

## ACCELERATORI DI PARTICELLE: QUALE RUOLO OGGI PER I BENI CULTURALI ?

PIER ANDREA MANDÒ<sup>1,2</sup>, MARIAELENA FEDI<sup>2</sup>, NOVELLA GRASSI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze, Firenze, Italia

<sup>2</sup> Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze, Firenze, Italia

La domanda di supporto scientifico per la conoscenza e conservazione dei Beni Culturali è in forte crescita; in questo ambito le tecniche "nucleari" giocano ancora oggi un ruolo centrale, in particolare nelle analisi dei materiali e nelle datazioni. Facciamo il punto sugli sviluppi recenti delle tecniche che usano piccoli acceleratori.

### 1 Introduzione

Rispetto a qualche anno fa, le tecniche diagnostiche per lo studio dei Beni Culturali sono molto cresciute in numero e importanza. Quelle basate sull'uso dei piccoli acceleratori di particelle sono ormai, si potrebbe dire, classiche, ma per il tipo di risposte che riescono a dare continuano a rivestire un ruolo di primo piano. Non solo; c'è anche spazio per migliorare ancora le metodiche già disponibili e aprire la strada a nuove prospettive applicative.

In realtà, al di là della discussione sugli ulteriori sviluppi, la conoscenza degli stessi principi di base di queste tecniche non è per niente scontata presso una parte del pubblico non specializzato – e forse anche per una parte dei colleghi fisici. Può quindi essere utile prima di tutto ricordare brevemente in cosa consistano queste tecniche, e in quali applicazioni giochino un ruolo importante.

Nel fare questo, è giusto anche guardarsi intorno e porsi con onestà intellettuale il problema se altre tecniche fisiche o fisico-chimiche siano preferibili per alcuni aspetti in determinate situazioni. Come abbiamo detto poco sopra, nel campo della diagnostica dei Beni Culturali l'offerta è senz'altro cresciuta negli ultimi anni, anche perché da parte del mondo stesso dei Beni Culturali la domanda di supporto alla scienza in generale si è fatta sempre più estesa, esigente e puntuale, stimolando con ciò l'affinarsi e l'adattarsi di tecnologie magari inizialmente sviluppatesi per applicazioni in altri settori. Ma anche le stesse tecniche nucleari hanno beneficiato di questo stimolo, crescendo in potenzialità. E se può essere vero che alcune loro peculiarità sono oggi meno "uniche", ci sembra che ad esempio, rispetto ad altre emergenti, le tecniche di Ion Beam Analysis con le loro più recenti varianti siano tuttora all'avanguardia per lo studio dei materiali usati per produrre opere d'arte. Per non parlare delle eccezionali prestazioni della Spettrometria di Massa con Acceleratore per le datazioni col radiocarbonio. Nel seguito quindi, dopo aver richiamato i principi essenziali di queste tecniche basate sull'uso di acceleratori, ne illustreremo tramite qualche esempio le potenzialità odierne nello specifico campo di applicazioni allo studio dei Beni Culturali.

## 2 Acceleratori di particelle per i Beni Culturali

Parlando di tecniche con acceleratori, ci riferiremo a macchine "gestibili" anche in strutture relativamente piccole (in Italia ad esempio LABEC a Firenze, CEDAD a Lecce, CIRCE a Caserta<sup>1</sup>). Non discuteremo quindi delle prospettive per applicazioni in questo settore nei grandi laboratori (acceleratori per luce di sincrotrone, o strutture che producono fasci di neutroni): prospettive senz'altro molto interessanti ma ancora un po' fuori portata, almeno in Italia. Da quanto si vede oggi, è comunque possibile che per queste applicazioni ci siano in futuro sviluppi che le portino a un uso più diffuso.

Quando si parla di "piccoli" acceleratori come quelli dei tre laboratori citati (acceleratori elettrostatici da qualche MV di tensione massima di terminale), i campi di intervento in cui entrano in gioco nel settore dei Beni Culturali sono – come già si diceva – le analisi di composizione tramite l'uso di fasci di ioni (Ion Beam Analysis, IBA) e le datazioni col metodo del radiocarbonio con l'uso della spettrometria di massa con acceleratore (Accelerator Mass Spectrometry, AMS).

Sulle datazioni <sup>14</sup>C con AMS, francamente non si intravedono proprio, al momento, alternative competitive. La AMS è insostituibile per datazioni precise, affidabili e "quasi non distruttive" di reperti archeologici e storici, e non solo. Ci torneremo dopo comunque, per fare il punto e vedere cosa si muove.

Partiamo invece dalle tecniche con fasci di ioni per l'analisi di composizione elementare dei materiali.

### 2.1 Ion Beam Analysis

In una misura di Ion Beam Analysis, come è noto, il materiale da analizzare è bombardato con fasci di particelle – tipicamente protoni o alfa di qualche MeV di energia prodotti da un acceleratore. Per capirne la composizione, si analizza la radiazione emessa dal materiale sotto fascio, radiazione che ha energie caratteristiche degli atomi (raggi X) o dei nuclei (raggi gamma e particelle) coinvolti nell'interazione con le particelle incidenti. Le tecniche IBA più importanti sono la PIXE (Particle-Induced X-ray Emission), la PIGE (Particle-Induced Gamma-ray Emission), e nel caso della rivelazione di particelle, la BS (Backscattering Spectrometry) e la NRA (Nuclear Reaction Analysis). La PIXE, in particolare, copre con buona efficienza tutti gli elementi della tavola periodica a partire dal Na, anche usando un fascio estratto in atmosfera (e quindi senza collocare il bersaglio in vuoto, requisito fondamentale per garantire l'assenza di danno

nelle analisi sui Beni Culturali). Se nel set-up sono presenti anche rivelatori per altri tipi di radiazioni, il range si estende ancora e praticamente si arriva a coprire l'intera tavola periodica; inoltre, anche per gli elementi già rivelabili dalla sola PIXE, con l'implementazione di altre tecniche IBA si superano alcune limitazioni (vedi oltre). Le analisi sono quantitative, molto sensibili (con Minimum Detection Limits fino alle parti per milione), non invasive e non danneggianti (anche su questo punto torneremo in seguito). C'è la possibilità di effettuare mappature composizionali anche con elevata risoluzione spaziale e di raccogliere informazioni sulla eventuale struttura stratigrafica, sempre in maniera completamente non distruttiva.

Oggi la Ion Beam Analysis in alcune situazioni è in concorrenza con altre tecniche che richiedono attrezzature molto meno ingombranti di un acceleratore, e magari sono trasportabili. È soprattutto quest'ultimo aspetto che rende queste nuove tecniche, o affinamenti di già esistenti, molto competitive, almeno come primo passo in un protocollo esteso di analisi. Prendiamo ad esempio la LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectrometry), talvolta anche chiamata LIPS (Laser-Induced Plasma Spectrometry) [1, 2], basata sulla induzione di un plasma bombardando il materiale con un impulso laser e sull'analisi spettroscopica delle emissioni pronte nel visibile e vicino UV che hanno luogo nella fase di ricombinazione del plasma. La LIBS si basa su strumentazione relativamente semplice ed economica, quindi è trasportabile e consente un'analisi *in situ*. Inoltre può fornire facilmente informazioni sul profilo in profondità degli elementi rivelati, purché sia tollerabile "scavare" un microforo nel materiale. Per questi motivi è sicuramente una tecnica molto interessante, ma rispetto alle IBA – almeno allo stato dell'arte – restano alcune limitazioni che non sempre sono irrilevanti per le esigenze degli storici dell'arte, degli storici o degli archeologi: prima di tutto, si tratta di una tecnica comunque invasiva e distruttiva (anche se a livello submillimetrico), quindi accettabile solo su alcuni tipi di opere. Per lo stesso motivo (microdistruttività), non è pensabile evidentemente poter effettuare mappature x-y, che porterebbero ad un allargamento del danno su un'area maggiore di quanto già avviene nella misura sul singolo punto. Inoltre, l'analisi quantitativa è molto meno affidabile (sempre in confronto alle IBA), con problemi in parecchi casi reali. Le cause principali sono la riproducibilità fra impulso e impulso non perfettamente controllabile e la dipendenza della risposta dalla composizione della matrice – il che richiede necessariamente misure relative, tramite l'analisi di standard di composizione analoga, non sempre facilmente disponibili. Infine, la sensibilità è notevolmente inferiore rispetto ad altre tecniche tra cui proprio le IBA, rendendo la LIBS inadatta ad esempio per studi di provenienza basati sulla rivelazione di elementi in traccia.

<sup>1</sup> LABEC, Laboratorio di tecniche nucleari per i Beni Culturali dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze; CEDAD, Centro Datazione e Diagnostica dell'Università del Salento; CIRCE, Centro di Ricerche Isotopiche per i Beni Culturali e Ambientali, Seconda Università di Napoli.

Anche le nuove generazioni di spettrometri per XRF (X-Ray Fluorescence) stanno facendo una notevole concorrenza alle IBA. Nella XRF – una fra le prime tecniche fisiche ad essere state utilizzate per la diagnostica dei Beni Culturali (vedi ad esempio [3]) – si inducono emissioni X caratteristiche degli elementi irraggiando il materiale con fasci di radiazione elettromagnetica primaria. I sistemi XRF, che come è noto si possono rendere facilmente portatili o almeno trasportabili, presentano di norma diverse limitazioni; ma negli ultimi anni si sono introdotte migliorie importanti che hanno significativamente ridotto queste limitazioni. Ad esempio, in alcuni set-up il range di elementi rivelabili è stato esteso verso Z più bassi rispetto alla XRF tradizionale, diminuendo con questo il divario rispetto alle prestazioni della PIXE; al limite, con certi sistemi XRF [4] si può adesso arrivare anche a rivelare il Na se è presente in concentrazioni dell'ordine di qualche per mille. Inoltre, c'è oggi la possibilità di utilizzare fasci X primari foceggiati grazie alle lenti policapillari (vedi ad esempio [5, 6]), che, oltre a misure puntuali su minuti dettagli, consentono perfino di ottenere mappature x-y [7]. Infine l'analisi XRF quantitativa ha raggiunto ormai buoni livelli di affidabilità (purché su campioni omogenei fino a profondità dell'ordine delle centinaia di micrometri). Nel complesso quindi, queste nuove generazioni di XRF, relativamente economiche, e col vantaggio di poter effettuare analisi *in situ*, si presentano come un'alternativa molto valida alle misure PIXE con acceleratore. Tuttavia, restano dei punti di debolezza, che sono principalmente la sensibilità per bassi Z, comunque assai inferiore; un'informazione "multielementale" su un range meno esteso di Z rispetto alla PIXE (almeno facendo un'unica misura); la difficoltà di ottenere informazioni sul profilo degli elementi in funzione della profondità, a causa della elevata penetrazione della radiazione primaria<sup>2</sup>; sempre per questo motivo, una notevole interferenza dal substrato e di conseguenza una maggior problematicità nell'analisi quantitativa, nei casi in cui interessa l'analisi di strati sottili superficiali su un supporto di fondo, come nel caso dei dipinti.

Torniamo adesso alle tecniche di Ion Beam Analysis; con riferimento al loro impiego in analisi su beni artistici o comunque di elevato valore culturale, va innanzitutto ribadito che, sapendole usare, i risultati si ottengono in maniera assolutamente non invasiva e senza alcun danno ai materiali analizzati. Ciò, grazie alla possibilità di utilizzare correnti di fascio debolissime (a sua volta garantita dalle elevate sezioni

d'urto dei processi fisici sfruttati) in maniera perfettamente controllata. Non hanno fondamento ad esempio i timori che qualcuno ancora avanza su presunti rischi di danno alle opere in relazione alle analisi di pigmenti di dipinti; se in qualche laboratorio sono stati prodotti piccoli danni visibili su dipinti è soltanto perché si è lavorato con densità di carica integrata del fascio sul bersaglio inutilmente elevata. Con bersagli dello spessore degli strati pittorici, e utilizzando sistemi di rivelazione in geometrie che ne ottimizzano l'efficienza, in due o tre minuti e con fasci intorno al mezzo millimetro di diametro a correnti dell'ordine della decina di pA, si ottengono statistiche di conteggio più che soddisfacenti *senza danno di sorta*<sup>3</sup>. Non è quindi questione di minimizzare la portata del problema del danno come talvolta si sente fare ("si tratta comunque di aree molto piccole"; oppure "rispetto a un prelievo l'invasività è comunque minore"); se si lavora correttamente, il problema *proprio non esiste!*

Detto questo, che è un prerequisito fondamentale, vanno poi ricordati alcuni sviluppi recenti nell'uso delle IBA, che sono stati molto significativi per le applicazioni ai Beni Culturali. Senz'altro importante ad esempio è stata l'idea della PIXE differenziale [9–11], che consente di ottenere in maniera non distruttiva informazioni sulla distribuzione degli elementi in profondità, ripetendo la misura su un punto a energie di fascio diverse. Nel caso ad esempio dei dipinti su tavola, si ha una sequenza di strati che hanno spessori tipici delle decine di micrometri (dalla superficie verso l'interno: vernice protettiva, strati pittorici, imprimitura, preparazione). I range di protoni da qualche centinaio di keV a qualche MeV di energia nei materiali caratteristici sono proprio tali che, analizzando successivamente lo stesso punto a queste energie, si può sondare solo lo strato superficiale protettivo, oppure via via interessare anche gli strati pittorici, e poi l'imprimitura e la preparazione. Di conseguenza, il confronto fra gli spettri X ottenuti alle diverse energie di fascio dà informazioni molto utili per discriminare fra la composizione dei differenti strati. Naturalmente, occorre tenere conto di molti fattori, come il variare della sezione d'urto di produzione X via via che l'energia del fascio diminuisce nel penetrare all'interno degli strati, l'autoassorbimento degli X in uscita verso il rivelatore, e non ultimo la variabilità fra

<sup>2</sup> Gioca anche il fatto che, per via dei diversi meccanismi di interazione nel bersaglio, per un fascio di radiazioni elettromagnetiche non esiste neppure un "range" di penetrazione ben definito come nel caso di un fascio di particelle

<sup>3</sup> In altri materiali quali le ceramiche smaltate o i vetri possono invece prodursi, anche con bassissime densità di carica, temporanee alterazioni cromatiche, dovute alla creazione di centri di colore nel materiale isolante a causa dell'impiantazione delle particelle del fascio. Ma queste alterazioni scompaiono spontaneamente in breve tempo, tanto più se è possibile – come è in quei materiali – accelerare il processo di annealing del "danno" con un riscaldamento locale. In pochi minuti l'alterazione cromatica scompare del tutto [8].



punto e punto degli spessori, che nel caso delle pitture non sono quindi in sé un qualcosa di rigorosamente definibile. Perciò va usato – come sempre – buon senso, e prima di attribuire significati “assoluti” alle misure occorre effettuarne su parecchi punti di una data campitura per controllarne la variabilità. La PIXE differenziale è stata utilizzata su dipinti di grandi maestri come Leonardo, Antonello, Vasari [12–14] (si vedano le fig. 1, 2, 3). È stato possibile non solo individuare la “tavolozza” usata dagli artisti, ma dare risposte a domande più difficili e dettagliate che venivano poste dagli storici e dai restauratori: capire se la tecnica pittorica usata era quella di mescolare i pigmenti o se si erano cercati effetti di trasparenza sovrapponendo sottili strati pittorici separati; determinarne in questo caso l’ordine e gli spessori (che ad esempio sono risultati sottilissimi, poco più di  $10\ \mu\text{m}$ , in alcune campiture del dipinto di Leonardo analizzato all’acceleratore di Firenze [12]); verificare la presenza di depositi o alterazioni superficiali da rimuovere in fase di restauro [14].

Un altro importante passo avanti nella significatività delle misure IBA nel settore dei Beni Culturali è stata la messa a punto di sistemi di *microfascio esterno* a scansione, con acquisizione dati in list-mode delle terne  $E, x, y$  ( $E$  energia rivelata, quindi elemento presente;  $x, y$  coordinate del punto da dove è emessa la radiazione rivelata di energia  $E$ ), per costruire mappe di composizione elementare con elevata risoluzione spaziale. In questo caso, le informazioni composizionali di un dettaglio di un’opera, risolte su dimensioni quasi microscopiche, sono rese possibili [16] dall’abbinamento di un set-up in fascio esterno con la sua riduzione a dimensioni effettive fino a meno di  $10\ \mu\text{m}$  di diametro sul bersaglio (grazie a foceggiamenti forti con multiplotti di quadrupoli ed estrazione in atmosfera tramite finestre ultrasottili di  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , anche di soli  $100\ \text{nm}$  di spessore). Anche in questo caso, la maggiore potenzialità analitica che deriva da questi sviluppi può servire a rispondere a precise domande degli storici dell’arte e dei restauratori. Come esempio, si possono citare le misure fatte col microfascio a scansione sul Ritratto Trivulzio di Antonello da Messina [13] (fig. 2) che



2

Fig. 1 Un dipinto su tavola di Leonardo (Madonna dei Fusi, versione ex-Reford, collezione privata) durante le analisi IBA presso l'acceleratore di Firenze. In questo caso si sono usate sia la tecnica della PIXE differenziale [12] che l'analisi combinata PIXE-PIGE [15], rispettivamente per ottenere in maniera completamente non distruttiva informazioni sulla sequenza stratigrafica della pittura e per identificare materiali a basso Z negli strati pittorici al di sotto della vernice protettiva.

Fig 2 Un dipinto su tavola di Antonello da Messina (cosiddetto Ritratto Trivulzio, Torino Museo Civico di Palazzo Madama) durante le analisi al microfascio esterno a scansione del laboratorio LABEC di Firenze. Su questo dipinto si sono effettuate [13] misure di PIXE differenziale e mappature di composizione elementale, che hanno risolto alcuni dubbi sulle tecniche adottate dall'artista e contribuito alle decisioni operative nell'intervento conservativo.

Fig. 3 Analisi IBA di una tavoletta del Vasari, dal complesso della Pala Albergotti, attualmente conservato nella chiesa delle Sante Flora e Lucilla di Arezzo. Anche in questo caso i risultati delle analisi [14] condotte al LABEC di Firenze preliminarmente ai restauri hanno contribuito alle scelte tecniche dell'intervento conservativo.

3



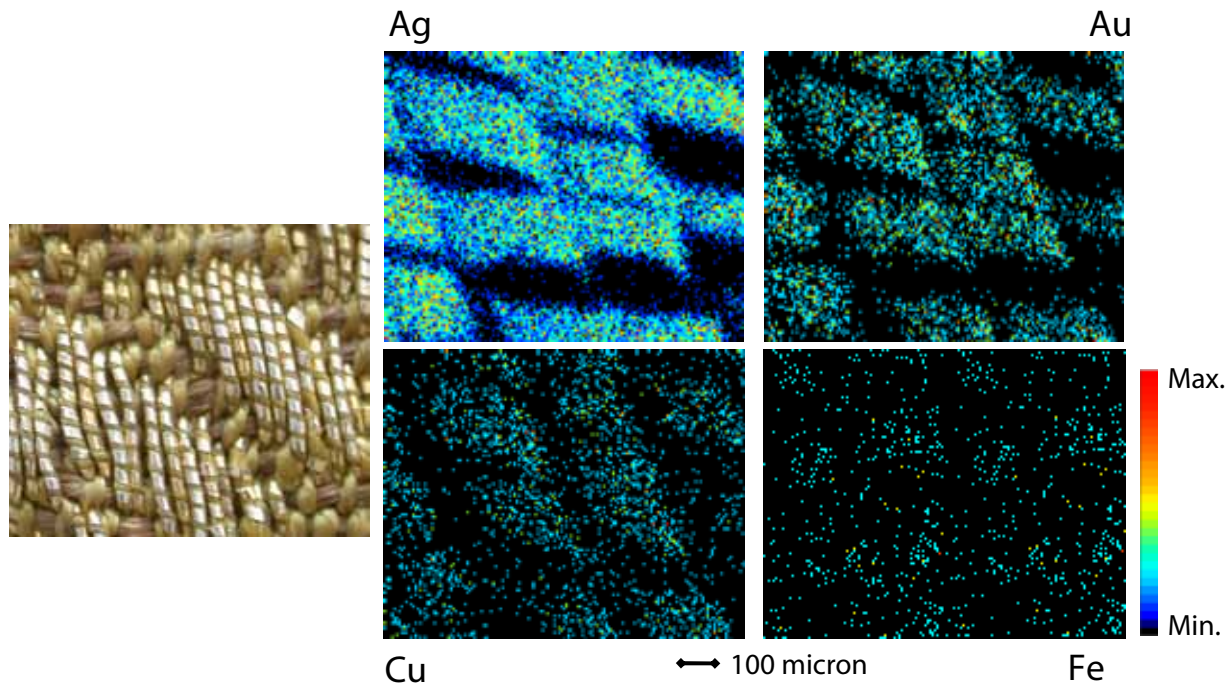


Fig. 4 Esempio di mappe elementali ottenute in una misura PIXE con microfascio esterno a scansione: analisi di un ricamo a fili dorati (misure effettuate al LABEC con un fascio esterno di protoni da 3 MeV e dimensioni di circa 20  $\mu\text{m}$ ). La fotografia a sinistra mostra una porzione della superficie del ricamo, realizzato con la tecnica cosiddetta a "or nué" che utilizza fili di seta sui quali è avvolto un sottilissimo nastro dorato; le mappe sulla destra mostrano la distribuzione spaziale dei raggi X rivelati all'interno di una delle aree analizzate. Argento, oro e rame sono chiaramente presenti all'interno del nastro metallico (è riconoscibile nelle mappe l'avvolgimento a spirale), mentre il ferro è correlato al filo di seta scoperto.

hanno consentito di capire la tecnica usata da Antonello per ottenere particolari effetti di ombreggiatura e di prendere decisioni ponderate sugli interventi di ripulitura da effettuare in superficie; oppure le misure sui ricami a filo dorato, dalle quali si sono potute ricavare informazioni quantitative sul tipo di materiale utilizzato e distinguerne diverse tipologie composizionali, associate a diverse tipologie stilistiche dei ricami [17] (fig.4).

Non sempre però è necessaria una risoluzione spaziale così spinta, mentre può essere molto utile mappare la composizione anche con minor risoluzione (ordine del centinaio o di qualche centinaia di micrometri), ma su superfici relativamente grandi, fino a qualche centimetro quadro [18]. Per queste applicazioni sono stati sviluppati sistemi di millifascio esterno (ottenuto per semplice collimazione), sempre a scansione e con acquisizione dati  $E, x, y$  in list-mode; in questi sistemi, non è il fascio a muoversi sul bersaglio – come nel caso dei microfasci – ma è il bersaglio che si muove davanti a un fascio fisso, grazie a opportuni stage di movimento.

Come già si accennava all'inizio di questo paragrafo, di

grande utilità specificamente nel campo dei Beni Culturali si sono dimostrati i sistemi integrati di più tecniche IBA utilizzate simultaneamente. Ad esempio, l'acquisizione anche dei raggi gamma (PIGE) emessi sotto fascio dai nuclei degli elementi a basso  $Z$  permette di metterne in evidenza la presenza anche al di sotto di strati superficiali di qualche decina di micrometri. I raggi X di questi elementi sono di energia troppo bassa e sono totalmente assorbiti dallo strato superficiale, mentre i raggi gamma, di molto maggiore energia, non presentano problemi di assorbimento. D'altra parte proprio per gli elementi a basso  $Z$  è più probabile in linea di massima indurre interazioni inelastiche nucleari – con conseguenti diseccitazioni gamma – perché la repulsione coulombiana tra proiettile e bersaglio è minore, e le particelle possono avvicinarsi di più al nucleo bersaglio facendo entrare in gioco interazioni di tipo nucleare. L'uso della PIGE ha consentito di dare risposte importanti in diversi casi: ad esempio la rivelazione dei gamma del Na ha consentito l'identificazione certa del blu di lapislazzuli al di sotto della vernice protettiva nel dipinto di Leonardo mostrato sopra nella fig. 1 [15], e sempre la rivelazione dei gamma del Na ha

prodotto diverse applicazioni nello studio di vetri antichi, ad esempio in [19].

E a proposito di misure simultanee con diverse tecniche IBA, va citato senz'altro lo sviluppo della IBIL (Ion-Beam-Induced Luminescence), anche con mappatura e con microfascio esterno, per aggiungere informazioni non solo elementali [20, 21]. La IBIL è l'emissione di fotoni nel IR/VIS/UV (200–900 nm nel set-up allestito al LABEC) da parte di un materiale eccitato da ioni con le solite energie di qualche MeV. Essa consente per alcuni materiali, in via di principio, di determinare: la natura dei legami molecolari, lo stato di valenza degli ioni, le caratteristiche dei reticoli cristallini, e infine la presenza di elementi in tracce, impurezze, difetti strutturali. La IBIL fornisce, anche con fasci di debolissima intensità, segnali molto intensi e può essere utile anche per prevenire possibili insorgenze di danni dovuti appunto all'irraggiamento col fascio, in quanto una diminuzione dell'intensità del segnale IBIL si manifesta ben prima che l'interazione delle particelle del fascio col materiale produca un qualche danno visibile.

Infine, anche se in questo caso non si tratta più di tecniche IBA convenzionali e c'è la necessità di usare acceleratori a energie molto maggiori, come recente sviluppo delle analisi con fasci ionici che hanno aperto in qualche modo un nuovo campo di applicazioni va ricordata la possibilità di analisi di "quasi bulk" utilizzando – con fasci di protoni a energie delle decine di MeV – la tecnica DPAA (Deep Proton Activation Analysis) [22].

Nel complesso dunque, ci sembra si possa senz'altro affermare che usando le tecniche IBA si possono ottenere nel campo dei Beni Culturali – in maniera assolutamente non distruttiva, in senso molto ampio – informazioni di una qualità e ricchezza insuperate.

Naturalmente, non è detto che questa grande potenzialità sia sempre indispensabile. Perciò è cosa saggia (come per qualunque tecnica del resto) un uso ragionato, in relazione al particolare problema che viene posto dagli storici dell'arte e dai restauratori, alla complessità della strumentazione da usare e ai vincoli specifici che si possono avere (ad esempio le difficoltà di movimentazione dell'opera da analizzare): è in altri termini importante stabilire dei protocolli caso per caso, che prevedano magari, prima, delle misure *in situ* con altre tecniche e, successivamente, la possibilità di utilizzare tecniche di fascio per completare e/o meglio chiarire i risultati.

## 2.2 Datazioni col radiocarbonio e Accelerator Mass Spectrometry

Perché siano più pregnanti le considerazioni che faremo in seguito, richiamiamo brevemente i principi fondamentali del metodo del  $^{14}\text{C}$ .

La datazione di un reperto di origine organica si basa sul

fatto che, assumendo che dopo la morte dell'organismo non ci sia più alcun meccanismo di assimilazione o formazione di  $^{14}\text{C}$ , la relazione fra tempo trascorso dalla morte e concentrazione residua di  $^{14}\text{C}$  è data proprio dall'equazione del decadimento radioattivo. Chiamando  $^{14}R$  il rapporto fra il numero di atomi di  $^{14}\text{C}$  e quello totale di atomi di carbonio, si ha allora  $^{14}R(t) = ^{14}R(0) e^{-t/\tau}$ . Perciò, la "età del reperto", cioè il tempo trascorso dalla morte dell'organismo di origine, si può determinare misurando la concentrazione residua di  $^{14}\text{C}$ ,  $^{14}R(t)$ . Assumendo di conoscere la concentrazione  $^{14}R(0)$  al momento della morte (valore convenzionale  $^{14}R(0)_{conv} = 1.18 \times 10^{-12}$ ), e assumendo un valore convenzionale della vita media  $\tau$  del  $^{14}\text{C}$  ( $\tau_{conv} = 8033$  anni), dalla misura del  $^{14}R$  residuo si deduce una età anch'essa evidentemente convenzionale ("radiocarbon age",  $t_{rC}$ ):

$$t_{rC} = \tau_{conv} \ln \frac{^{14}R(0)_{conv}}{^{14}R(t)} .$$

La radiocarbon age non corrisponderà all'età vera, per via dell'arbitrarietà delle assunzioni fatte. In particolare, sappiamo con certezza che a causa di molti fattori sia naturali che antropogenici, il valore  $^{14}R(0)$  non è sempre stato lo stesso in passato: ha fluttuato anzi notevolmente, e bisogna quindi tenerne conto correggendo opportunamente il valore della  $t_{rC}$ . E si può fare: grazie a un gran numero di misure di concentrazione residua di  $^{14}\text{C}$ , effettuate su campioni la cui età è misurabile con tecniche indipendenti, si è potuta infatti progressivamente costruire una curva di calibrazione (valore convenzionale misurato  $t_{rC}$  vs. età vera) che oggi arriva fino a quasi 50 000 anni fa [23]. Con questa curva si può allora correggere, nelle misure su reperti incogniti, l'età convenzionale inizialmente ottenuta, convertendola in una data vera "calendariale". La fig. 5 mostra ad esempio l'andamento della curva di calibrazione per gli ultimi 2000 anni e la fig. 6 due esempi grafici di procedura di calibrazione. Un altro aspetto che è importante richiamare sulle datazioni col  $^{14}\text{C}$  è quello dell'incertezza del risultato. Una prima causa di incertezza è dovuta alla propagazione su  $t_{rC}$  dell'errore sul dato misurato direttamente, cioè la concentrazione  $^{14}R(t)$ . Da

$$t_{rC} = \tau_{conv} \ln \frac{^{14}R(0)_{conv}}{^{14}R(t)} , \text{ segue immediatamente che}$$

$$\delta t_{rC} = \tau \frac{\delta ^{14}R(t)}{^{14}R(t)}$$

Dato che  $\tau$  è circa 8000 anni, un'incertezza ad esempio di  $\pm 1\%$  in  $^{14}R(t)$  ne produce una di  $\pm 80$  anni in  $t_{rC}$ . A questo si aggiunga che spesso la procedura di ricalibrazione fa aumentare l'incertezza, sia perché anche la curva di calibrazione – essendo stata costruita essa stessa sulla base di misure – ha i suoi margini di errore (si noti nelle fig. 5 e

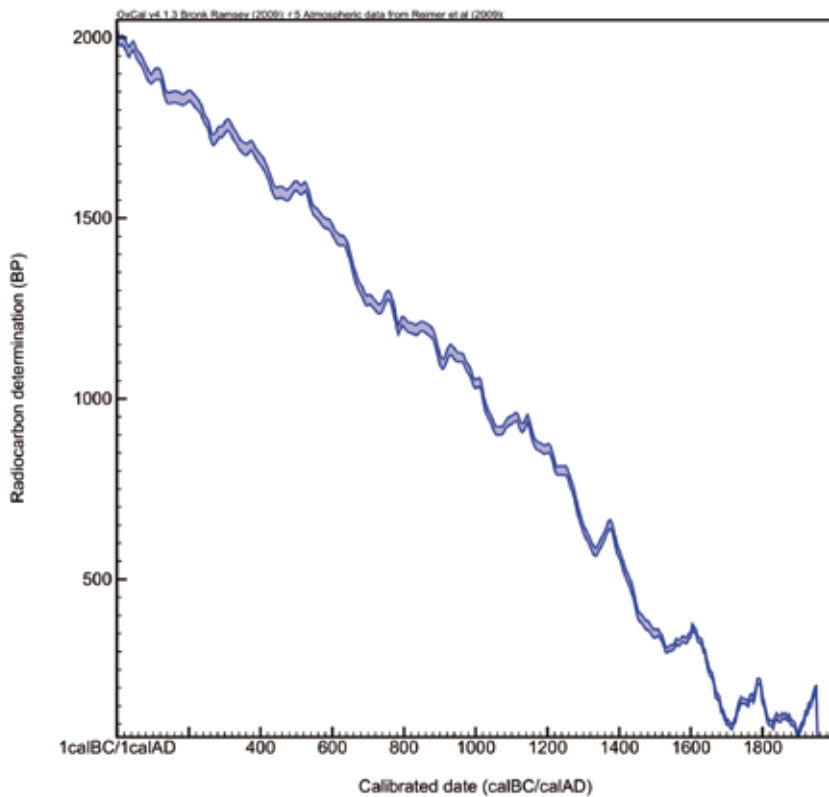


Fig. 5 Andamento della curva di calibrazione negli ultimi due millenni (la rappresentazione grafica è quella che si ottiene usando il software OxCal, versione 4 [24], sviluppato presso l'Università di Oxford, Oxford Radiocarbon Accelerator Unit, e a disposizione gratuita di tutta la comunità dei ricercatori). In ascissa, la data vera (BC=before Christ, AD=Anno Domini); in ordinata, l'età convenzionale di radiocarbonio  $t_{rc}$ , espressa in anni BP (before present, dove, sempre per convenzione, il "present" è l'anno 1950).

6 che si tratta non di una linea, ma di una "fascia", sia per il suo andamento in alcuni tratti "quasi orizzontale", o talvolta oscillante, che può far corrispondere a un piccolo intervallo di  $t_{rc}$  ottenuto dalla misura, un range anche parecchio più grande di valori per la data calendariale corrispondente (come in fig. 6b).

In generale si assume come obiettivo di una buona datazione col radiocarbonio, per reperti di epoca storica o poco più vecchi, un errore nel valore misurato per  $^{14}R$  non superiore al  $\pm 0.5\%$  (cioè un errore propagato su  $t_{rc}$  di  $\pm 40$  anni), fermo restando che poco si potrà fare se poi nella ricalibrazione si capita in una zona di curva "infelice" che può far aumentare l'incertezza effettiva sulla data calendariale (ma in casi fortunati, se la curva è localmente monotona e a elevata pendenza – come in fig. 6a – si può invece addirittura diminuire l'incertezza finale!).

Visto allora che si tratta di misurare un valore di  $^{14}R$  che è al massimo di  $10^{-12}$ , e che vogliamo misurarlo con una precisione dello 0.5% o meglio, si capisce subito bene che non è cosa facile, perché si tratta di coniugare una enorme sensibilità con un'ottima precisione, e come i fisici fanno

fin dai tempi della Fisichetta I, le due cose sono difficili da far andare d'accordo. Ci si riesce in effetti, però, usando la spettrometria di massa con acceleratore (vedi ad esempio [26, 27]). Grazie a "filtri" di soppressione degli interferenti isobarici (che sono i nemici principali quando si richiedono questi livelli di sensibilità in una misura di rapporto isotopico) si riesce ad arrivare oggi a un livello minimo di rivelabilità di  $\sim 10^{-15}$  in  $^{14}R$  (che vuol dire un valore massimo di  $t_{rc}$  del reperto superiore a 50 mila anni!). Come è noto infatti, in un acceleratore Tandem si ottiene una poderosa reiezione degli interferenti isobarici grazie proprio alle sue modalità di funzionamento; in particolare quella degli isobari molecolari  $^{12}CH_2$  e  $^{13}CH$  deriva dalla dissociazione di tali molecole nella fase di stripping degli elettroni al terminale di alta tensione. Ma oltre all'enorme sensibilità, l'AMS possiede anche l'altro requisito richiesto, quello della precisione: misure allo 0.5% sono ormai standard grazie all'elevata efficienza dei processi di sputtering nelle sorgenti dei Tandem dove si colloca il materiale ottenuto dal campione da datare, all'efficienza di trasmissione del fascio fino all'analisi magnetica e elettrostatica di massa, e a quella del

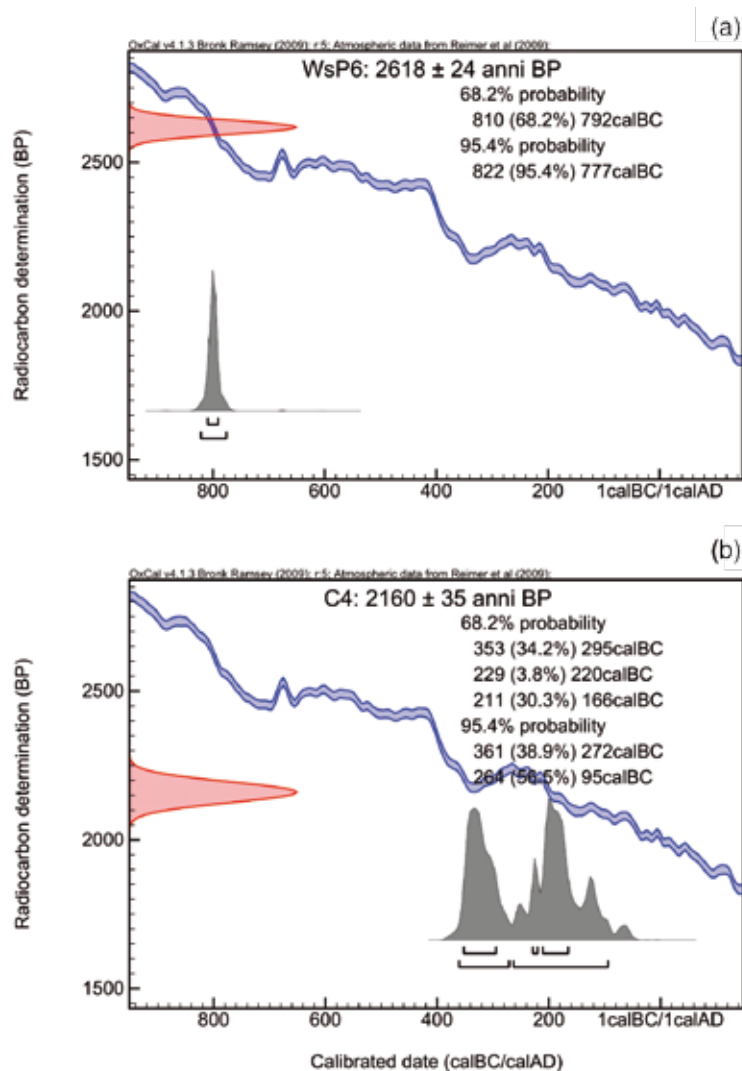


Fig. 6 Esempi di calibrazione dell'età convenzionale di radiocarbonio ottenuti utilizzando il già citato programma OxCal, versione 4. I due esempi corrispondono a misure effettuate al LABEC su campioni di carbone rinvenuti in uno scavo nel Parco Archeologico di Baratti e Populonia [25]. L'età convenzionale di radiocarbonio è rappresentata sull'asse y in rosso come una variabile a distribuzione gaussiana; sull'asse x è mostrata in grigio la corrispondente distribuzione di probabilità della data calibrata (calcolata usando la curva di calibrazione) per la quale sono riportati anche gli intervalli al 68% e al 95% di livello di confidenza. A causa dell'andamento irregolare della curva di calibrazione, la distribuzione di probabilità della data calibrata non è evidentemente gaussiana; in particolare (vedi b)), a una età convenzionale misurata possono corrispondere anche più intervalli possibili di età calibrata.

conteggio finale nel rivelatore. È questa elevata efficienza dei processi nella AMS che fa sì che le statistiche di conteggio richieste (ovviamente, si devono superare i 40000 conteggi per un'incertezza statistica  $<0.5\%$ ) si raggiungano in tempi molto brevi (dell'ordine della ventina di minuti complessivi per un campione recente), e sacrificando soltanto pochi milligrammi del materiale che si vuole datare. Rispetto alla tecnica tradizionale del  $\beta$ -counting, ci sono circa tre ordini di grandezza di guadagno per quanto riguarda le masse necessarie alla misura, e questo guadagno è stato decisivo per la possibilità stessa di datare certi tipi di reperti, o perché di valore simbolico o archeologico o artistico tale da non consentire sacrifici di quantità significative, o perché, addirittura, pur essendo "sacrificabili" hanno essi stessi proprio masse di pochi milligrammi.

Grazie all'AMS, oggi le datazioni  $^{14}\text{C}$  sono veramente tantissime (si può stimare che nel mondo ne vengano fatte tra le dieci e le ventimila l'anno). Ogni tanto qualche risultato assurge agli onori della cronaca anche dei media (specie quando vengono confutate tradizioni o convincimenti radicati nella cultura o nella religione) [28–32]. Ma la maggior

parte delle datazioni che si fanno restano ignote al grande pubblico, pur costituendo uno strumento fondamentale per l'avanzamento delle conoscenze in campo archeologico soprattutto, ma talvolta anche in campo storico-artistico. È davvero un grande servizio che la fisica nucleare, e la tecnologia associata, offrono agli archeologi e agli storici. La possibilità di datare reperti di pochi milligrammi è stata decisiva anche per la costruzione stessa della curva di calibrazione [33], che come abbiamo visto sopra è l'altro pilastro su cui si fonda la possibilità di effettuare una datazione calendariale e non convenzionale. Solo grazie all'AMS si sono potuti datare così tanti reperti di età indipendentemente nota, e quindi costruire una curva affidabile estesa nel tempo fino quasi ai citati limiti di sensibilità del metodo, cioè i 50000 anni.

In definitiva, pur essendo stata introdotta ormai trenta anni fa, la AMS è ancora oggi l'unica tecnica ragionevolmente possibile per le datazioni col radiocarbonio, e non si intravedono proprio alternative. Ma all'interno della AMS c'è ancora spazio per nuovi sviluppi: le procedure si sono affinate, la tecnologia corre e l'affidabilità degli acceleratori e

in genere dei sistemi per AMS è molto cresciuta negli ultimi anni.

Per quanto riguarda le procedure, uno sviluppo relativamente recente, sempre legato alla AMS perché richiede di datare reperti di piccolissima massa, è quello del cosiddetto “wiggle matching”. Nella misura di un singolo reperto, se non ci fosse la necessità di ricalibrare, si potrebbe pensare di poter rendere l’incertezza su  $t_{rc}$  piccola a piacere, semplicemente aumentando la statistica di conteggio per ridurre l’incertezza nella misura della concentrazione residua di  $^{14}\text{C}$ . Ma a causa della necessità di ricalibrare, con l’incertezza aggiuntiva che essa comporta nella determinazione dell’età vera, non ha molto senso spingere il limite della statistica di conteggio fino a ridursi al di sotto di qualche per mille. Tuttavia se si dispone di più reperti di cui si conosca a priori la *differenza di età* (questo è il caso ad esempio di frammenti di anelli diversi di tronchi di albero<sup>4</sup> rinvenuti in contesti archeologici o all’interno di rocce formatesi per eruzioni vulcaniche, o prelevati da tavole lignee), si possono sfruttare proprio le oscillazioni della curva di calibrazione per migliorare la precisione delle datazioni. Se infatti alle misure delle età di questi campioni si aggiunge l’informazione sulla differenza nota fra la loro età vera, si pone di fatto un “vincolo” ai singoli risultati, “condizionando” le singole distribuzioni di probabilità delle date calibrate ottenute per i vari reperti a essere compatibili anche con differenze note fra di esse. Ciò può portare a una sensibile riduzione dell’incertezza, fino a pochi anni.

Un caso che ha avuto molta risonanza in cui si è potuta adottare questa tecnica è stata la ricollocazione cronologica della famosa eruzione del vulcano dell’isola greca di Santorini [34]. L’eccezionale ritrovamento di un tronco di albero rimasto intrappolato nella lava – nel quale si potevano ben distinguere ancora gli anelli di accrescimento – ha permesso di costruire una sequenza di campioni di differenza di età nota, che sono stati datati con AMS; la calibrazione di questa sequenza tenendo conto del wiggle matching ha ristretto l’intervallo temporale a cui far risalire l’eruzione al periodo compreso fra il 1627 e il 1600 a.C. (al 95% di probabilità). Questa datazione è di circa cento anni precedente a quanto risultava dalle ricostruzioni storiche, e ne è scaturito un dibattito che ha avuto vasta eco e che è tuttora in corso. Il wiggle matching evidentemente non è sempre applicabile, e comporta comunque un grosso sforzo sperimentale perché il miglioramento che ne consegue per la datazione richiede parecchie misure per essere significativo; nella maggior parte

<sup>4</sup> In un tronco di albero, ogni anno si forma un nuovo anello, quello più esterno, che è l’unico che scambia con l’atmosfera. Perciò dalla misura di radiocarbonio l’età del materiale di un anello più interno ci si aspetta che risulti maggiore di quella di uno più esterno, di tanti anni quanta è la differenza di posizione fra gli anelli.

dei casi, o proprio non si dispone di reperti su cui si possa adottare la tecnica, o comunque il gioco non varrebbe la candela essendo comunque sufficiente la precisione della data ottenuta da una singola misura. Va messo in evidenza comunque che è solo la capacità dell’AMS di ottenere una data da campioni di piccola massa che, nel caso, rende possibile il wiggle matching.

E a proposito di variazioni nella concentrazione di equilibrio del  $^{14}\text{C}$  nel passato, c’è un’anomalia molto particolare ancora poco sfruttata in applicazioni dedicate ai Beni Culturali. È il cosiddetto “bomb peak”, cioè il rapidissimo aumento della concentrazione atmosferica di  $^{14}\text{C}$  che si è avuto nel secondo dopoguerra a causa dei test nucleari condotti in atmosfera da varie potenze mondiali fino al trattato di non proliferazione del 1963. A causa di queste esplosioni, i neutroni emessi nelle fissioni hanno prodotto una enorme quantità aggiuntiva di  $^{14}\text{C}$  in atmosfera (reazione  $^{14}\text{N}(n_{th}, p)^{14}\text{C}$ ), che ha portato quasi a raddoppiare in pochi anni, fra il 1955 e il 1964, la concentrazione di equilibrio. Successivamente, essendo cessati i test in atmosfera, la concentrazione si è di nuovo abbassata progressivamente via via che l’eccesso di molecole  $^{14}\text{CO}_2$  veniva riassorbito nel ciclo naturale del carbonio, in particolare diluendosi in quell’enorme serbatoio che sono gli oceani. Una curva che rappresenta il “bomb peak” è riportata in fig. 7.

Le variazioni così rapide e grandi nelle concentrazioni di equilibrio in atmosfera si sono ripercosse anche sugli organismi viventi in quegli anni, offrendo così una possibilità molto chiara ad esempio di discriminazione fra “prima” e “durante” il periodo considerato, e anche da anno a anno al suo interno. Molte e interessanti sono le applicazioni in campo forense e biologico [36, 37], ma le stesse variazioni possono essere utilizzate ad esempio per la possibile scoperta di falsificazioni recenti di opere della prima metà del XX secolo.

Infine, dal punto di vista degli sviluppi strumentali dell’AMS, un trend che sembra esserci è quello verso macchine di tensione più bassa. All’inizio, i Tandem che venivano usati erano quelli ereditati dalle misure di fisica nucleare di base, quindi molti avevano tensioni massime di terminale di parecchi MV; poi se ne sono cominciati a costruire di dedicati (progettati per massimizzare ad esempio la trasmissione del fascio) con tensioni massime intorno ai 2.5–3 MV. Recentemente, sono state messe sul mercato anche macchine con più basse tensioni di terminale massime, più maneggevoli e economiche. Ce ne sono da 500 kV, ma sono stati costruiti sistemi sperimentali dedicati anche di soli 200 kV [38]. Ovviamente sono macchine di dimensioni più compatte, ma paradossalmente sono più “difficili” nell’uso. Infatti, l’efficienza di stripping al terminale del Tandem per gli stati di carica positiva multipla è minima dopo una prima accelerazione a un’energia così bassa, e quindi, tipicamente,

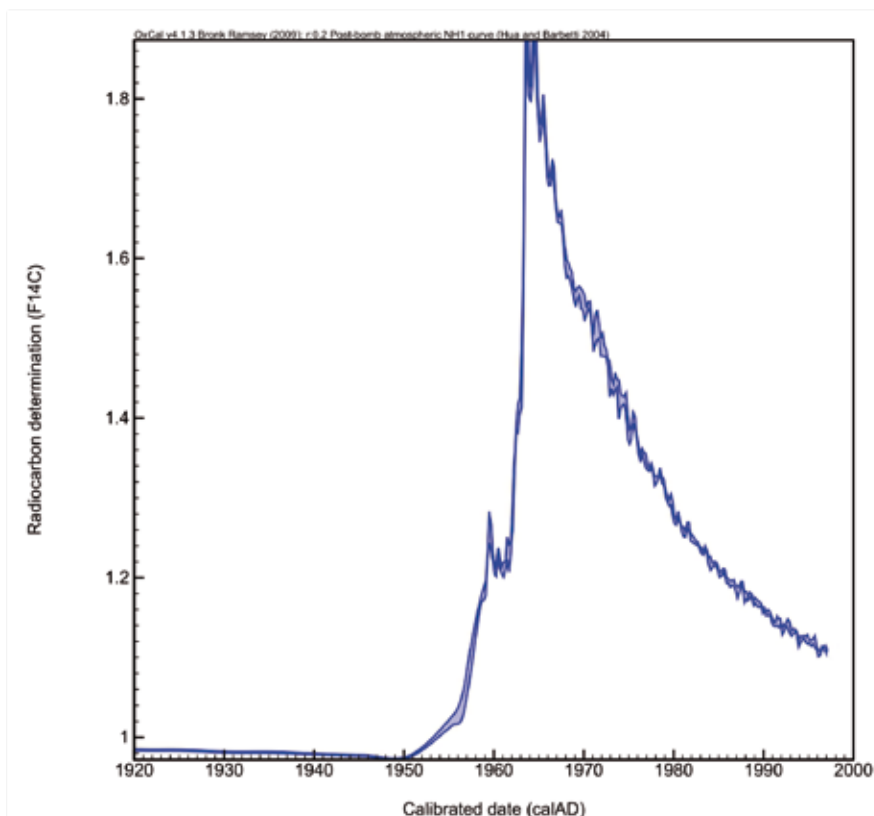


Fig. 7 Variazione relativa della concentrazione atmosferica di  $^{14}\text{C}$  misurata durante gli ultimi decenni (da [35]). I valori riportati si riferiscono a misure effettuate nell'emisfero settentrionale (nella zona compresa fra il 40° parallelo e il polo nord). L'ordinata rappresenta la frazione rispetto al valore convenzionale di  $^{14}\text{C}$  nel 1955.

ad essere analizzati sono gli ioni  $^{14}\text{C}$  con stato di carica  $1^+$ , con una più bassa efficienza di soppressione degli isobari molecolari. Inoltre, l'energia finale molto più bassa rende il conteggio finale più critico: ad esempio la perdita di energia nello spessore morto del rivelatore (o nella finestra di ingresso se si lavora con contatori a gas) è elevata e produce un grosso stragging, rendendo difficili o impossibili tecniche come quella dell'ulteriore discriminazione in un rivelatore  $\Delta E - E$ , o comunque impedendo la discriminazione di eventuali interferenti residui basata su piccole differenze nell'energia finale. Molti progressi sono stati comunque fatti per superare questi problemi, e la precisione della misura può avvicinarsi a quella ottenibile con macchine più grosse. È vero però che, proprio per la sofisticazione degli accorgimenti adottati per aggirare e superare i problemi, si tratta di macchine che devono ancora – e diremmo ancor più di quelle più grosse – rimanere nelle mani dei fisici: lo sperato salto di qualità di una macchina per datazioni do-it-yourself da parte degli archeologi sembra ben lungi dall'essere a portata di mano.

### 3 Conclusioni

Ci sembra quindi di poter tranquillamente concludere esprimendo la sicura convinzione che ci sia ancora tanto spazio per continuare a lavorare nel campo dei Beni Culturali

con le tecniche nucleari, in maniera non solo stimolante per noi fisici, ma veramente utile per la comunità degli studiosi e dei conservatori. Naturalmente occorre avere la capacità di utilizzare queste tecniche al meglio e l'equilibrio per farlo nella giusta misura – cioè quando sono effettivamente utili – integrandole o comunque affiancandole se necessario ad altri tipi di tecniche complementari, sia di tipo fisico che in altri ambiti scientifici. Il messaggio che emerge infatti da una seria analisi della situazione generale nel campo della "scienza per i Beni Culturali" è che è spesso opportuno utilizzare un'ampia gamma di tecniche per rispondere in maniera esaustiva alle domande (sempre più complesse e esigenti) che studiosi e restauratori ci pongono. Questa constatazione da un lato dimostra la vitalità dell'intero settore delle applicazioni scientifiche per lo studio del patrimonio culturale; dall'altro, testimonia che le culture umanistica e scientifica si integrano e si cercano sempre più spesso, con grande beneficio per la crescita di entrambe.

La portata delle applicazioni della scienza ai beni culturali è sempre più percepita a tutti i livelli, dal grande pubblico alle alte sfere della politica. Speriamo non ci si dimentichi che la possibilità di continuare ad alimentare queste applicazioni, migliorarle e comunque mantenerle attuali ed efficaci è qui – come in tutti i settori della scienza applicata – strettamente legata al mantenere viva anche la ricerca di base da cui le applicazioni discendono.

## Referenze

- [1] A. Giakoumaki, K. Melessanaki, D. Anglos, *Anal. Bioanal. Chem.*, 387 (2007) 749.
- [2] J. Agresti, A. A. Mencaglia, S. Siano, *Anal. Bioanal. Chem.*, 395 (2009) 2255.
- [3] S. Sciuti, G. Suber, *La Rivista del Nuovo Cimento*, 14, no. 7 (1991) 1.
- [4] A. Migliori, P. Bonanni, A. Cagnini, L. Carraresi, N. Grassi, P. A. Mandò, S. Porcinai, *Application of a novel portable XRF spectrometer to a gilded bronze relief by L. Ghiberti from the Gate of Paradise of the Florence Baptistery*, accettato per la pubblicazione su *Il Nuovo Cimento B*.
- [5] M. A. Kumakhov, *X-Ray Spectrom.*, 29 (2000) 343.
- [6] C. Fiorini, A. Longoni, A. Bjeoumikhov, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 48 (3) (2001) 268.
- [7] A. Longoni, C. Fiorini, C. Guazzoni, S. Buzzetti, M. Bellini, L. Strüder, P. Lechner, A. Bjeoumikhov, J. Kemmer, *X-Ray Spectrom.*, 34 (2005) 439.
- [8] M. Chiari, A. Migliori, P. A. Mandò, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 188 (2002) 151.
- [9] I. Brissaud, A. Guillò, G. Lagarde, P. Midy, T. Calligaro, J. Salomon, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 155 (1999) 447.
- [10] C. Neelmeijer, I. Brissaud, T. Calligaro, G. Demortier, A. Hautojärvi, M. Mäder, L. Martinot, M. Schreiner, T. Tuurnala, G. Weber, *X-Ray Spectrom.*, 29 (2000) 101.
- [11] P. A. Mandò, M. E. Fedi, N. Grassi, A. Migliori, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 239 (2005) 71.
- [12] N. Grassi, A. Migliori, P. A. Mandò, H. Calvo del Castillo, *X-ray Spectrom.*, 34 (2005) 306.
- [13] N. Grassi, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 267 (2009) 825.
- [14] N. Grassi, P. Bonanni, C. Mazzotta, A. Migliori, P. A. Mandò, *X-Ray Spectrom.*, 38 (2009) 301.
- [15] N. Grassi, A. Migliori, P. A. Mandò, H. Calvo del Castillo, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 219-220 (2004), 48.
- [16] L. Giuntini, M. Massi, S. Calusi, *Nucl. Instrum. Methods. A*, 576 (2007), 266.
- [17] A. Migliori, N. Grassi, P. A. Mandò, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 266 (2008) 2339.
- [18] N. Grassi, L. Giuntini, P. A. Mandò, M. Massi, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 256 (2007) 712.
- [19] G. Weber, Y. Vanden Bemden, M. Pirotte, B. Gilbert, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 240 (2005) 512.
- [20] S. Calusi, E. Colombo, L. Giuntini, A. Lo Giudice, C. Manfredotti, M. Massi, G. Pratesi, E. Vittone, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 266 (2008), 2306.
- [21] A. Quaranta, J. C. Dran, J. Salomon, M. Tonezzer, C. Scian, L. Beck, S. Carturan, G. Maggioni, G. Della Mea, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 266 (2008) 2301.
- [22] G. Pappalardo, A. Esposito, G. A. Cirrone, G. Cuttone, S. Garraffo, L. Pappalardo, F. Rizzo, F. P. Romano, S. Russo, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 266 (2008) 2286.
- [23] P. J. Reimer, *et al; Radiocarbon*, 51 (4) (2009) 1111.
- [24] C. Bronk Ramsey, *Radiocarbon*, 51 (1), (2009) 337.
- [25] A. Cartocci, M. E. Fedi, F. Taccetti, M. Benvenuti, L. Chiarantini, S. Guideri, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 259 (2007) 384.
- [26] C. Tuniz, J. R. Bird, D. Fink and G. F. Herzog, "Accelerator Mass Spectrometry: ultrasensitive analysis for global science" (CRC Press, Boca Raton) 1998.
- [27] M. E. Fedi, "Accelerator Mass Spectrometry for  $^{14}\text{C}$  dating", in *Organic Mass Spectrometry in Art and Archaeology*, a cura di M. P. Colombini and F. Modugno (Wiley, Chichester, UK) 2009, p. 459.
- [28] P. E. Damon, *et al; Nature*, 337 (1989) 611.
- [29] W. Kutschera, W. Müller, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 204 (2003), 705.
- [30] M. E. Fedi, A. Cartocci, F. Taccetti, P. A. Mandò, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 266 (2008) 2251.
- [31] D. Penny, Q. Hua, C. Pottier, R. Fletcher, M. Barbetti, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 259 (2007) 388.
- [32] M. E. Fedi, L. Carraresi, N. Grassi, A. Migliori, F. Taccetti, F. Terrasi, P. A. Mandò, "The *Artemidorus papyrus*: solving an ancient puzzle with radiocarbon and Ion Beam Analysis measurements", *Radiocarbon* 52, no. 2-3 (2010), in stampa.
- [33] M. G. L. Baillie, *Radiocarbon* 51 (1) (2009) 361.
- [34] W. L. Friedrich, B. Kromer, M. Friedrich, J. Heinemeier, T. Pfeiffer, S. Talamo, *Science*, 312 (2006) 548.
- [35] Q. Hua e M. Barbetti, *Radiocarbon*, 46 (3) (2004) 1273.
- [36] E. M. Wild, R. Golser, P. Hille, W. Kutschera, A. Priller, S. Puchegger, W. Rom, P. Steier, *Radiocarbon*, 40 (1) (1998) 273.
- [37] S. Bernard, J. Frisén, K. L. Spalding, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 266 (2010) 1295.
- [38] H.-A. Synal, M. Stocker, M. Suter, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 259 (2007) 7.

### Pier Andrea Mandò

Pier Andrea Mandò, Professore Ordinario di Fisica Applicata nell'Università di Firenze e Direttore della Sezione di Firenze dell'INFN, da molti anni si è dedicato allo sviluppo di tecniche nucleari per applicazioni in vari settori, come lo studio dei Beni Culturali e il controllo dell'inquinamento atmosferico. Intorno a queste attività ha formato un gruppo di ricerca progressivamente affermatosi a livello internazionale, che ha portato alla costituzione a Firenze di un laboratorio INFN dedicato, il LABEC (Laboratorio di tecniche nucleari per i Beni Culturali). Nel 2009 ha ricevuto dalla Società Europea di Fisica il Premio IBA Europhysics per i suoi contributi nel campo della fisica nucleare applicata

### Mariaelena Fedi

Mariaelena Fedi, laureata in Fisica nel 2000, PhD in Fisica nel 2004, è attualmente Ricercatore della Sezione di Firenze dell'INFN. Tiene dal 2005 il corso di Tecniche Analitiche Nucleari per la Laurea Specialistica in Conservazione e Diagnostica di Opere d'Arte all'Università di Ferrara. Si è inizialmente dedicata ad applicazioni di Ion Beam Analysis in vari settori, e in seguito alla creazione di un laboratorio di Spettrometria di Massa con Acceleratore presso il LABEC. È autrice di numerose pubblicazioni su riviste internazionali e su volumi sia a carattere scientifico che divulgativo.

### Novella Grassi

Novella Grassi, laureata in Fisica nel 2002, PhD in Scienze per i Beni Culturali nel 2005, lavora presso il LABEC come Assegnista di Ricerca INFN. Tiene dal 2005 il corso di Laboratorio di Fisica per la Laurea Specialistica in Scienze per la Conservazione e il Restauro all'Università di Firenze ed è docente nel Master sui Beni Culturali all'Università di Pisa. Collabora con vari gruppi in Italia e all'estero per lo sviluppo di tecniche e strumentazioni innovative in particolare nel campo della Ion Beam Analysis. È autrice di numerose pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali e su volumi.