



Il progetto ANCIENT CHARM e l'uso dei neutroni nell'ambito dei beni culturali

Enrico Perelli Cippo and the ANCIENT CHARM Collaboration

*Dipartimento di Fisica "Giuseppe Occhialini", Università degli Studi di
Milano-BICOCCA*

ANCIENT CHARM è un progetto finanziato dalla Unione Europea nell'ambito del programma NEST (*New and Emerging Science and Technology*)



Analysis by
Neutron Resonant
Capture
Imaging and other
Emerging
Neutron
Techniques: new

Cultural
Heritage and
Archaeological
Research
Methods



ANCIENT CHARM è un progetto finanziato dalla Unione Europea nell'ambito del programma NEST (*New and Emerging Science and Technology*)

<http://ancient-charm.neutron-eu.net/ach>

Partner	Country
Università degli Studi di Milano-Bicocca	Italy
Università degli Studi di Roma Tor Vergata	Italy
Leiden University	the Netherlands
Hungarian National Museum	Hungary
Universität Bonn	Germany
Technical University Delft	the Netherlands
Institute of Isotopes – Chemical Research Centre	Hungary
Universität Köln	Germany
Central Laboratory of the Research Councils	United Kingdom
EC - JRC - IRMM	Belgium

ANCIENT CHARM è un progetto finanziato dalla Unione Europea nell'ambito del programma NEST (*New and Emerging Science and Technology*)

<http://ancient-charm.neutron-eu.net/ach>

Scopo del progetto è di coniugare “*Neutron resonant Capture Imaging and other Emerging Neutron Techniques....*” per l'analisi non distruttiva di campioni nell'ambito dei beni culturali

- tecniche completamente non-distruttive, non-invasive
- preparazione del campione non necessaria
- element-sensitive
- possibilità di fornire immagini (2D e 3D)

Il neutrone.....chi era costui?

n

$$m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \approx 1 \text{ amu}$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E = \hbar^2 k^2 / 2m$$

$$q = 0$$

γ

$$m = 0$$

$$E = h\nu$$

$$E = kc$$

$$q = 0$$

Il neutrone....chi era costui?

n

$$m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \approx 1 \text{ amu}$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E = \hbar^2 k^2 / 2m$$

$$q = 0$$

Interagisce con la materia in
maniera essenzialmente
NUCLEARE

σ dipende da E_n , E_a , s ecc.

X

$$m = 0$$

$$E = h\nu$$

$$E = kc$$

$$q = 0$$

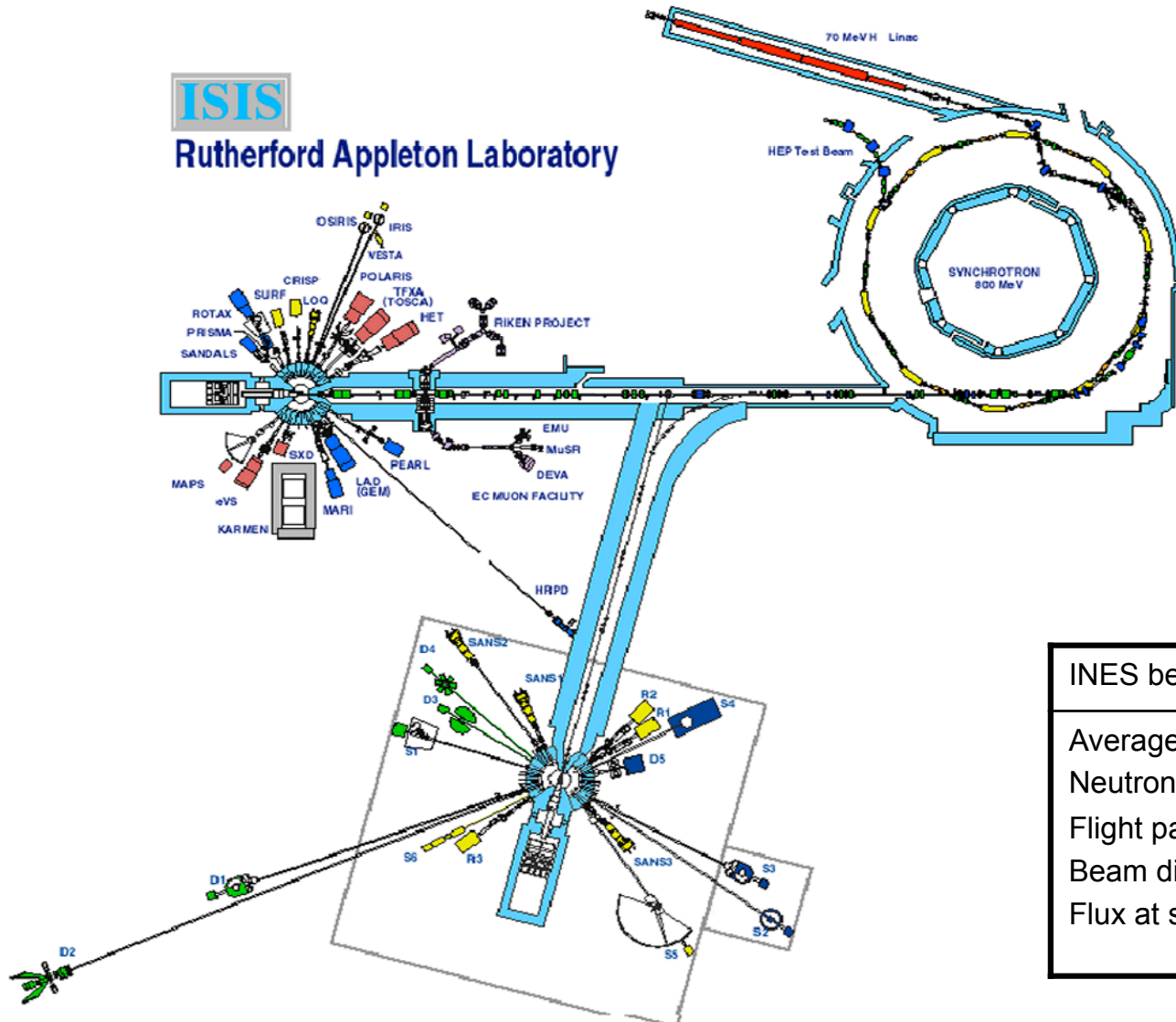
Interagisce con la materia in
maniera essenzialmente
ELETTROMAGNETICA

$$\sigma \sim Z^2$$

Il neutrone....chi era costui?

ISIS

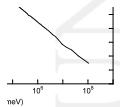
Rutherford Appleton Laboratory



INES beamline at the ISIS spallation source

Average current	150 – 180 μA (p)
Neutron pulse width	300 ns
Flight path length	23.0 m
Beam dimensions	50 x 50 mm
Flux at sample pos.	10^3 n/eV s cm^2 at 10 eV

Il neutrone.....chi era costui?



UNIVERSITA' DEGLI STUDI
DI MILANO
BICOCCA



INES beamline at the ISIS spallation source	
Average current	150 – 180 μA (p)
Neutron pulse width	300 ns
Flight path length	23.0 m
Beam dimensions	50 x 50 mm
Flux at sample pos.	10^3 n/eV s cm^2 at 10 eV

Il neutrone....chi era costui?

I fenomeni cui può essere soggetto il neutrone durante la sua interazione col campione sono:

1) diffusione

$$S(Q, \omega) = \frac{k_0}{k_1} \frac{4\pi}{\sigma_{tot}} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E_1}$$

2) assorbimento

$$I(z) = I_0 e^{-N\sigma_{ass}z}$$

La sezione d'urto di assorbimento variano da elemento ad elemento e da isotopo ad isotopo.



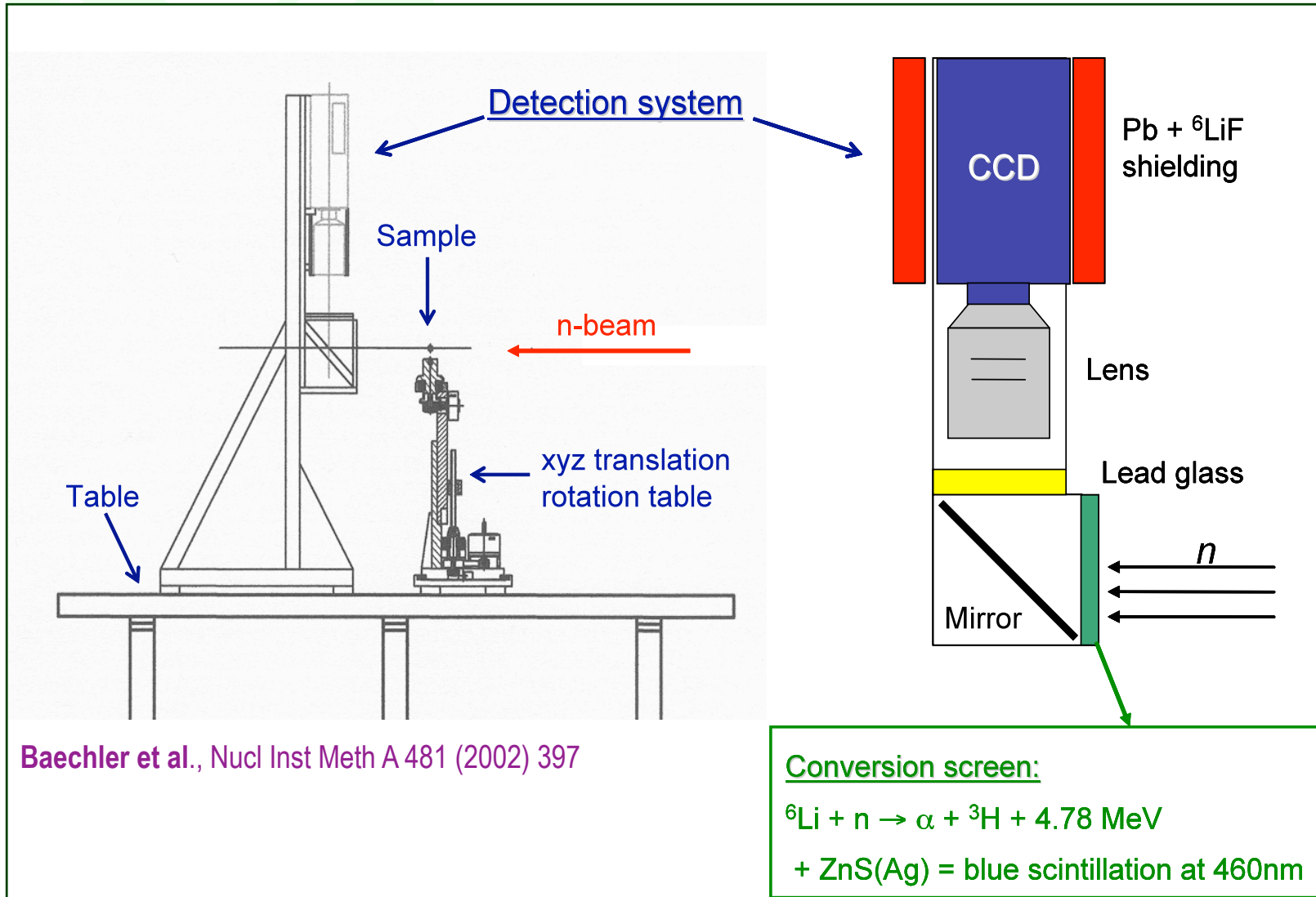
σ (barns)



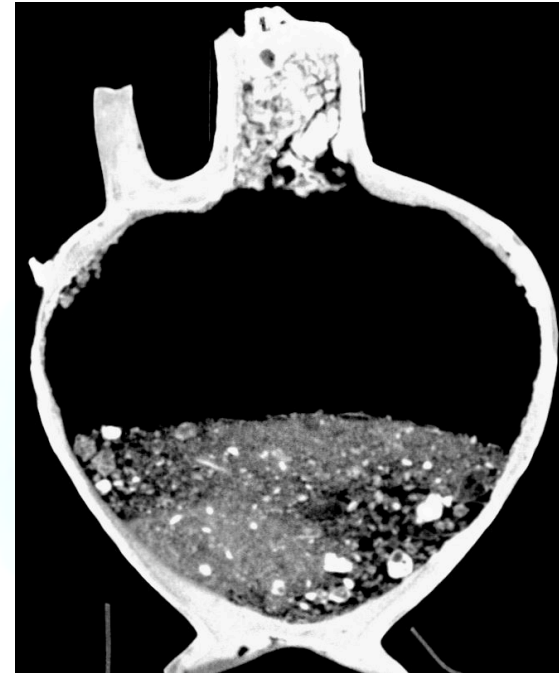
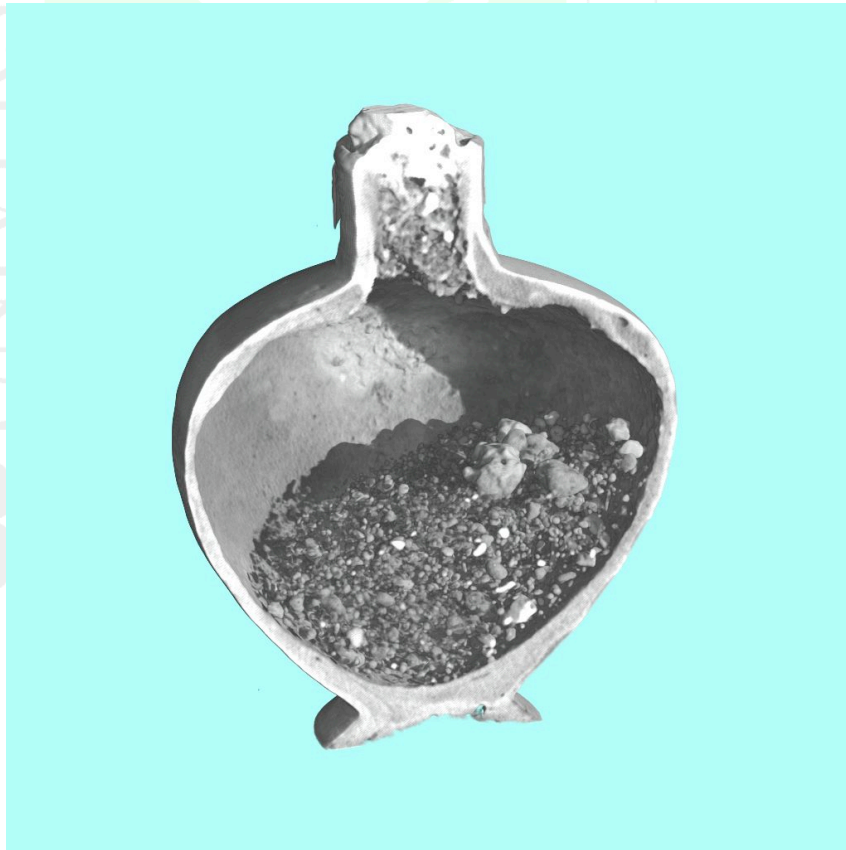
Tomografia neutronica (NT)

ANTARES beamline (FRM-II, Garching bei Munchen, RFT)

NT station (PSI, Villigen, CH)

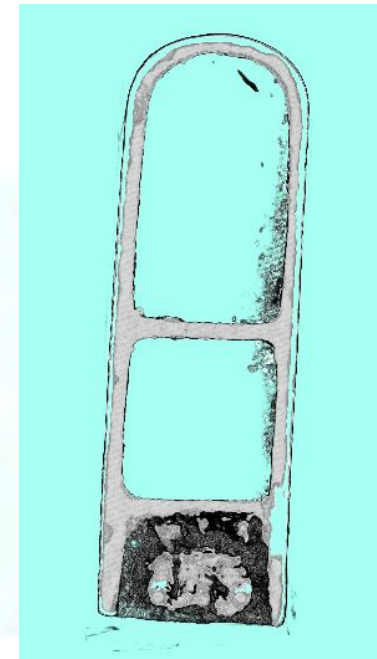
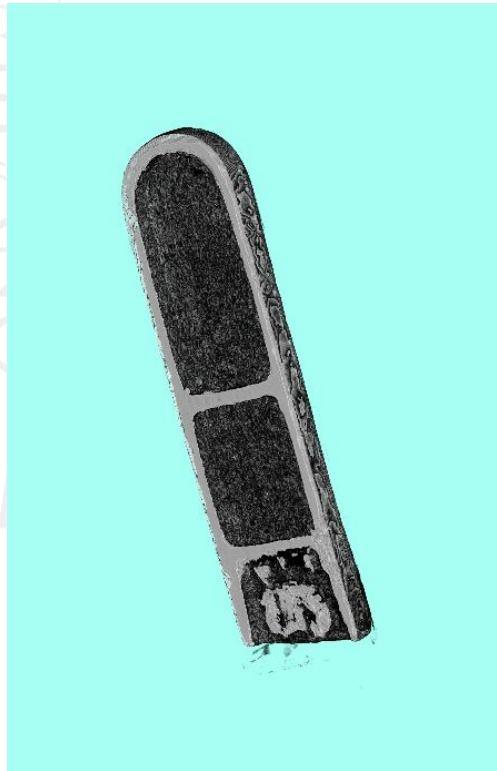
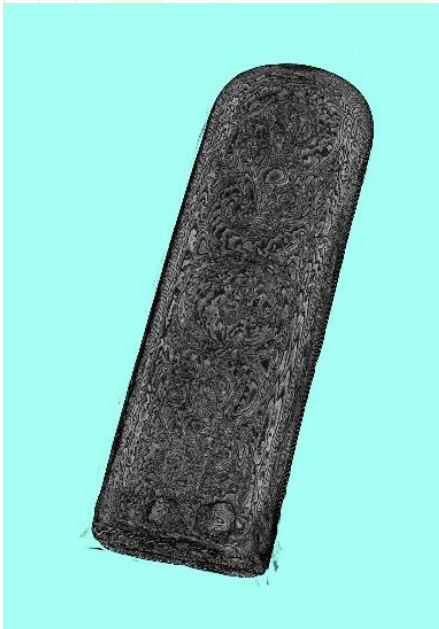


Tomografia neutronica (NT)



Aryballos etrusco in stile corinzio, V secolo a. C. (Civiche raccolte archeologiche di Milano).

Tomografia neutronica (NT)



Puntale di cintura longobardo in bronzo, VII sec. d. C. (Civiche raccolte archeologiche di Milano).

Tomografia neutronica (NT)

Vantaggi:

- completamente non-distruttiva, non-invasiva
- preparazione del campione non necessaria
- fornisce immagini 3D

Limitazioni:

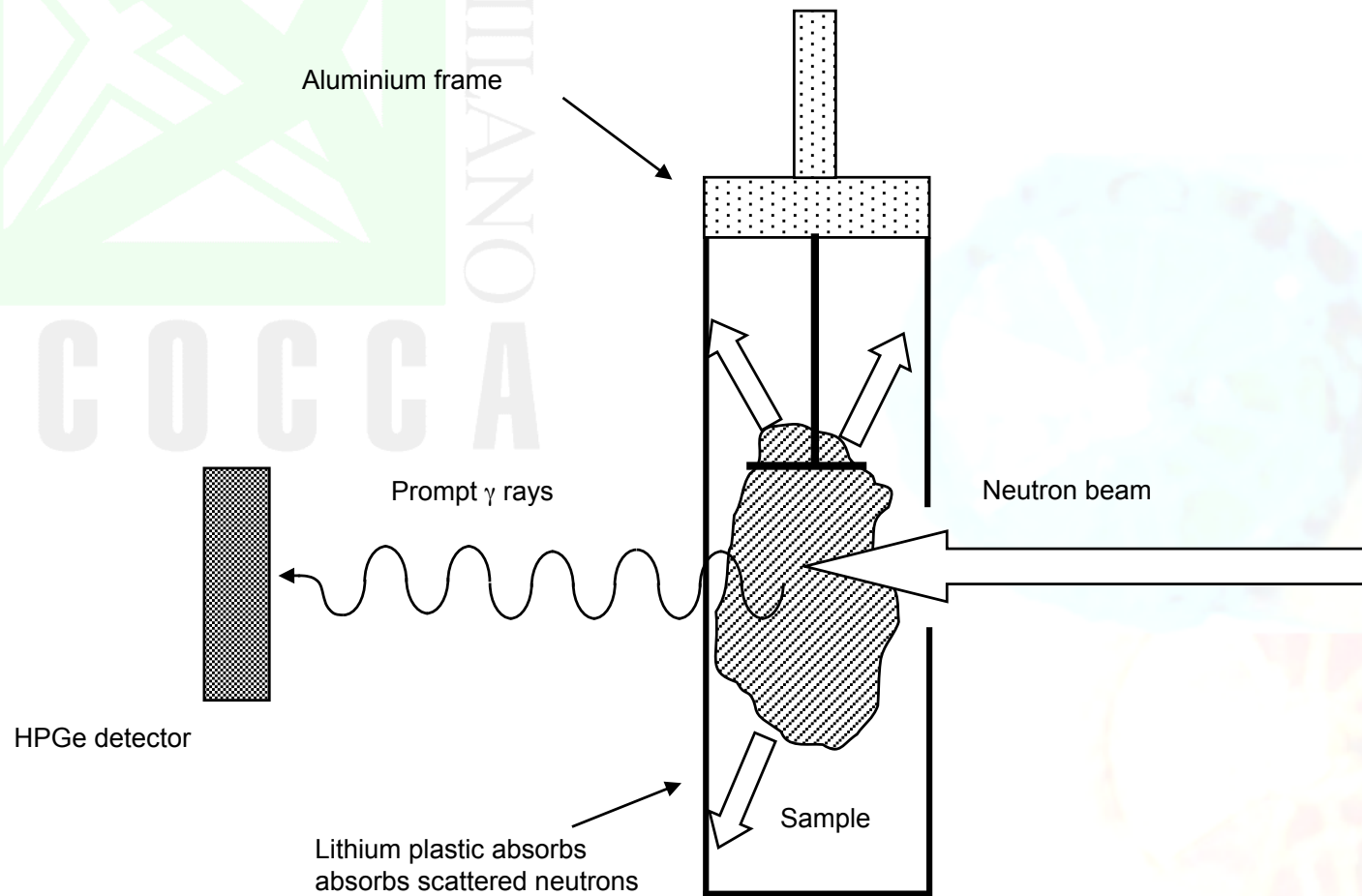
- element-insensitive



Prompt gamma activation analysis (PGAA)

PGAA station (IKI, Budapest, Hu)

PGAA station (FRM-II, Garching bei Munchen, RFT)



Prompt gamma activation analysis (PGAA)



Ascia calcolitica, IV millennio a. C.

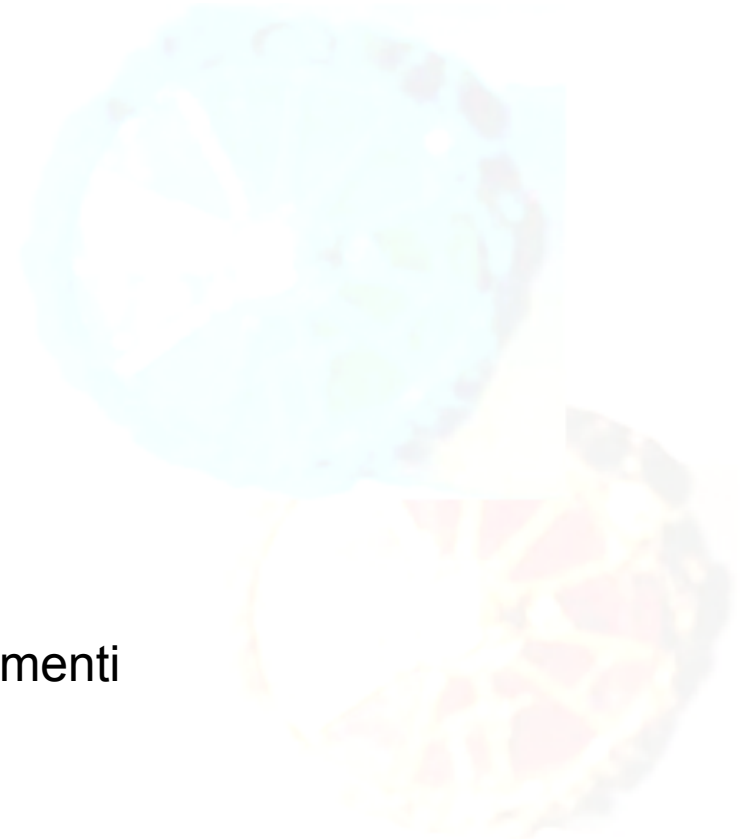
Prompt gamma activation analysis (PGAA)

Vantaggi:

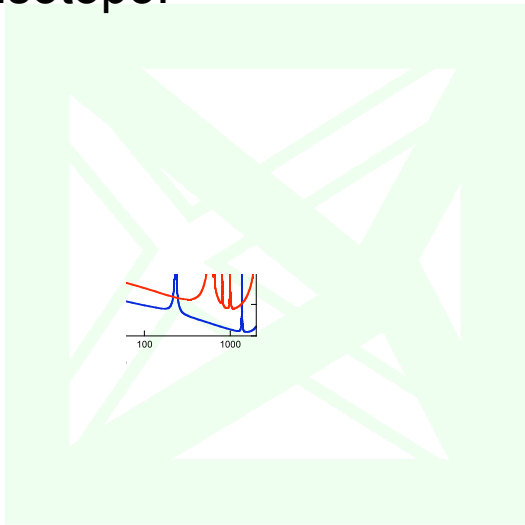
- completamente non-distruttiva, non-invasiva
- preparazione del campione non necessaria
- element-sensitive

Limitazioni:

- misura di bulk
- quantitativa solo per un limitato numero di elementi
- insensibile ad alcuni elementi



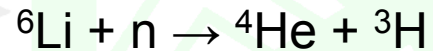
Le risonanze di assorbimento variano da elemento ad elemento e da isotopo ad isotopo.



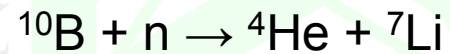
σ (barns)



Rivelazione di neutroni



Q value = 4.78 MeV



Q value = 2.3 MeV

L' energia depositata si converte in luce (scintillatori), eccesso di carica (semiconduttori) ecc.

L' intero processo è dominato dal Q value della reazione

E' impossibile fare spettroscopia diretta dei neutroni nel range termico/epietermico.

Tecnica del tempo di volo (TOF)

Per neutroni non-relativistici

$$E = \frac{1}{2} m(L/t)^2$$

$$E(\text{eV}) = 5.227 (L(\text{m})/t(\mu\text{s}))^2$$

Risoluzione temporale:

ISIS DAE-II: 62.5 ns

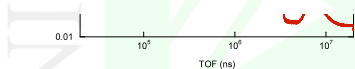
ANCIENT CHARM CAEN set-up: 10 ns

Stabili fino a circa 1 MHz

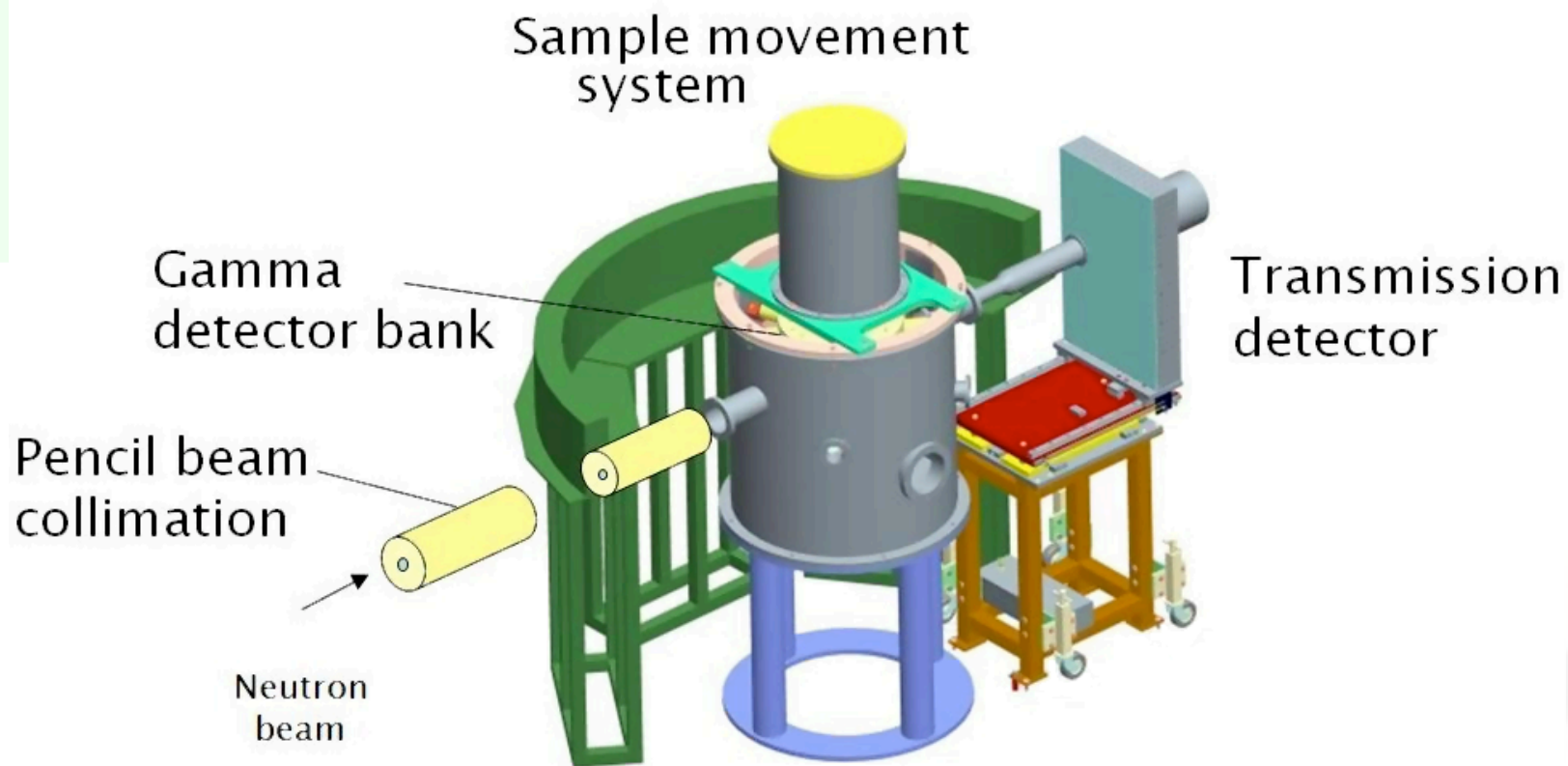


Tecnica del tempo di volo (TOF)

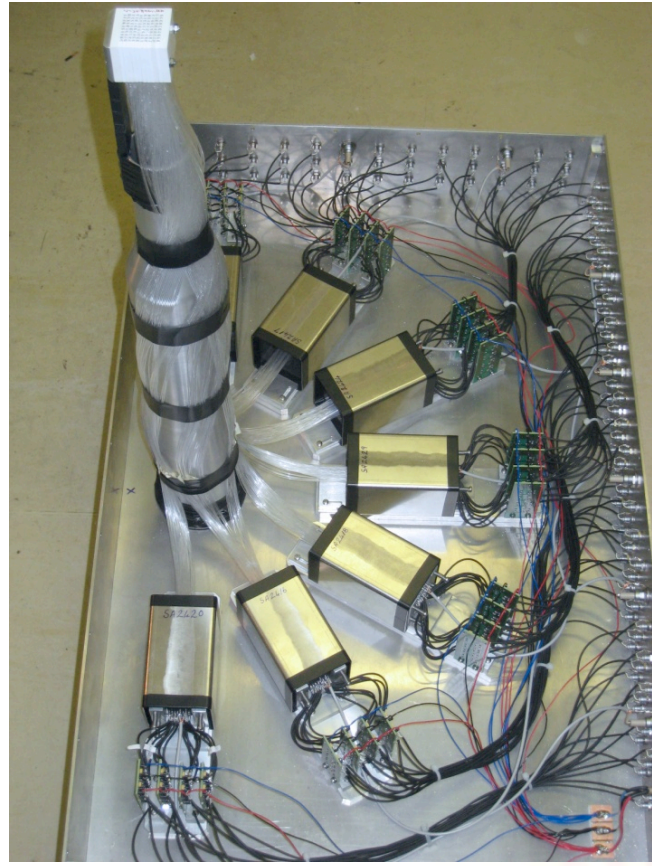
Spettro TOF in trasmissione di un campione di riferimento rame + cadmio



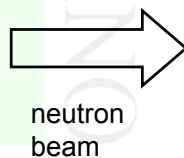
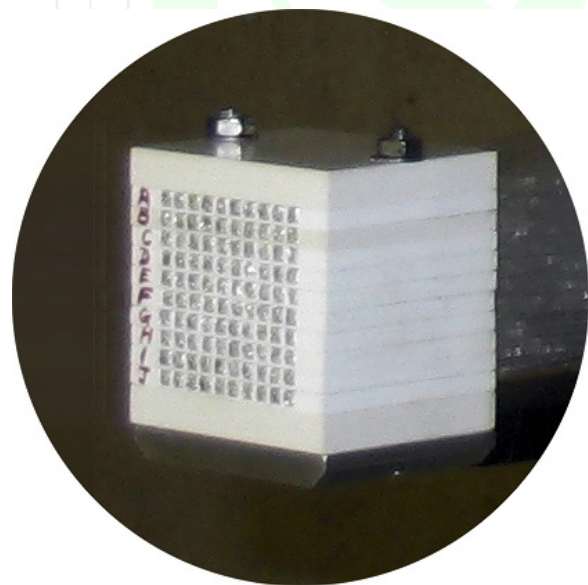
Il set-up di ANCIENT CHARM presso la beamline INES



Il rivelatore in trasmissione (PSND)

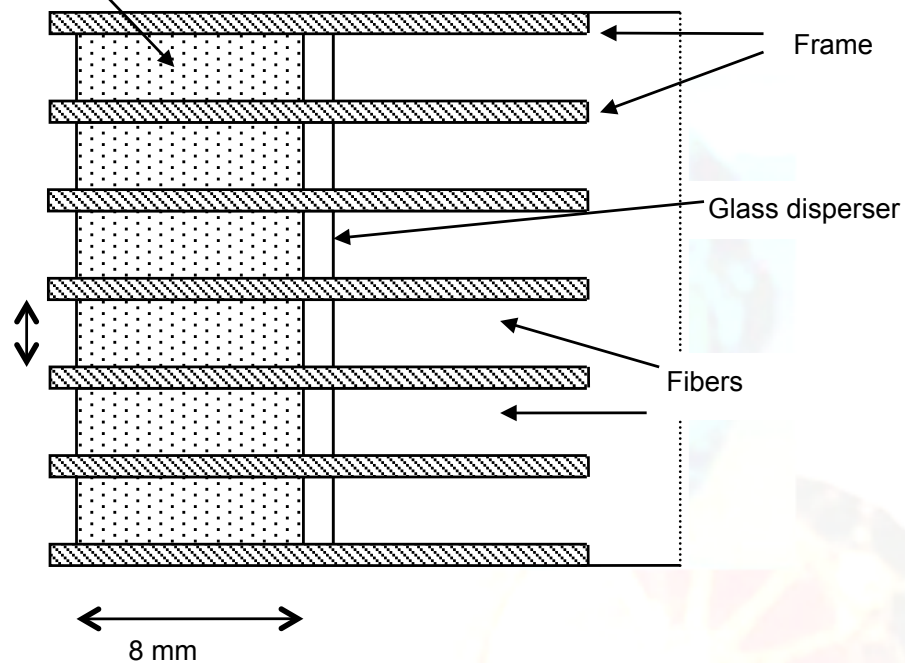


Il rivelatore in trasmissione (PSND)



GS20 Pixel

2 mm



PSND

10 x 10 GS20 Li-enriched scintillator pixels

25% efficiency at 10 eV

4 % efficiency at 1 keV

Neutron Resonance Transmission (NRT)

La quantità fisica misurata è il coefficiente di trasmissione:

$$T(E) = \frac{C_{in}}{C_{out}} = e^{-\sum_x n_x \sigma_{tot}(E)} R(E)$$



Neutron Resonance Transmission (NRT)

La quantità fisica misurata è il coefficiente di trasmissione :

$$T(E) = \frac{C_{in}}{C_{out}} = e^{-\sum_x n_x \sigma_{tot}(E)} R(E)$$

$$T_{exp}(t) = \frac{S_{in}(t) - B_{in}(t)}{S_{out}(t) - B_{out}(t)}$$

dove $S_{in, out}$ sono i segnali ottenuti dal campione e da una misura di flusso senza campione, e $B_{in, out}$ sono i livelli di background nei due casi. Questa espressione è valida per ogni valore di t (in e off-resonance).

Neutron Resonance Transmission (NRT)

Per calcolare S_{in} è importante operare una opportuna

- Dead time correction:

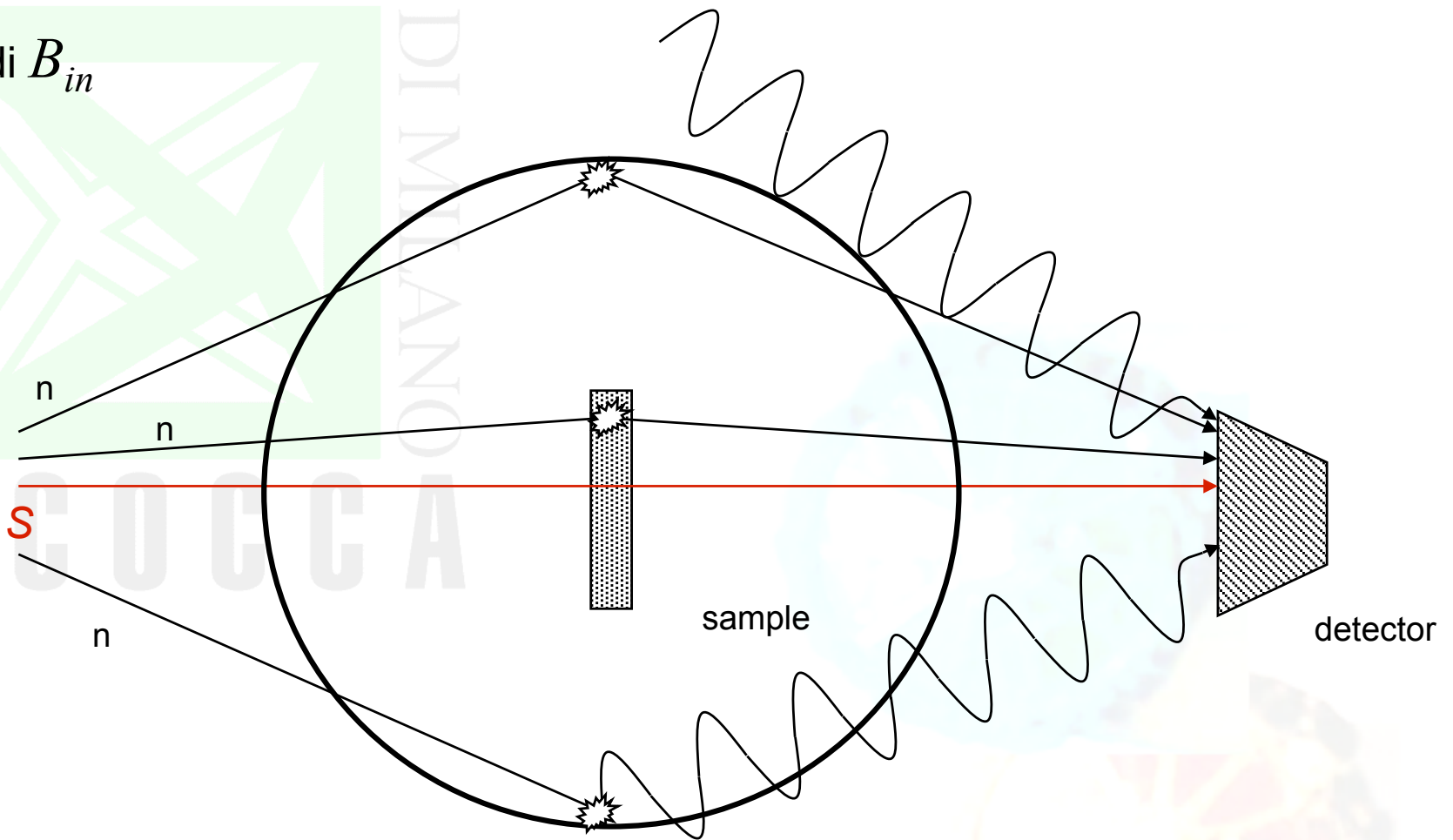
$$DTCF = \frac{C_o}{(1 - \beta_0)} ; \quad \beta_0 = \sum_{i=(2t-1)/2}^{((2t-1)/2)+\Delta t} N(t)$$

$$\Delta t \approx 275 \text{ ns}$$

M. S. Moore, "Rate dependence of counting losses in neutron time-of-flight measurements", *Nucl. Instr. Meth.* **169** 245 (1980)

Neutron Resonance Transmission (NRT)

Origine di B_{in}



Solo i neutroni direttamente associati al fascio e passanti attraverso il campione danno "Segnale".

Neutron Resonance Transmission (NRT)

Determinazione di B_{in}

Black resonance filters:

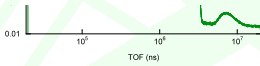
Bi	800 eV	59 μ s
Co	132 eV	150 μ s
W	19 eV	390 μ s
Ag	5 eV	750 μ s
Cd	0.5 eV	3000 μ s

Si tratta di isotopi che presentano risonanze di assorbimento così intense da avere una probabilità di assorbimento $\approx 100\%$ all'energia della risonanza

Neutron Resonance Transmission (NRT)

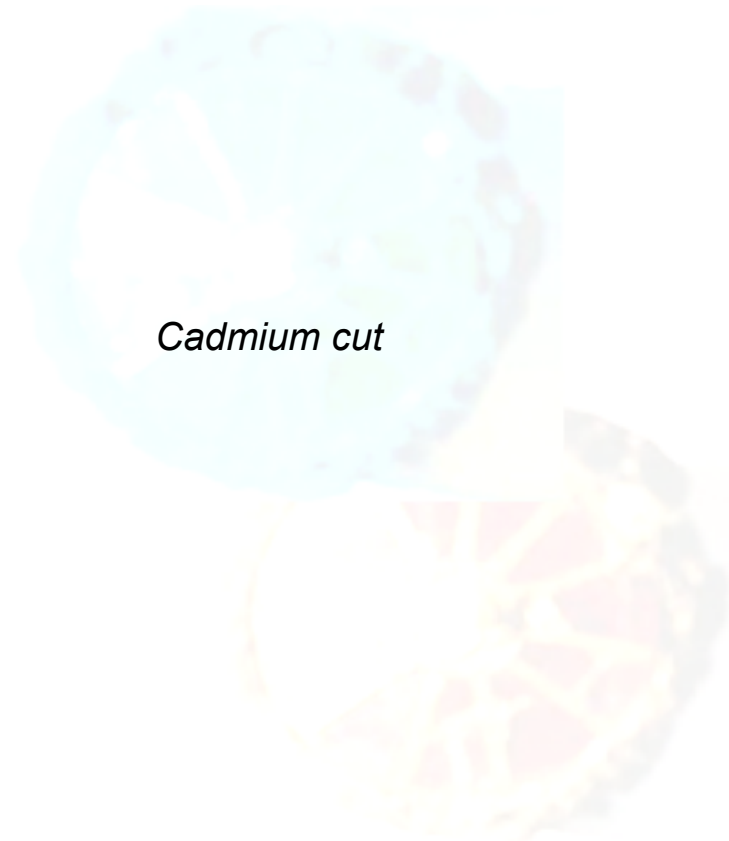
Determinazione di B_{in}

Spettro in trasmissione Sample-in + filtri



Black resonances

Cadmium cut



Neutron Resonance Transmission (NRT)

Determinazione di B_{in}

Livello stimato di fondo all'energia (tempo) caratteristica dei filtri



Background level

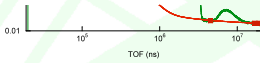


Neutron Resonance Transmission (NRT)

Determinazione di B_{in}

Stima del livello di fondo

$$a + b \exp(-ct) + d \exp(-et) + f t^g$$

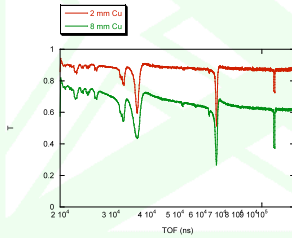


Background level



Neutron Resonance Transmission (NRT)

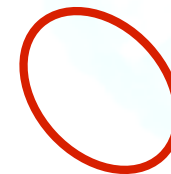
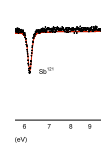
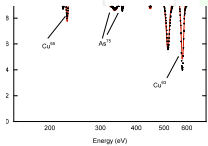
Coefficiente di trasmissione per campioni omogenei di rame



La tecnica **NRT** è particolarmente sensibile ad alcuni elementi, ad esempio **Ag**, Au, Sb, In, As



Ascia calcolitica, IV millennio a. C.



Approccio ideale all'analisi NRT: REFIT

REFIT è un codice di simulazione ed analisi di spettri di neutroni in trasmissione.

Vantaggi: completamente quantitativo

Calcola T in funzione dei parametri delle risonanze e fitta il miglior valore di n_x

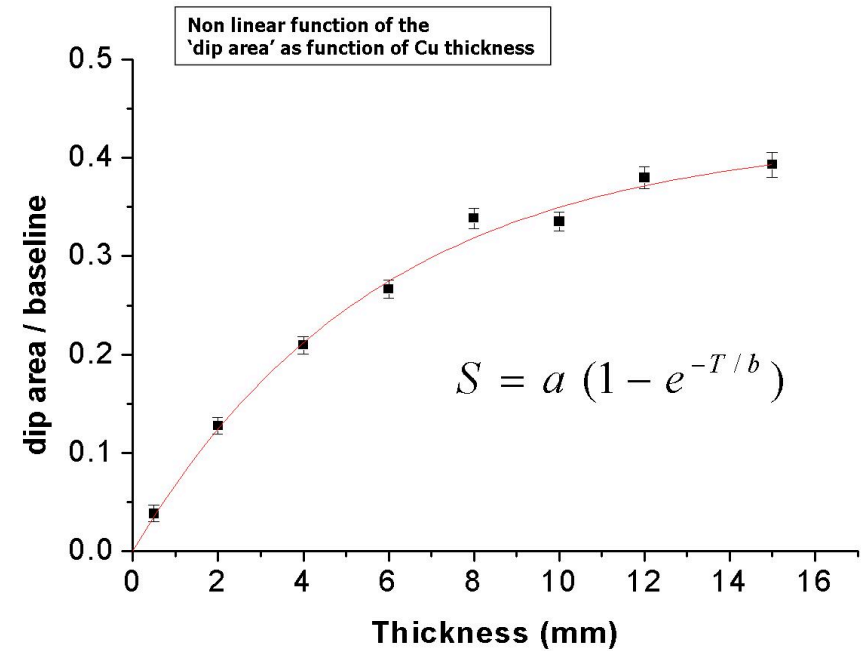
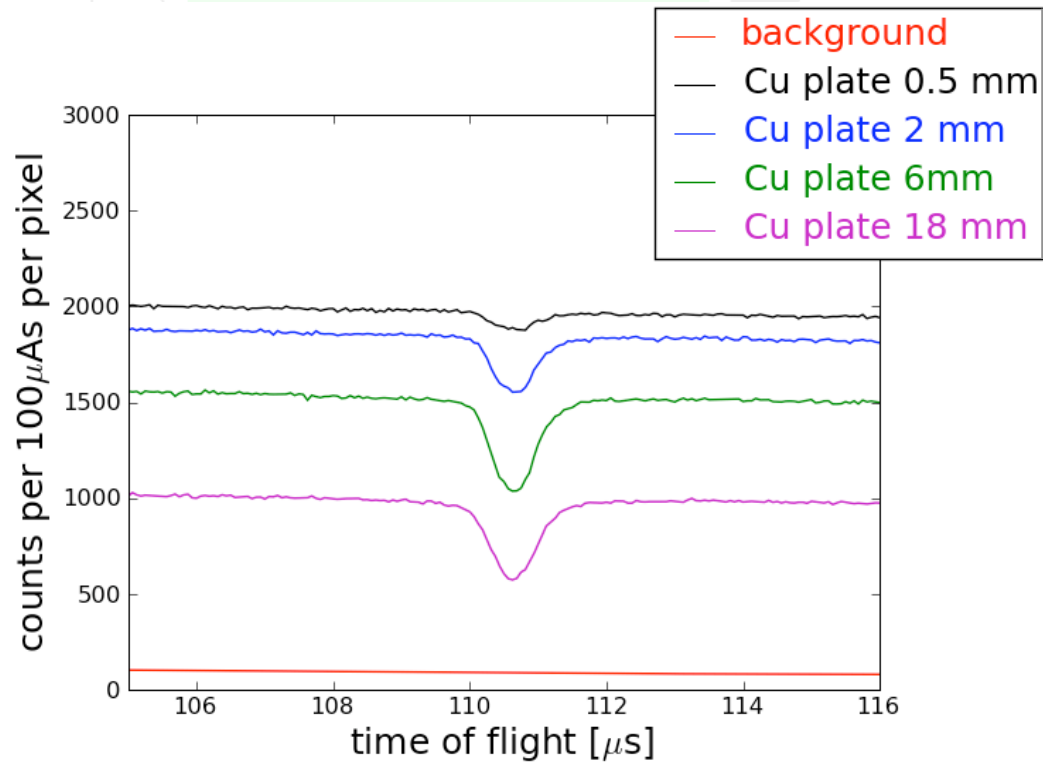
$$T(E) = \frac{C_{in}}{C_{out}} = e^{-\sum_x n_x \sigma_{tot}(E)} R(E)$$

Simula l'allargamento doppler delle risonanze

Simula la risoluzione delle misure

Limitazioni: molto lento (machine time & user time)

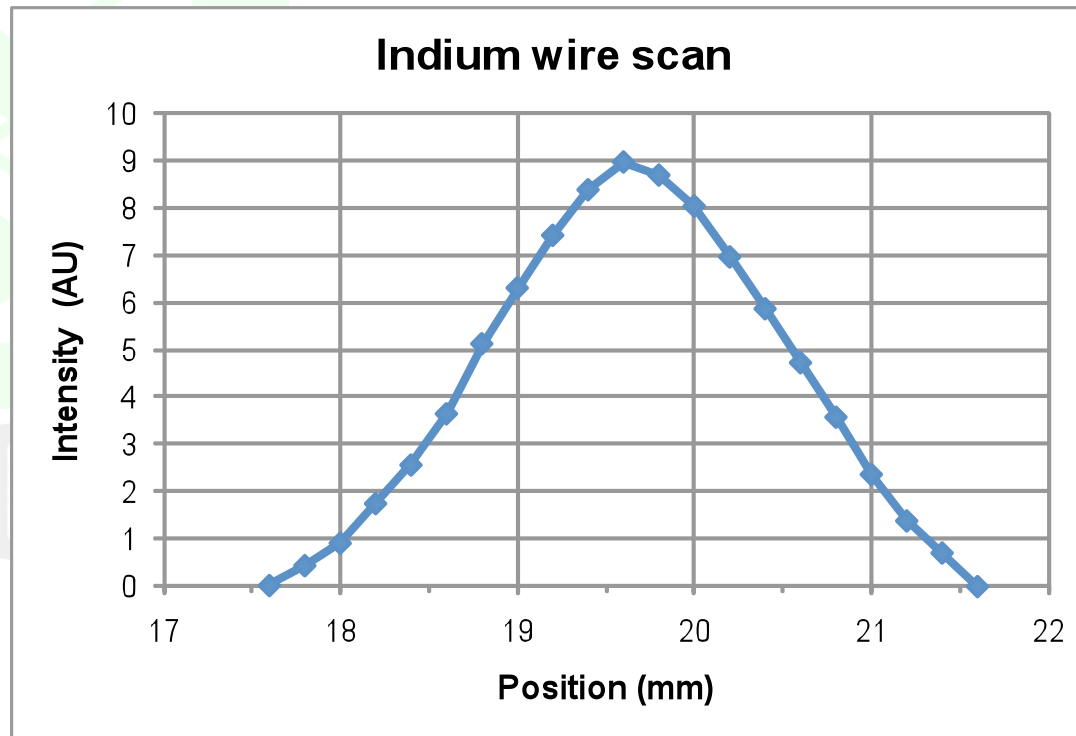
Approccio semplificato all'analisi NRT: area calibration



Il "database" di calibrazione comprende per il momento Cu, Ag, Sn, Zn, Fe, Au.

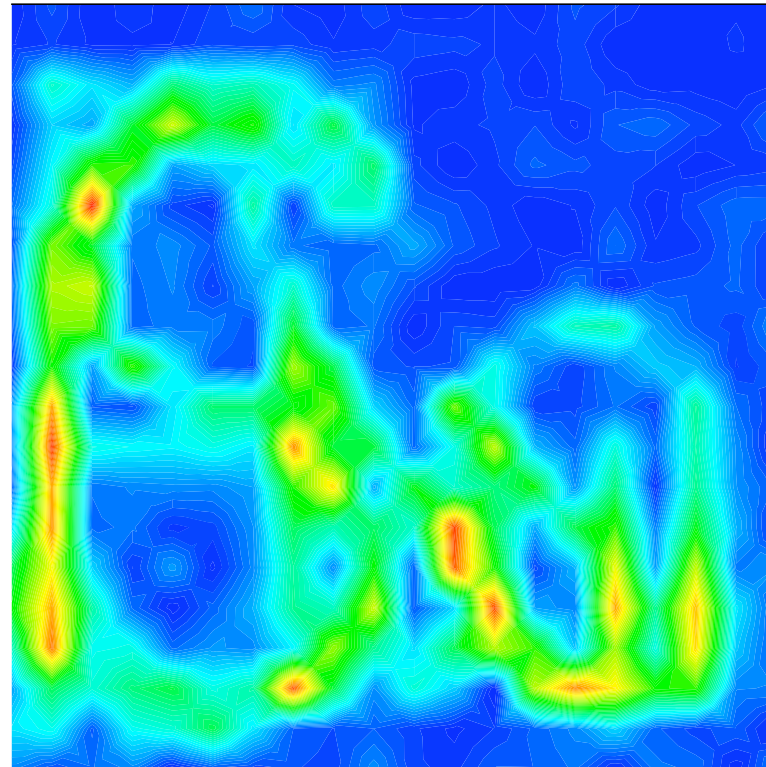
Limitazioni: solo semi-quantitativo.

Risoluzione spaziale in NRT



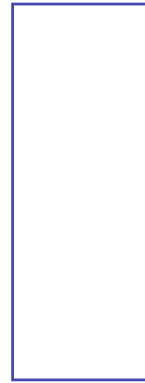
Confermata la risoluzione spaziale calcolata di 2 mm FWHM

Risoluzione spaziale in NRT



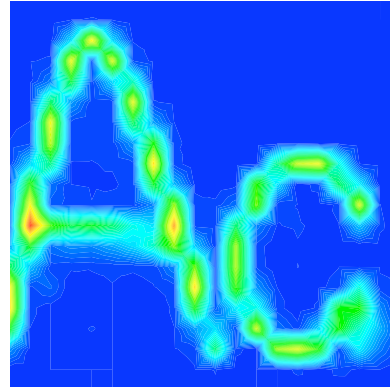
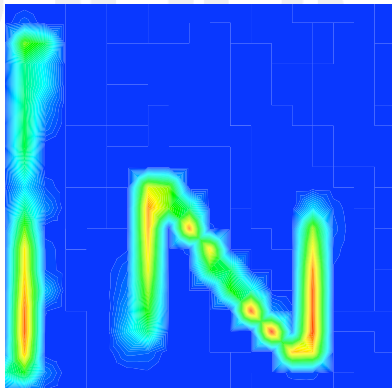
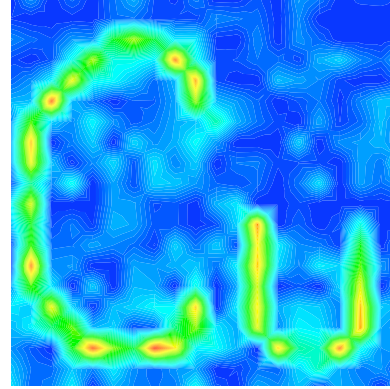
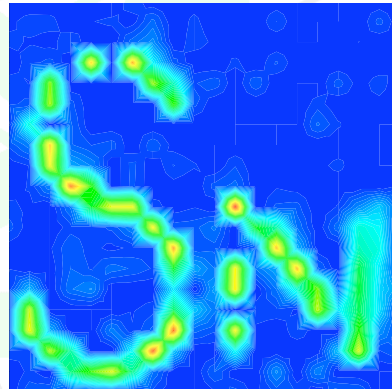
Una "scatola nera" contenente fili (1 mm) sovrapposti di diverso materiale, il tutto avvolto in un foglio metallico.....

Risoluzione spaziale in NRT



Una "scatola nera" contenente fili (1 mm) sovrapposti di diverso materiale, il tutto avvolto in un foglio metallico.....

Risoluzione spaziale in NRT



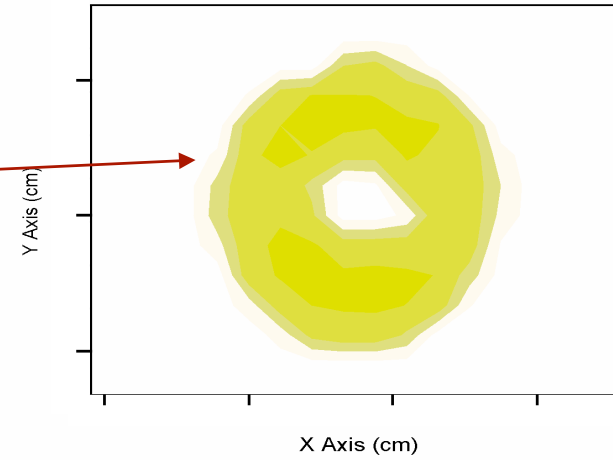
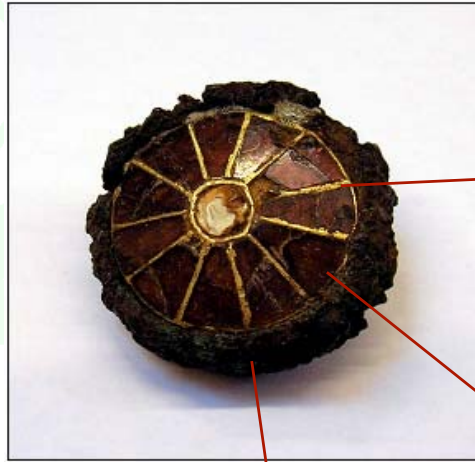
40 mm

..... può essere separata nelle sue componenti.

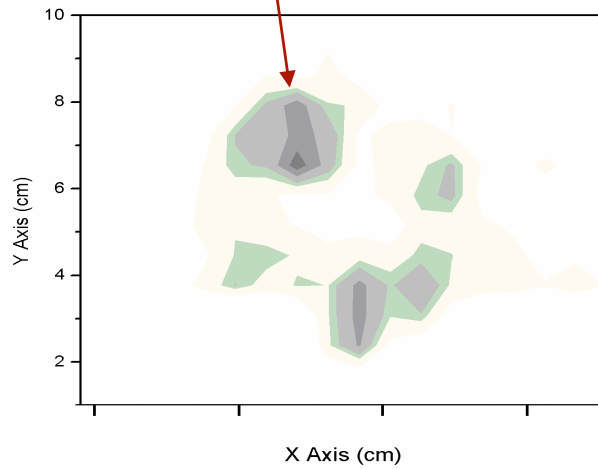
ELEMENT-SENSITIVE IMAGING

NRT element-sensitive imaging

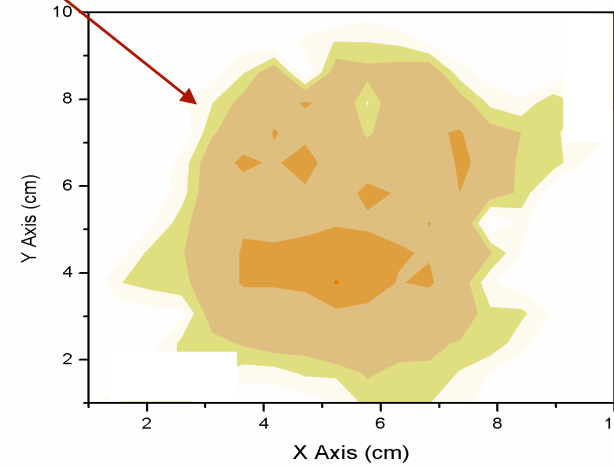
Fibula (fine VI, inizio VII sec. d. C. dal sito di Kölked-Feketekapu (Museo Nazionale Ungherese, Budapest)



Au



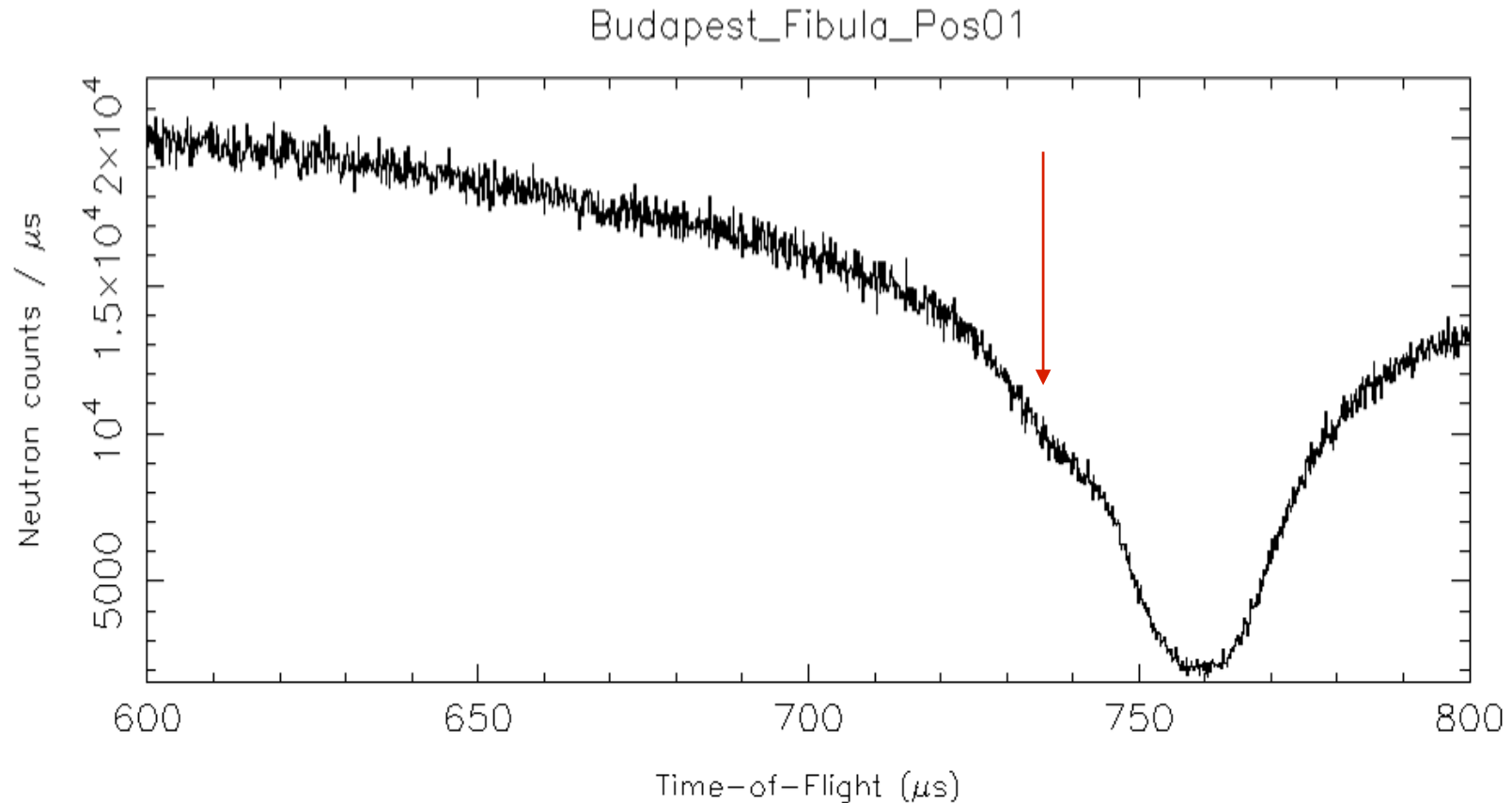
Fe



Cu

NRT element-sensitive imaging

La distribuzione dell'argento "segue" quella dell'oro. La risonanza dell'argento a 5.1 eV è visibile come una spalla contro la più intensa risonanza dell'oro a 4.9 eV

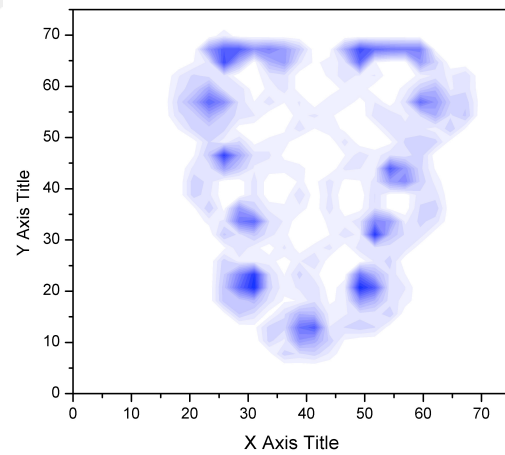
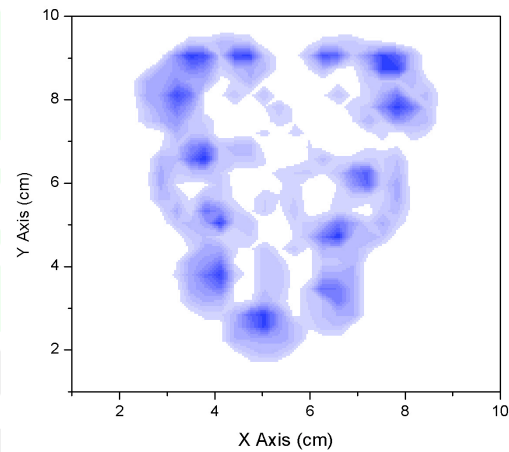


Conclusione: l'argento è presente in maniera sensibile solo nella lega argento-oro dell'ornamento e non nel bronzo della base.

NRT element-sensitive imaging

Borchia di cintura VII sec. d. C. dal sito di Kornye (Museo Nazionale Ungherese, Budapest)

Ag

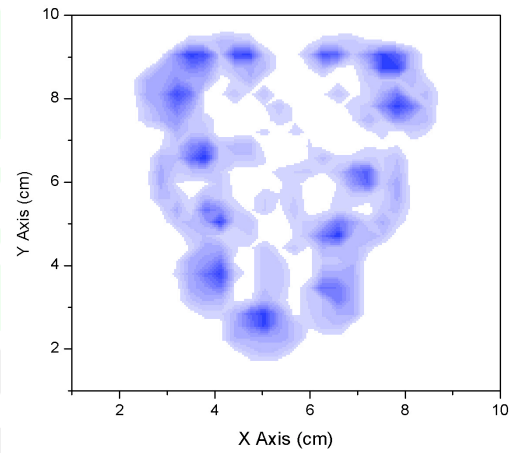


NRT element-sensitive imaging

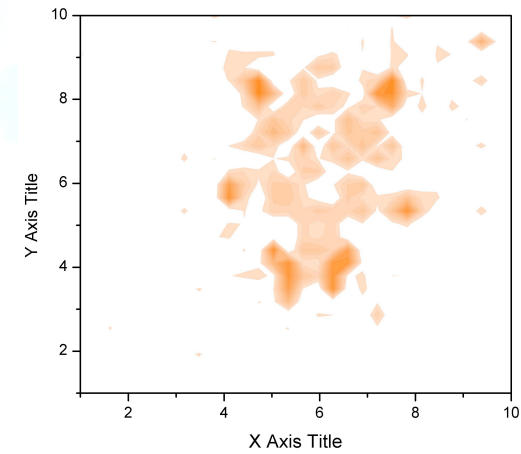
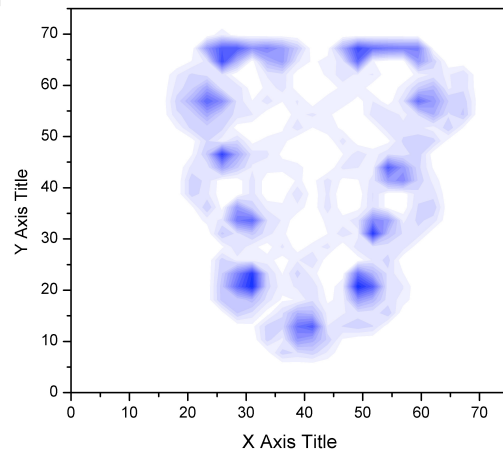
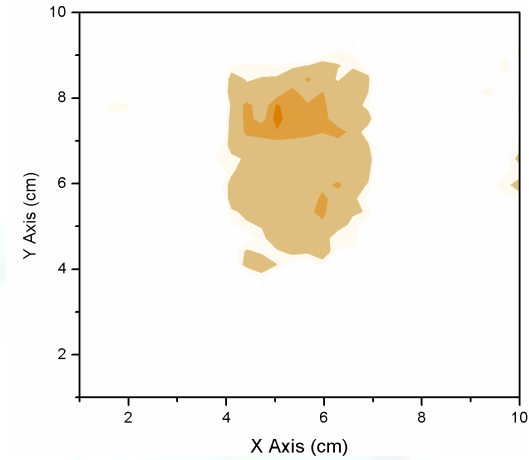
Borchia di cintura VII sec. d. C. dal sito di Kornye (Museo Nazionale Ungherese, Budapest)



Ag



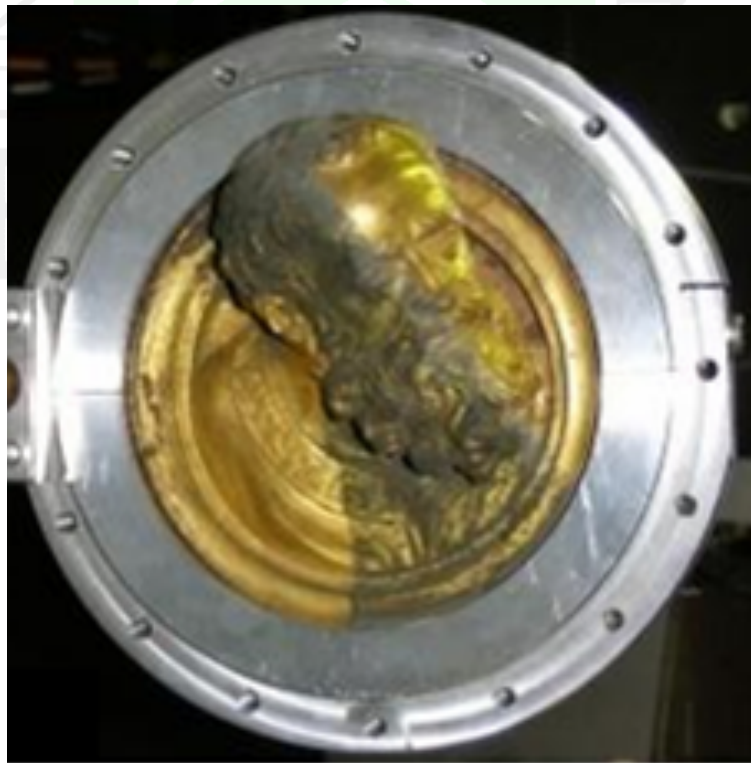
Cu



NRT element-sensitive imaging

Lorenzo Ghiberti, Teste di Profeti dalle porte del Battistero di S. Giovanni, Firenze
(Opificio delle Pietre Dure, Firenze)

Materiale: bronzo dorato.

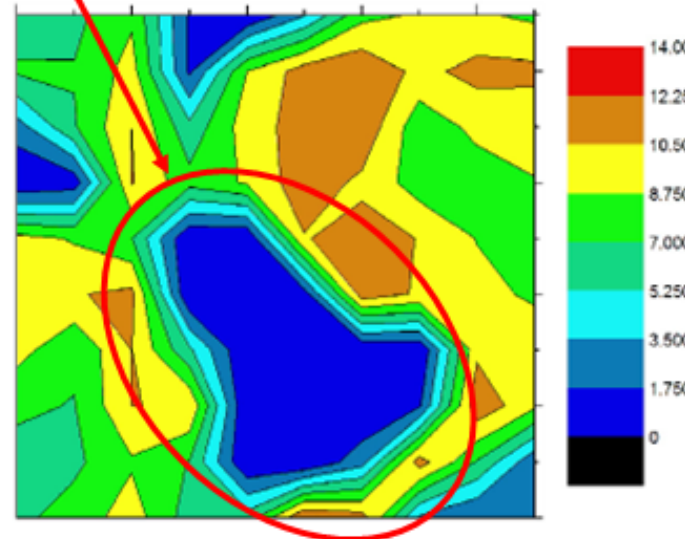


NRT element-sensitive imaging

Lorenzo Ghiberti, Teste di Profeti dalle porte del Battistero di S. Giovanni, Firenze
(Opificio delle Pietre Dure, Firenze)



Nella testa proveniente dalla porta Nord il tempo ha completamente rimosso l'oro dalle parti più esposte (naso, sopracciglia)



NRT element-sensitive imaging

Lorenzo Ghiberti, Teste di Profeti dalle porte del Battistero di S. Giovanni, Firenze
(Opificio delle Pietre Dure, Firenze)



Nella testa proveniente dalla porta del Paradiso la foglia d'oro è ancora presente e rilevabile anche sotto la spessa patina

