoca preistorica (che si intravedono dietro allo strumento) sono state analizzate *in situ* mediante la strumentazione Xrd. L'analisi ha evidenziato l'utilizzo di ocra per la realizzazione del pigmento.

Raggi X per la salute

1. Nella 1^a immagine è mostrato il risultato di una Tac eseguita su un'articolazione di un dettaglio di una zampa di pollo. L'immagine tomografica permette di visualizzare anche volumi posti all'interno dell'osso, come ad es. il particolare mostrato nella 2^a immagine, composto da una rete di trabecole ossee il cui spessore medio è compreso tra 50 e 100 micrometri.



Se giocando a calcio malauguratamente ci si fa male a un piede, il medico in genere prescrive una *radiografia*. Alla base di questa e di molte altre tecniche diagnostiche ci sono i fotoni della lunghezza d'onda dei raggi X. L'apparato che viene utilizzato nelle radiografie, infatti, si basa su una sorgente di raggi X, un cosiddetto *tubo radiogeno*, contrapposto a un rivelatore di radiazione. Il paziente viene posizionato tra questi due strumenti. L'immagine radiografica si forma a causa delle diverse attenuazioni che i raggi X subiscono nell'attraversare il corpo del paziente in esame e permette di ottenere dettagliate informazioni *morfologiche*, ovvero sulla forma e la struttura interna. Le diverse capacità di assorbimento delle strutture interne dipendono dall'energia dei raggi X incidenti e dalla composizione chimica delle strutture stesse: in generale, per esempio, un osso attenua maggiormente rispetto a un tessuto muscolare. Conoscendo le proprietà di attenuazione dei tessuti di cui siamo interessati ad avere informazioni, si può ottimizzare l'energia dei raggi X: per esempio, negli esami radiografici si usano energie più basse per avere un'immagine dei tessuti molli (muscolo, ghiandole, tessuto adiposo) e più alte per i tessuti ossei. La ricerca dell'energia ottimale per una data analisi ha portato all'utilizzo di sorgenti di luce di sincrotrone, in grado di fornire raggi X di una sola energia: questi fasci monocromatici permettono di ottenere immagini più nitide e di limitare le dosi di radiazione somministrata durante l'analisi. Attualmente i ricercatori stanno lavorando allo sviluppo e l'ottimizzazione di nuove sorgenti monocromatiche compatte in progetti dell'Infn come Sparc e Beats (vd. p. 28, ndr). Anche nel caso del rivelatore di raggi X si sono avuti notevoli progressi: si è passati dalla lastra fotografica, che viene utilizzata ancora oggi, a rivelatori in grado di fornire immagini digitali. La possibilità di avere l'immagine in forma digitale permette l'utilizzo di algoritmi per la rivelazione automatica di dettagli di interesse clinico: questi sistemi chiamati Cad (Computer Aided Detection)

affiancano i radiologi, ad esempio, nella lettura delle *mammografie* (la radiografia del seno delle donne) per la ricerca di lesioni e microcalcificazioni. Il limite della radiografia sta nel fatto che l'immagine che si ottiene è una proiezione bidimensionale della reale struttura tridimensionale e che quindi l'attenuazione è la somma delle attenuazioni di tutti i tessuti attraversati, con la possibilità di avere delle informazioni incomplete, dovute a mascheramenti prodotti da tessuti più assorbenti. Per visualizzare la reale struttura tridimensionale bisogna ricorrere a un'altra tecnica diagnostica, la *Tomografia Assiale Computerizzata* (Tac). In questa tecnica il tubo radiogeno e il rivelatore ruotano attorno al corpo del paziente, acquisendo successive proiezioni bidimensionali, che verranno poi elaborate da un computer attraverso opportuni algoritmi di ricostruzione. Le immagini tridimensionali così ottenute permettono un'analisi più dettagliata delle strutture sotto esame (vd. fig. 1). Anche in questo caso sono stati sviluppati dei Cad, come quelli che vengono applicati in vari esperimenti dell'Infn per la ricerca precoce di lesioni tumorali negli studi di screening di un tumore polmonare o cerebrale.

Biografia

Valeria Rosso è professore all'Università degli Studi di Pisa e si occupa di fisica applicata alla medicina. Ha lavorato allo sviluppo di sistemi di rivelazione per l'imaging mammografico digitale e attualmente partecipa alla realizzazione di un sistema di rivelazione per il monitoraggio del trattamento in adroterapia.

Link sul web

http://www.elettra.trieste.it/visitors/it-vtour_p05.html

Biografia

Francesca Rizzo è professore di Fisica Nucleare e Subnucleare presso l'Università di Catania e responsabile del Landis (Laboratorio di Analisi Non Distruttiva In Situ) dei Laboratori del Sud dell'Infn. Incaricata di ricerca per l'Infn, svolge la sua attività nel campo della fisica nucleare applicata ai beni culturali e nell'ambito della fisica nucleare fondamentale (esperimento Exochim).

Link sul web

<http://www.ins.infn.it>
<http://labec.fi.infn.it/>