

Tecniche nucleari di analisi e datazione dei beni culturali con l'acceleratore tandemtron del CEDAD

Lucio Calcagnile

CEDAD – Centro di Datazione e Diagnostica

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento, Italia

Parole chiave: Datazione con il radiocarbonio, Spettrometria di massa con acceleratore, Analisi con fasci ionici, Lupa Capitolina, Bronzi di Riace

1. Introduzione

Le tecniche nucleari di analisi e datazione sono state oggetto negli ultimi anni di un notevole interesse nel campo dei Beni Culturali grazie alla loro peculiarità di essere praticamente non distruttive. Per quanto riguarda la datazione assoluta con il metodo del radiocarbonio, l'Italia, a partire dal 2001, ha finalmente colmato il gap tecnologico con l'Australia, la Francia, la Germania, la Svizzera, il Regno Unito, gli Stati Uniti e le altre nazioni che sin dagli anni '80 avevano allestito laboratori in grado di utilizzare acceleratori di particelle per la datazione dei Beni Culturali.

All'estero alcuni di questi laboratori sono in grado di effettuare o l'analisi dei materiali oppure soltanto la datazione mediante la tecnica della Spettrometria di Massa con Acceleratore. In Italia, l'Università di Lecce, ora Università del Salento, ha allestito il CEDAD – Centro di Datazione e Diagnostica, il primo Centro di Ricerca e servizio per la datazione con il radiocarbonio e per l'analisi con fasci ionici che utilizza un acceleratore di particelle da 3MV. Nel corso degli anni il CEDAD ha aumentato notevolmente le sue potenzialità diventando un punto di riferimento in Italia e all'estero per studi che riguardano l'Archeologia, la Storia dell'Arte, la Scienza dei Materiali, le Scienze Geologiche e della Terra, le Scienze Forensi. Sono centinaia i siti archeologici studiati e decine di migliaia i campioni datati finora con l'acceleratore del CEDAD.

In questo lavoro verranno descritte le potenzialità delle tecniche nucleari utilizzate al CEDAD per stabilire la cronologia assoluta dei beni culturali e per determinare la composizione dei manufatti di interesse archeologico e artistico. Verrà descritta anche una importante innovazione tecnologica realizzata dai ricercatori del CEDAD grazie al progetto IT@CHA che consentirà di datare un reperto con soli 10 mg di materiale organico.

2. Il CEDAD – Centro di Datazione e Diagnostica – dell'Università del Salento

A partire dal 2001, l'Università di Lecce ha allestito il CEDAD - Centro di Datazione e Diagnostica, un centro multidisciplinare per la datazione mediante AMS (Accelerator Mass Spectrometry) e lo studio dei beni culturali con tecniche IBA (Ion Beam Analysis) [1-4]. La facility principale del CEDAD è il Tandetron, un acceleratore di ioni con tensione massima di 3 MV, al quale sono connesse sei linee sperimentali (Figura 1) che consentono la:

- a. datazione con il radiocarbonio mediante AMS fino a 50.000 anni;*
- b. datazione e analisi isotopica di ^{10}Be , ^{26}Al ; ^{129}I e degli attinidi*
- c. analisi dei materiali mediante Rutherford Backscattering Spectrometry*
- d. analisi elementare PIXE-PIGE in aria;*
- e. analisi con microfascio protonico;*
- f. impiantazione ionica di alta energia.*



Figura 1. Il sistema AMS-IBA del CEDAD dell'Università del Salento. All'acceleratore Tandetron sono connesse 6 linee di fascio e 4 sorgenti ioniche per la datazione con il radiocarbonio e l'analisi composizionale dei materiali

Il Centro dispone anche di laboratori per la preparazione chimica di una vasta tipologia di campioni per la datazione con il radiocarbonio [5].

3. La datazione con il radiocarbonio mediante spettrometria di massa con acceleratore

La determinazione dell'età di un campione organico (ossa, carboni, frammenti di legno, tela, ecc) con il radiocarbonio richiede la misura della concentrazione residua del ^{14}C nel campione. Il metodo fu sviluppato nell'immediato dopoguerra da W. Libby ed è diventato nel corso degli anni uno strumento fondamentale di indagine in numerosi campi di ricerca [6]. Il radiocarbonio prodotto negli strati alti dell'atmosfera per effetto dell'interazione dei raggi cosmici con ^{14}N , viene ossidato formando l'anidride carbonica $^{14}\text{CO}_2$ che entra, insieme alle due forme stabili di anidride carbonica ($^{12}\text{CO}_2$ e $^{13}\text{CO}_2$), nelle diverse riserve di carbonio del nostro pianeta (atmosfera, oceani, litosfera e biosfera). In ogni organismo vivente la concentrazione di radiocarbonio rimane costante e pari, in prima approssimazione, al valore presente nella sua riserva di radiocarbonio per l'instaurarsi di una condizione di equilibrio dinamico per il quale il ^{14}C che decade radio attivamente, o che viene rilasciato verso l'esterno per effetto dei processi biologici, è compensato dal ^{14}C assorbito attraverso la dieta o, per i vegetali, attraverso i processi di fotosintesi. Con la morte dell'organismo, questa condizione di equilibrio dinamico viene a mancare e la concentrazione di radiocarbonio inizia a diminuire esponenzialmente. Ne consegue che la misura della concentrazione residua di radiocarbonio presente in un campione consente di ricavare il tempo trascorso dalla morte dell'organismo.

La determinazione può essere effettuata mediante la determinazione dell'attività radioattiva del campione, vale a dire dal conteggio di particelle β -emesse durante il decadimento. Questa è la tecnica Radiometrica o "Convenzionale" sviluppata da Libby negli anni '50 e per la quale fu insignito del premio Nobel per la Chimica nel 1960.

Al CEDAD, invece, la determinazione della cronologia assoluta viene effettuata con la spettrometria di massa con acceleratore (AMS) introdotta a partire dalla fine degli anni '70 [7]. Questa tecnica si basa sulla misura diretta del radiocarbonio mediante un acceleratore di particelle. La tecnica AMS ha una efficienza un milione di volte più sensibile di quella radiometrica e consente pertanto la datazione con meno di un milligrammo di carbonio e in poche decine di minuti.

I vantaggi fondamentali di questa tecnica consistono nella riduzione della massa

di campione necessaria per la datazione e nella riduzione dei tempi di misura. Alcuni laboratori per la datazione con il radiocarbonio mediante AMS sono in grado di misurare campioni di massa dell'ordine di 0.1-1 mg, con incertezze sull'età di 20-30 anni in soli 10-15 minuti di misura con l'acceleratore. Nel paragrafo 7 verrà descritta una importante innovazione tecnologica realizzata al CEDAD grazie al progetto IT@CHA che consente di datare i materiali di interesse culturale con poche decine di microgrammi di carbonio, vale a dire con una quantità cento volte inferiore a quella attualmente utilizzata in analoghi laboratori all'estero.

Il sistema di spettrometria di massa con acceleratore (AMS) del CEDAD è costituito da una sorgente ionica, uno spettrometro di massa di bassa energia, un acceleratore tandem da 3 MV, e uno spettrometro di massa di alta energia per la separazione e analisi degli isotopi del carbonio.

Nella sorgente ionica un fascio di ioni di carbonio viene estratto dal campione di grafite preparato nei laboratori chimici, accelerato ad una energia di 35 keV e inviato al sistema di spettrometria di massa di bassa energia dove avviene la separazione delle componenti del fascio in base al rapporto energia/carica e massa/carica, prima dell'iniezione nel sistema di accelerazione. Nella parte centrale dell'acceleratore (stripper) le particelle collidono con gas argon di bassa densità perdendo elettroni e consentendo così la dissociazione degli isobari del carbonio. Nello spettrometro di alta energia avviene la separazione e l'analisi in massa ed energia del fascio ionico e la misura degli isotopi ^{12}C e ^{13}C e del radiocarbonio ^{14}C .

4 Le Tecniche di Ion Beam Analysis del CEDAD

La determinazione della composizione degli elementi nei materiali viene effettuata al CEDAD con tecniche di analisi con fasci ionici (IBA-Ion Beam Analysis) con lo stesso acceleratore utilizzato per la determinazione della cronologia assoluta dei materiali organici. Il gruppo di Fisica Applicata del Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione è stato tra i primi a seguire l'approccio integrato AMS-IBA per la determinazione della cronologia e delle composizioni dei materiali di interesse culturale utilizzando la stessa facility. Le tecniche di analisi mediante fasci ionici si basano essenzialmente sullo studio dei processi di interazione, a livello atomico e nucleare, tra particelle cariche di energia dell'ordine del MeV e la superficie del campione.

Le principali tecniche di analisi IBA, che trovano applicazioni nel campo dei beni culturali, sono la tecnica PIXE (Particle Induced X-Ray Emission), e le tecniche PIGE (Particle Induced Gamma Ray Emission) e RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry).

La Figura 2 mostra il set-up sperimentale per analisi IBA in aria del CEDAD. Un fascio di particelle (tipicamente protoni o particelle α), accelerato ad energie di 2-4 MeV viene focalizzato sulla superficie del campione da analizzare inducendo l'emissione di radiazione caratteristica (raggi x e gamma) e la retrodiffusione delle particelle incidenti. La rivelazione simultanea ed analisi in energia dei raggi x, dei raggi gamma e delle particelle retrodiffuse consente di determinare, sia in modo qualitativo che quantitativo, la composizione elementare del materiale analizzato.

La possibilità di rivelare ed analizzare in modo simultaneo e non distruttivo i diversi prodotti dell'interazione del fascio sonda di particelle con il campione, consente di effettuare analisi PIXE, PIGE e RBS, che sono in grado di fornire informazioni complementari in termini di elementi rilevabili, profondità di analisi e sensibilità.

Sebbene le tecniche IBA trovino applicazioni in numerosi campi di ricerca dalla Scienza dei Materiali, alla Biologia, alle Scienze della terra, al monitoraggio ambientale, esse sono diventate, soprattutto negli ultimi anni, uno strumento di analisi sempre più utilizzato nel campo della diagnostica dei beni culturali. In questo campo, in effetti, la possibilità di effettuare analisi composizionali sia di elementi maggioritari che in traccia, senza la necessità di campionamento ed in modo non distruttivo rappresenta il vantaggio fondamentale di queste tecniche analitiche come testimoniato dalle numerosissime applicazioni nell'analisi di dipinti rinascimentali, di manoscritti, miniature, ceramiche, vetri, gioielli e tessuti solo per citare alcuni esempi.

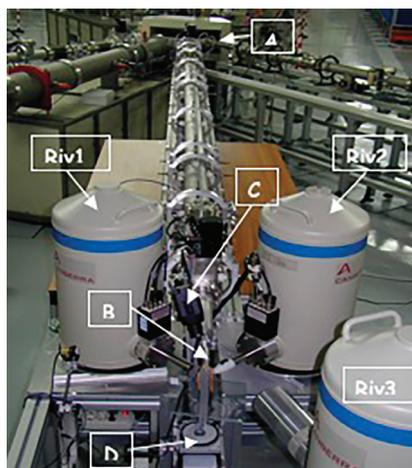


Figura 2. La linea PIXE-PIGE per analisi in aria del CEDAD dei beni culturali. A: magnete di switching; Riv1: rivelatore Si(Li) da 80 mm² per raggi x; Riv.2: rivelatore Si(Li) da 80 mm² per raggi X; Riv3 rivelatore al germanio per raggi gamma; B: terminale di estrazione del fascio; C: telecamera; D: sistema di movimentazione dei campioni

5. La tecnica PIXE (Particle Induced X-Ray Emission)

La tecnica PIXE si basa sulla rivelazione e analisi in energia dei raggi x caratteristici emessi da un materiale quando questo è sottoposto a bombardamento con fasci di particelle (tipicamente protoni) di energia dell'ordine del MeV [4]. L'interazione del protone incidente con un elettrone di una delle shell atomiche più interne, ha una certa probabilità di provocarne l'espulsione, lasciando l'atomo in uno stato ionizzato. La vacanza lasciata dall'elettrone nella shell interna viene "riempita" tramite una transizione da una shell più esterna, a cui corrisponde l'emissione da parte dell'atomo di un fotone di energia pari alla differenza tra le due shell. Poiché le energie degli elettroni nelle diverse shell sono caratteristiche di ciascuna specie atomica, lo sono anche le differenze tra di esse, e quindi anche l'energia del fotone x emesso. Nel campo della diagnostica dei beni culturali la tecnica PIXE ha i seguenti vantaggi:

- a. *Multielementarità*: la tecnica consente infatti di determinare in modo contemporaneo, in un unico ciclo di misura, tutti gli elementi con numero atomico superiore a quella del sodio.
- b. *Analisi in aria*: la tecnica ha il notevole vantaggio di essere utilizzata anche in aria o in atmosfera di elio grazie alla ridotta perdita di energia in aria dei protoni uscenti dall'acceleratore.
- c. *Elevata sensibilità*: l'utilizzo di opportune energie del fascio incidente, di opportune geometrie di rivelazione e di set-up sperimentali consente di rilevare sia gli elementi maggioritari nel campione (ad esempio gli elementi di matrice) che gli elementi in tracce con sensibilità dell'ordine delle parti per milione (ppm).
- d. *Non distruttività e ridotti tempi di misura*: l'elevato valore delle sezioni d'urto di ionizzazione consente di utilizzare correnti ridotte del fascio ionico sonda e di ridurre, quindi, sia i tempi di misura (tipicamente pochi minuti), e, soprattutto, il danno indotto sul materiale.
- e. *Complementarietà con altre tecniche di analisi IBA*: l'interazione del fascio sonda di protoni provoca non solo l'emissione di raggi x dal materiale ma anche di raggi gamma e la retrodiffusione dei protoni. La rivelazione, contemporanea a quella dei raggi x, ed analisi di questi ulteriori prodotti dell'interazione consente di rilevare elementi più leggeri del sodio non determinabili con la tecnica PIXE. In particolare la rivelazione dei raggi gamma consente di determinare elementi quali il fluoro, il sodio, il magnesio e l'alluminio mentre l'analisi dei protoni retrodiffusi consente di rilevare carbonio, ossigeno ed azoto.

6. Applicazioni delle tecniche IBA-AMS ai Beni Culturali

6.a Particolare della statua di "San Francesco"

Nell'ambito della collaborazione tra il CEDAD ed il Dipartimento di Beni delle Arti e della Storia dell'Università del Salento sono state sottoposte ad analisi alcune parti di sculture che sono state datate con il metodo del radiocarbonio e analizzate con le tecniche IBA del CEDAD. Come esempio si riporta lo studio su un particolare della statua di "San Francesco", il cui autore è ignoto, conservata nella Chiesa di Santa Chiara a Lecce. Scopo delle analisi era quello di ottenere informazioni sulla composizione elementare dei pigmenti pittorici originali e sullo strato sottostante i pigmenti e determinare l'epoca della realizzazione. Sulla mano della statua raffigurante "San Francesco" (Figura 3), caratterizzata dalla presenza di stigmate sono state effettuate due analisi.



Figura 3. Mano della statua di "San Francesco"

Una prima analisi è stata effettuata all'interno della stigmate per avere informazioni sul pigmento utilizzato per riprodurre il sangue. Lo spettro dei raggi X mostra oltre alle righe del piombo, quelle del mercurio, elemento chimico presente nel rosso cinabro (Figura 4a). Inoltre, un punto di analisi in una zona particolarmente abrasa ha evidenziato la presenza di biacca utilizzata per l'incarnato (Figura 4b).

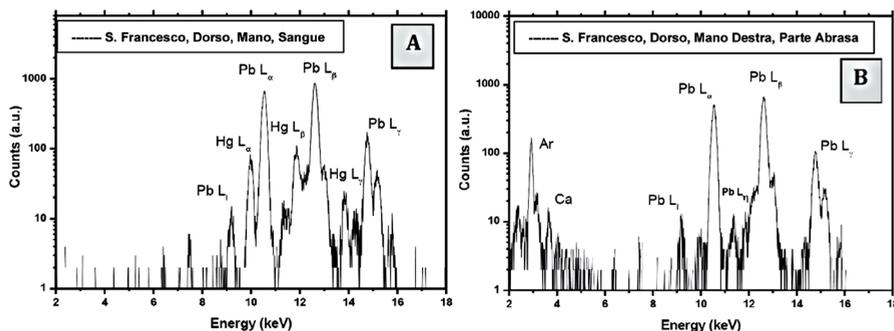


Figura 4. Mano della statua di San Francesco (a) sangue, (b) incarnato

Le indagini effettuate in vari punti della mano hanno consentito di acquisire informazioni sugli elementi utilizzati per i pigmenti nello strato pittorico originale (soprattutto bianco di piombo e cinabro per i rossi e gli incarnati); Nelle zone abrase si è rilevata la presenza di elementi, quali titanio, zinco da attribuire, probabilmente, a moderni interventi di restauro e l'uso di diossido di titanio, ossido di zinco per il bianco; la presenza delle righe di emissione x del calcio potrebbe indicare l'uso di stucco a base di gesso per il restauro. Nel caso dei campioni analizzati, infine, data l'elevata intensità delle righe del piombo (e la sovrapposizione della riga $M_{\alpha 1}$ del piombo a 2.345 keV con la riga K_{α} dello zolfo a 2.307 keV) non è stato possibile discriminare univocamente la presenza dello zolfo e ottenere, quindi, informazioni univoche e conclusive circa l'esistenza di una preparazione originale a base di gesso. La datazione al radiocarbonio è stata effettuata prelevando alcuni minuscoli frammenti di legno dalla statua di S. Francesco D'Assisi. L'utilizzo della tecnica di datazione mediante AMS ha consentito di ridurre a 10-20 mg la quantità di legno prelevata riducendo al minimo la distruttività delle analisi. I risultati delle datazioni sono riportati in Figura 5.

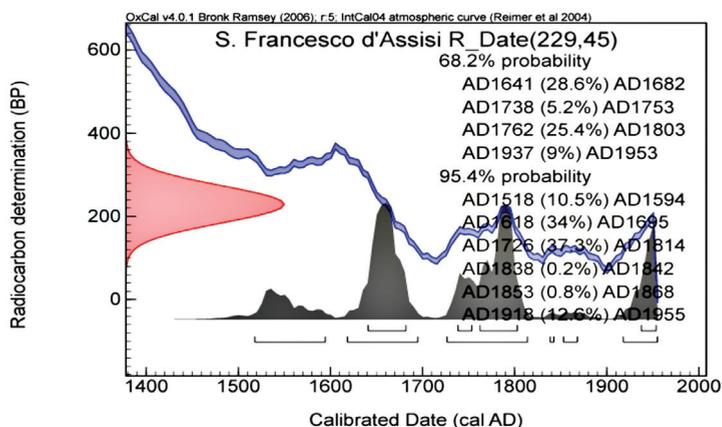


Figura 5. Risultati della datazione con il radiocarbonio effettuata sulla mano di San Francesco

6.b La datazione della Lupa Capitolina

La Lupa Capitolina è una statua bronzea simbolo di Roma conosciuta in tutto il mondo e conservata ai Musei Capitolini di Roma. Storicamente è stata attribuita all'epoca etrusca (V sec. a.C.). Ha un notevole valore simbolico e culturale perché si fa risalire la sua realizzazione alla leggendaria nascita di Roma. La Lupa Capitolina allatta i due gemelli Romolo e Remo, figli di Rea Silvia e del dio Marte. La leggenda narra che i due gemelli abbandonati sul fiume Tevere furono poi salvati e allattati dalla lupa. I due gemelli posizionati sotto la Lupa Capitolina in realtà sono stati aggiunti nel XV secolo forse dal Pollaiuolo.



Figura 6. La Lupa Capitolina durante le indagini dei ricercatori del CEDAD

I dubbi sulla realizzazione della statua in bronzo in epoca etrusca erano stati avanzati anche nell'Ottocento da vari ricercatori. Il restauro del 1997-2000 voluto dalla direzione dei Musei Capitolini fu affidato ad Anna Maria Carruba [9]. La Lupa è stata realizzata con la tecnica della fusione a cera persa e contiene all'interno delle terre di fusione numerosi resti vegetali aggiunti, per conferire compattezza all'impasto e per facilitare l'espulsione dei fumi durante il trattamento ad alta temperatura. Numerosi sono stati nel corso degli anni i dibattiti e le giornate di studio sulla Lupa Capitolina organizzate per confutare la tesi di Maria Carruba sulla origine carolingia della Lupa [10].

Il CEDAD, contattato direttamente dalla direzione dei Musei Capitolini, ha effettuato uno studio sistematico per stabilire la cronologia assoluta della Lupa utilizzando l'acceleratore Tandetron.

Sono stati datati i materiali organici prelevati dalla Lupa dai quali è stato possibile stabilire l'epoca della sua realizzazione. Lo studio è durato quasi 5 anni e si è svolto in due fasi. Nella prima fase sono stati datati i materiali organici prelevati durante il restauro. Nella seconda fase, il Gruppo di Fisica Applicata dell'Università del Salento ha effettuato ulteriori prelievi con un endoscopio inserito dal foro centrale al di sotto della Lupa (Figura 7) e con strumentazione appositamente realizzata.



Figura 7. Le fasi di prelievo delle terre di fusione dal foro sotto la pancia della Lupa Capitolina

I resti vegetali trovati nella Lupa Capitolina appartengono alla categoria di piante C3, vale a dire durante la fotosintesi gli atomi di carbonio formano catene di 3 atomi. Indagini paleobotaniche effettuate presso L'Università di Roma "La Sapienza" dalla dott.ssa Alessandra Celant hanno consentito di evidenziare la presenza di cariossidi di cereali e paglia di grano (Figura 8 a e b).

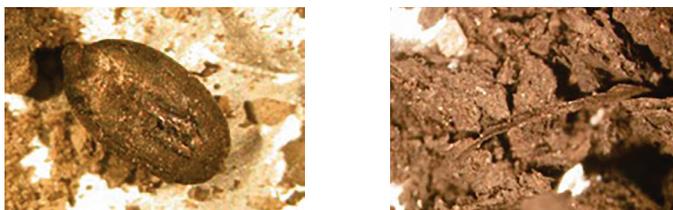


Figura 8. (a) cariossidi, (b) resti vegetali

Sorvolando sulle polemiche che miravano ad oscurare i risultati dei ricercatori del CEDAD, la datazione con il radiocarbonio mediante la tecnica AMS ha consentito di stabilire definitivamente che la Lupa Capitolina è stata realizzata nel Medioevo. In particolare la media dei risultati delle 28 datazioni effettuate prelevando da numerose parti interne, dalla testa alla coda, i resti vegetali hanno portato a stabilire la cronologia assoluta della Lupa tra il 1021 e il 1153 con un livello di confidenza del 95.4%. Pertanto la realizzazione della Lupa è di circa 17 secoli più recente rispetto alla datazione erroneamente effettuata sulla base di considerazioni storiche e stilistiche.

6.c Indagini AMS-IBA sui Bronzi di Riace

I Bronzi di Riace sono due famosissimi capolavori di notevole importanza per la Storia dell'Arte. Furono trovati al largo delle coste di Riace in Calabria nel 1972. La datazione del "Vecchio" è attribuita archeologicamente tra il 470 e il 460 a.C, mentre la seconda statua, il "Giovane" è datata archeologicamente tra il 440 e il 430 a.C.

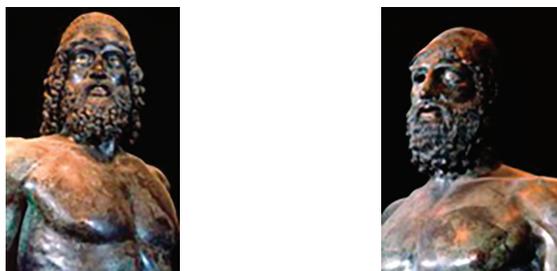


Figura 9. I Bronzi di Riace, (a) il giovane, (b) il vecchio

Dopo la scoperta i Bronzi di Riace sono stati restaurati prima a Firenze e poi a Roma presso l'Istituto Centrale del Restauro. Allo scopo di procedere alla determinazione assoluta della datazione dei Bronzi con il metodo del Radiocarbonio, con la tecnica della spettroscopia di massa con acceleratore del CEDAD, sono stati estratti dalle terre di fusione dei due bronzi numerosi campioni organici. Nelle terre di fusione dei Bronzi sono stati trovati frammenti di legno, resti vegetali, carboni e peli di animali (Figura 10).

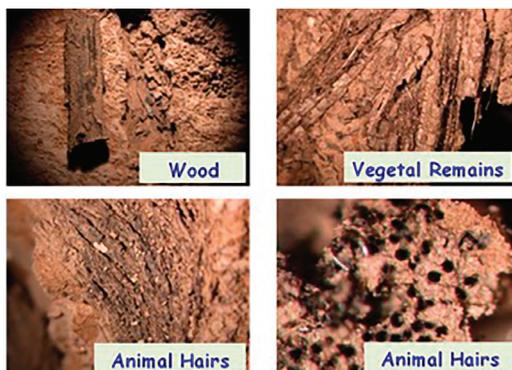


Figura 10. I resti vegetali ritrovati nelle terre di fusione dei Bronzi di Riace

Sono stati datati 13 campioni per la statua A e 12 per la statua B e la datazione combinata di tutti i risultati ha consentito di attribuire la statua A al 512-398 e la statua B al 510-400 a.C, età calibrata in anni con un intervallo di confidenza del 95.4%. I risultati delle datazioni con il radiocarbonio sono pertanto consistenti con quelle archeologiche.

Al CEDAD sono stati inoltre sottoposti ad analisi 9 campioni dalla statua A e 13 da quella B con le tecniche IBA trovando nei vari campioni vari elementi Cl, K Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Y, Zr, Pb con la tecnica PIXE e F, Na, Al, Si con la tecnica PIGE. La concentrazione di SiO_2 , Sr, e S è riportata nella figura 11 dalla quale è stato possibile anche confermare l'ipotesi che il braccio destro della statua B è stato restaurato o sostituito, come si evince dalla significativa composizione rispetto alle terre di fusione dell'intera statua B.

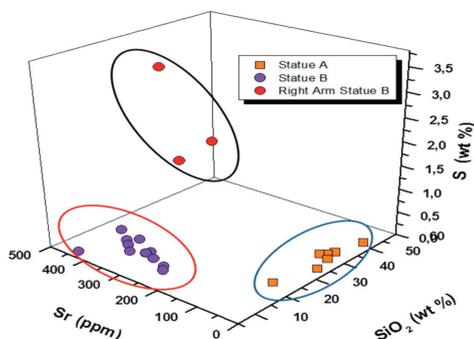


Figura 11. Plot tridimensionale Sr, S e SiO_2 . È evidente la diversa composizione delle terre di fusione delle statue A e B e del braccio della statua B

7. Progetto IT@CHA: Tecnologie Italiane per Applicazioni Avanzate ai Beni Culturali

Una notevole innovazione tecnologica è in progress al CEDAD grazie al Progetto IT@CHA (Italian Technologies for Advanced applications in Cultural Heritage Assets). Si tratta di un progetto di ricerca industriale per lo sviluppo di tecnologie innovative italiane a supporto dei beni culturali coordinato dal Consorzio CETMA al quale partecipano l'Università del Salento e il CEDAD, l'Università di Palermo, l'Università della Calabria e numerosi partners industriali. Relativamente alla datazione con il radiocarbonio mediante spettrometria di massa con acceleratore al CEDAD è in corso di realizzazione un sorgente ionica a gas in grado di effettuare la datazione direttamente su campioni gassosi. Solitamente la datazione mediante AMS viene effettuata una volta che il campione ha subito vari trattamenti fisici e chimici su campioni di grafite. Dal reperto si preleva una quantità estremamente ridotta di materiale che viene poi trattata fino alla produzione di CO_2 per acidificazione o combustione. Successivamente il campione viene ridotto in forma di grafite, pressato e inserito nella sorgente dell'acceleratore per la misura. Al CEDAD è possibile effettuare la datazione di materiali organici con un solo milligrammo carbonio presente nella grafite per misure di routine.

Il gruppo di Fisica Applicata del CEDAD nell'ambito del progetto IT@CHA sta ingegnerizzando una nuova sorgente ionica in grado di iniettare nell'acceleratore direttamente la CO_2 prodotta dal campione. Questo comporterà una notevole riduzione della quantità di materiale necessaria per la datazione. Misure preliminari hanno portato la quantità di carbonio necessaria per la datazione da 1 mg a 10 mg, vale a dire con una quantità cento volte inferiore a quella solitamente utilizzata per la datazione con acceleratore.

La nuova sorgente a gas connessa con l'acceleratore tandemron è interfacciata con uno spettrometro IRMS (Isotope Ratio Mass Spectrometry) in grado di misurare gli isotopi stabili del carbonio, il ^{12}C e il ^{13}C , direttamente sullo stesso gas. Il campione infatti viene prima inserito in un analizzatore elementare, combusto, e inviato sia allo spettrometro IRMS sia alla sorgente a gas connessa con l'acceleratore. Lo spettrometro IRMS misura gli effetti di frazionamento isotopico naturale e pertanto è in grado di verificare anche lo stato di contaminazione residua, se ce ne fosse, dalla misura del $\delta^{13}\text{C}$.

Nella sorgente ionica a gas, la CO_2 viene iniettata attraverso una siringa e un capillare su un target di Al provvisto di un inserto di Ti. Su quest'ultimo avviene un complicato fenomeno chimico-fisico che porta alla formazione del fascio di carbonio mediante sputtering con ioni Cs sulla superficie del Ti. La figura 12a mostra lo schema della sorgente ionica a gas interfacciata con lo spettrometro IRMS e lo schema (Figura 12b) del sistema di intrappolamento e iniezione del gas nella sorgente dell'acceleratore. Le figure 13 mostrano i dettagli della struttura interna della nuova sorgente a gas.

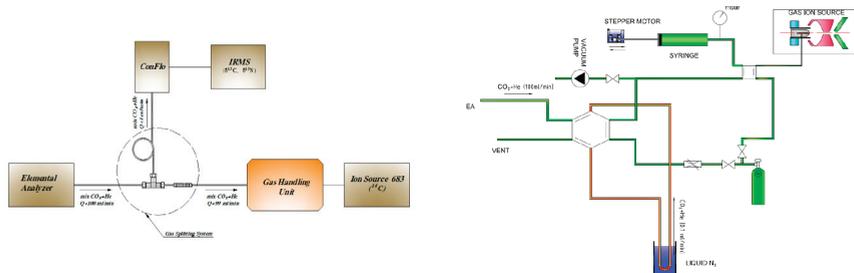


Figura 12. (a) Schema della sorgente a gas interfacciata con lo spettrometro IRMS e l'analizzatore EA, e (b) schema sistema di iniezione del gas mediante siringa nella sorgente a sputtering

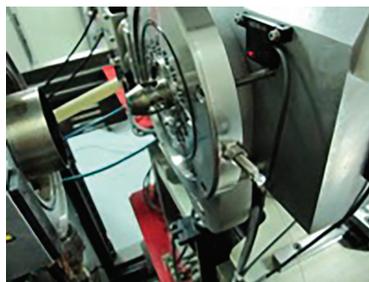
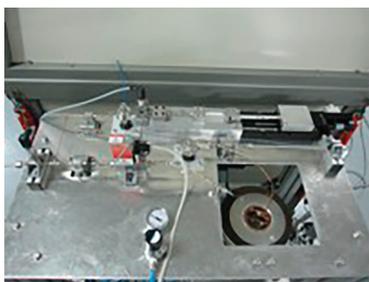


Figura 13. Particolari interni del sistema di iniezione nella nuova sorgente a gas

Ringraziamenti

Si ringraziano Gianluca Quarta e Marisa D'Elia per le datazioni con il radiocarbonio e la preparazione dei campioni e Raffaele Casciaro per il particolare della statua di San Francesco.

Note biografiche

Lucio Calcagnile è Professore Ordinario di Fisica Applicata presso l'Università del Salento, Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, dal 2005.

La sua attività di ricerca riguarda lo studio dell'interazione ioni-materia, lo sviluppo e le applicazioni di tecniche nucleari non distruttive di datazione e analisi dei materiali, la spettrometria di massa con acceleratore, le applicazioni degli isotopi cosmogenici all'archeologia, geologia, scienze ambientali, scienze forensi.

Ha svolto attività di ricerca presso i laboratori Nazionali di Fisica Nucleare di Legnaro, il FOM Institute for Atomic and Molecular Physics di Amsterdam, il Laboratorio tandemron di Gif sur Yvette, il Laboratorio AGLAE-CNR di Parigi, il Leibniz Labor di Kiel.

Nel 1999 è stato incaricato di realizzare il CEDAD, il primo Centro italiano per la ricerca e il servizio datazione con il radiocarbonio, che attualmente dirige.

Ha tenuto numerose relazioni su invito a Scuole e Conferenze in Italia, in Francia, Belgio, Malta, Egitto, Olanda, Australia, USA. È stato Chairman di workshop internazionali e co-chairman della 11th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, tenutasi a Roma dal 14 al 19 settembre 2008. È membro dell'Advisory committees delle Conferenze internazionali tra cui Radiocarbon e AMS. È autore di oltre 100 pubblicazioni su riviste internazionali.