



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Legnaro

*Masterclass in fisica delle particelle
Padova*

Nuclei per la cultura

Andrea Gozzelino

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Laboratori Nazionali di Legnaro

Referente CC3M dei LNL

Sommario

- Beni culturali e fisica nucleare
- Fisica dei beni culturali con acceleratori
- Fisica dei beni culturali senza acceleratori
- La rete CH-net dell'INFN

Sommario

- Beni culturali e fisica nucleare
- Fisica dei beni culturali con acceleratori
- Fisica dei beni culturali senza acceleratori
- La rete CH-net dell'INFN

Beni culturali

I beni culturali sono tutte le testimonianze, materiali e immateriali, aventi valore di civiltà.

Opere d'arte, libri, documenti, suppellettili d'uso comune, vestiti, strumenti scientifici

L'analisi di un'opera d'arte si basa su di un approccio multidisciplinare:

analisi artistica

analisi storica

analisi tecnologica



Analisi dei materiali
Tutela
Conservazione
Restauro
Datazione
Provenienza

DOMANDE:

Di che materiale è fatto?

Come è fatto?

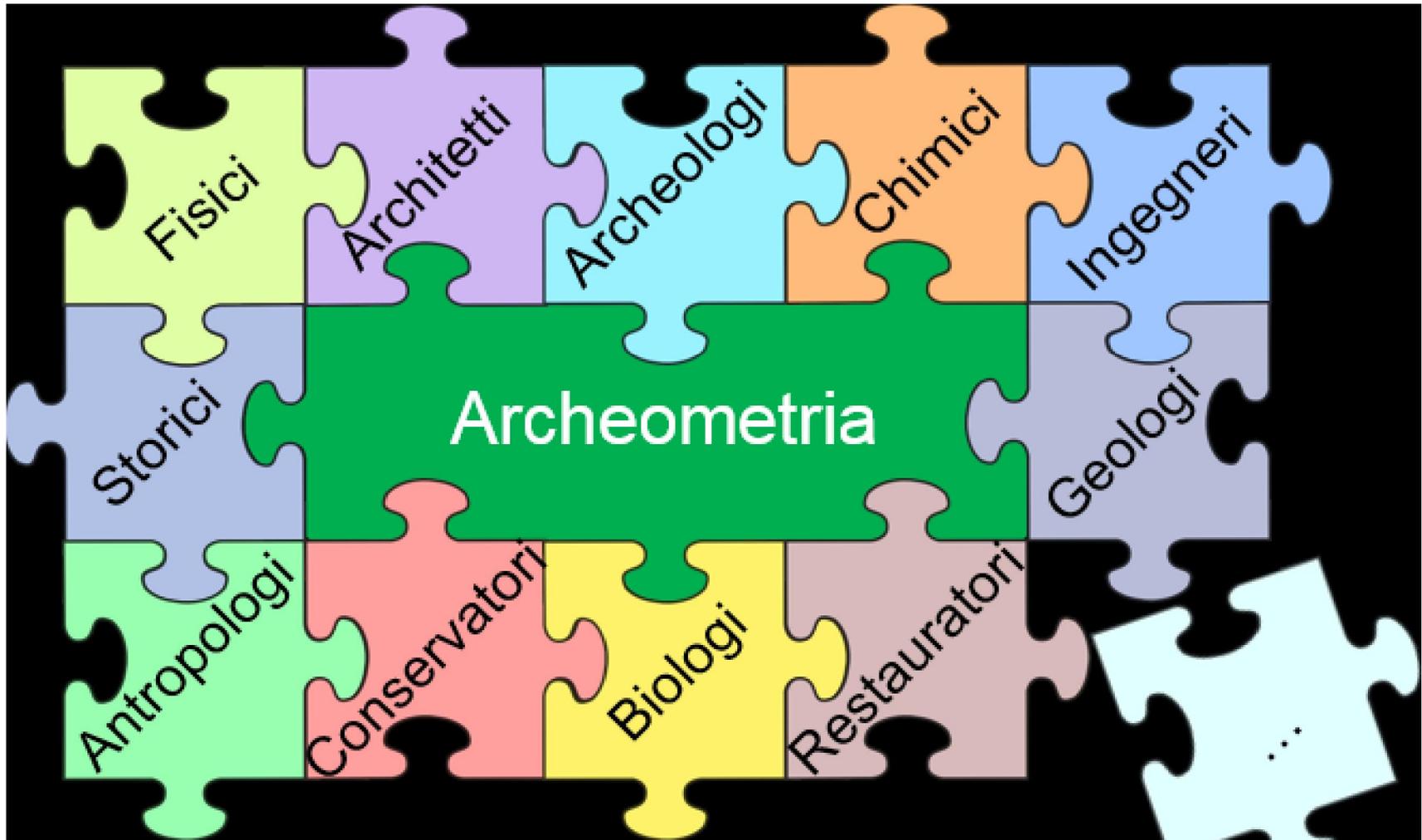
Da dove proviene il materiale di cui è composto?

E' autentico?

Qual è lo stato di degrado?

Quando è stato fatto?

Multidisciplinarietà



Fisica dei beni culturali con ...

Che cosa hanno in comune?

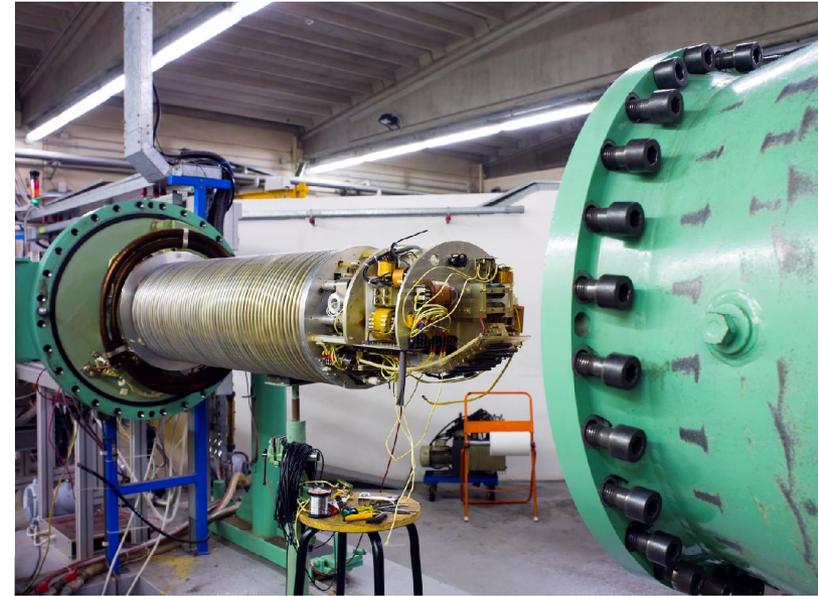


Sommario

- Beni culturali e fisica nucleare
- **Fisica dei beni culturali con acceleratori**
- Fisica dei beni culturali senza acceleratori
- La rete CH-net dell'INFN

Un acceleratore elettrostatico!

*Laboratorio di tecniche nucleari per
l'Ambiente e i Beni Culturali (LABEC) –
Acceleratore Tandem*



*Acceleratore AN2000 presso
Laboratori Nazionali di
Legnaro*

Un acceleratore per ...

per misurare la composizione dei materiali

Ion Beam Analysis (IBA)

Particle Induced X-ray Emission (PIXE)

Back Scattering (BS)

Particle Induced gamma-ray Emissione (PIGE)

Ion Beam Induced Luminescence (IBIL)

...

per datare i materiali (organici)

Accelerator Mass Spectrometry (AMS)

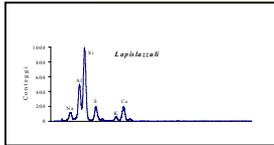
Misura della concentrazione di ^{14}C

- ✓ Fascio in aria (esterno) al LABEC
- ✓ Micro fascio in vuoto ai LNL

Ion Beam Analysis (IBA)

Analisi di composizione dei materiali usando fasci di particelle cariche (tipicamente protoni o α di energia di qualche MeV).

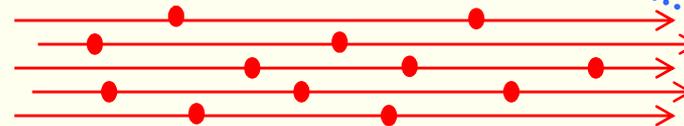
rivelazione delle radiazioni
analisi delle loro energie con
spettri



emissione di radiazioni (raggi X ,
raggi γ) e particelle
di energie caratteristiche



fascio di particelle



Bersaglio

Oggetto da analizzare



L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare è pioniere della Ion Beam Analysis (IBA) applicata ai beni culturali

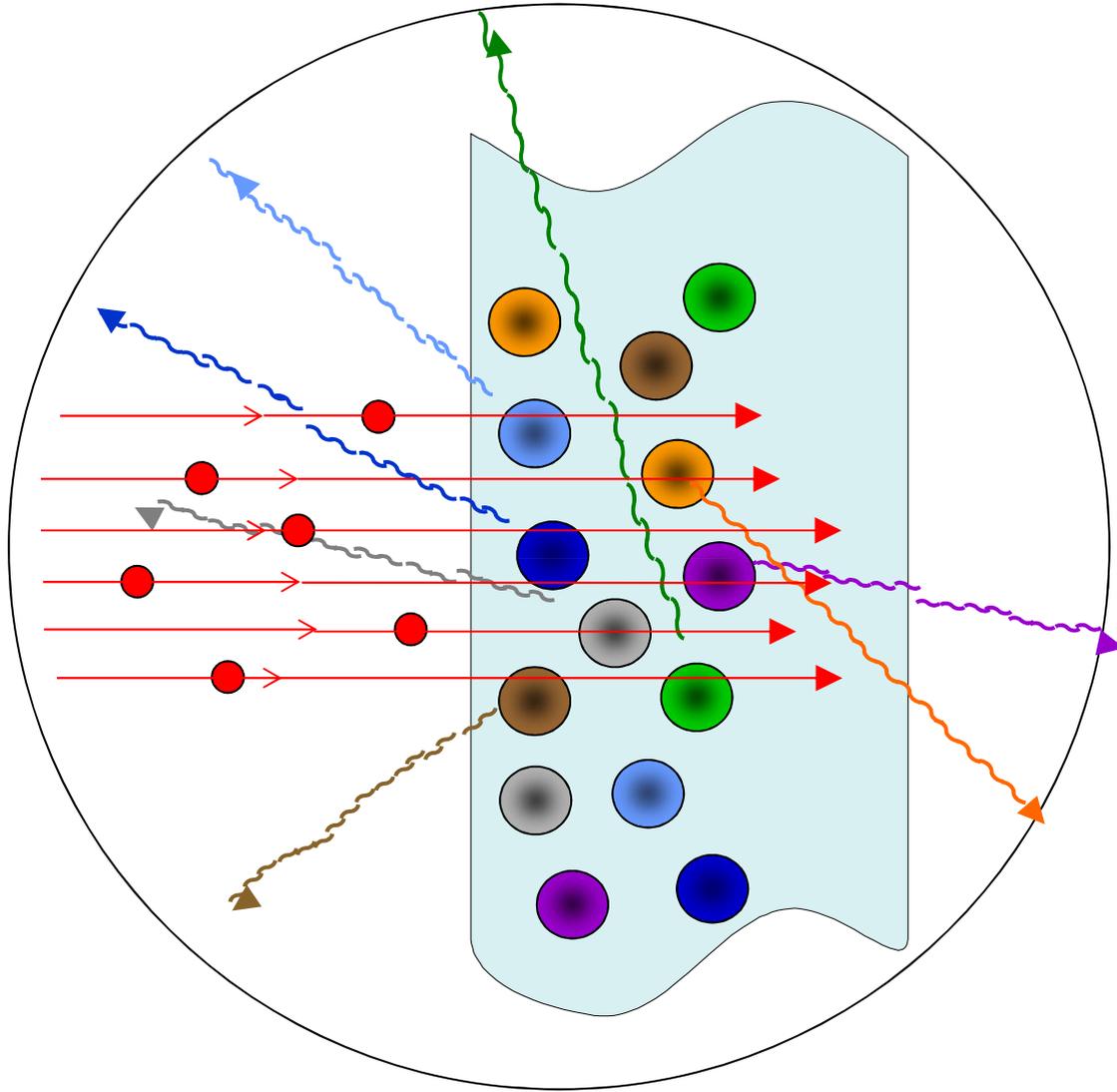


Firenze, circa 1987

Un acceleratore Van de Graff da 3 MV
“ereditato” da misure di
fisica nucleare
fondamentale è usato per
IBA.



Ion Beam Analysis (IBA)

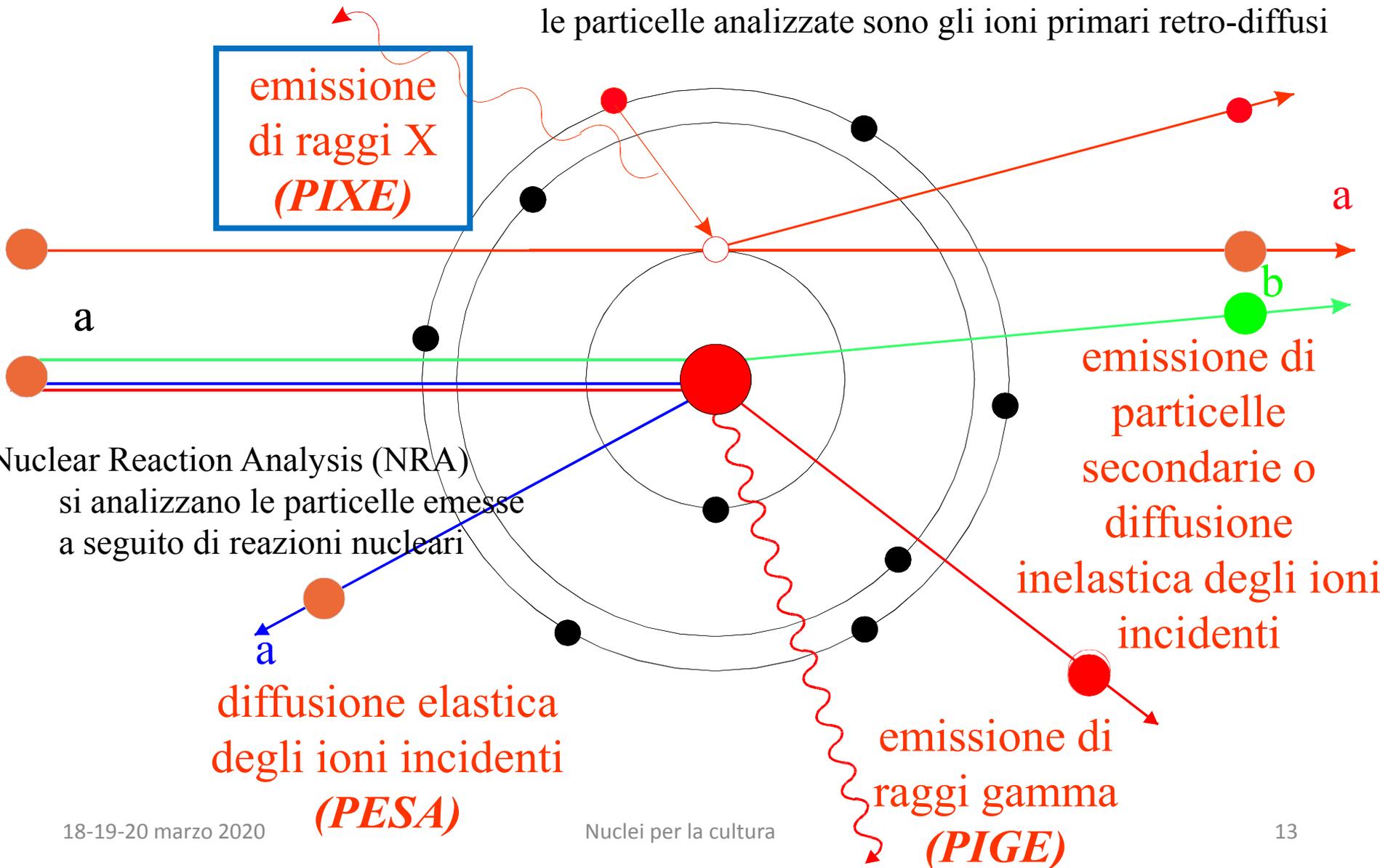


Ion Beam Analysis (IBA)

Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS)

le particelle analizzate sono gli ioni primari retro-diffusi

emissione
di raggi X
(PIXE)



Nuclear Reaction Analysis (NRA)
si analizzano le particelle emesse
a seguito di reazioni nucleari

diffusione elastica
degli ioni incidenti
(PESA)

emissione di
particelle
secondarie o
diffusione

inelastica degli ioni
incidenti

emissione di
raggi gamma
(PIGE)

Ion Beam Analysis (IBA)

PIXE → misura dei raggi X emessi → analisi degli elementi

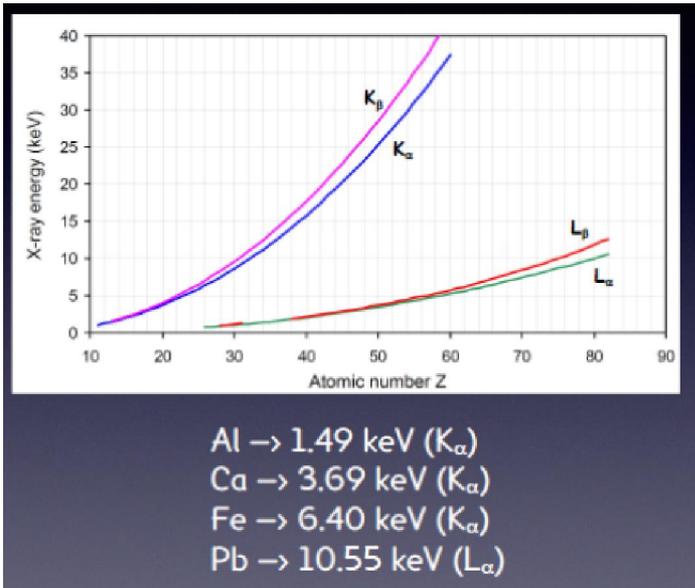
PIGE → misura dei raggi gamma emessi → analisi di alcuni isotopi leggeri (F, Na, Mg)

BS → misura delle particelle del fascio “rimbalzate” all’indietro → analisi della componente organica (C, N, O)

IBIL → misura della radiazione luminosa ultravioletta e visibile → analisi di alcuni legami molecolari

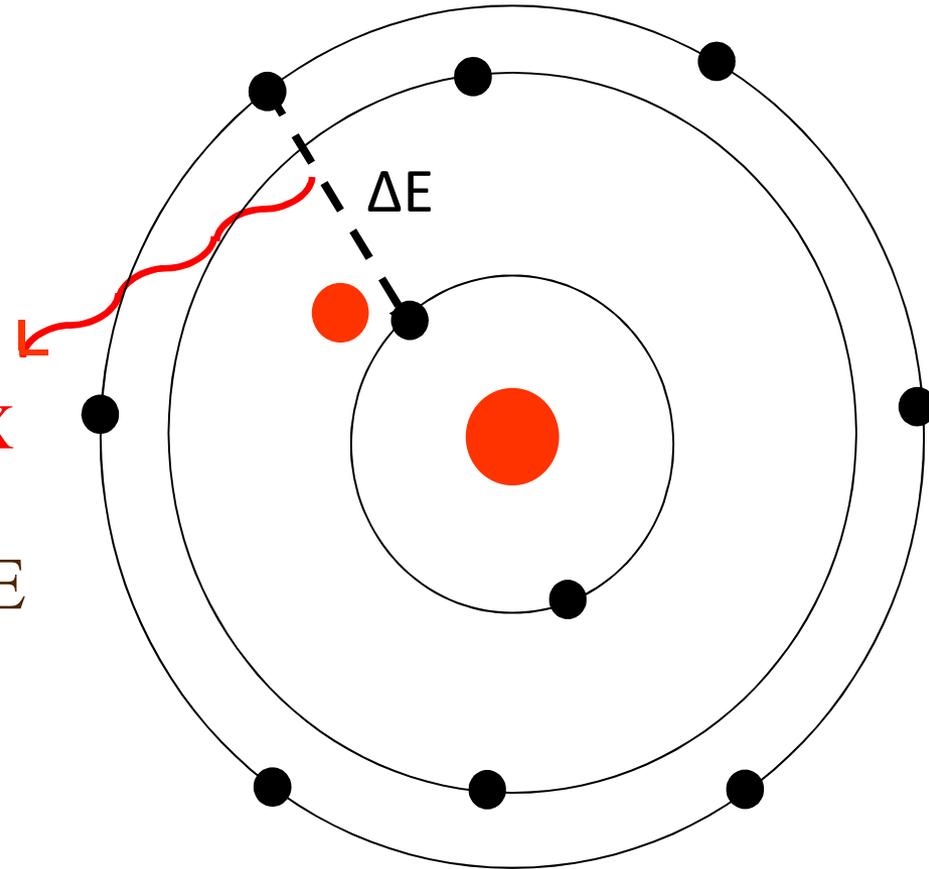
NRA → misura delle particelle prodotte nelle interazioni nucleari → analisi di isotopi

Particle Induced X-Ray Emission (PIXE)



raggio X

$$E_X = \Delta E$$



L'energia del raggio X è caratteristica dell'elemento (esempio: sodio, silicio, calcio, ferro, piombo, ...)

Pregi e difetti della PIXE

Misura dell'energia dei raggi X → Identificazione dell'elemento presente nel campione

Conteggi di raggi X di una data energia → Stima della concentrazione di quell'elemento

- ✓ Analisi multielementale

- ✓ Misura non invasiva e non distruttiva

- ✓ Misura rapida (ordine di minuti)

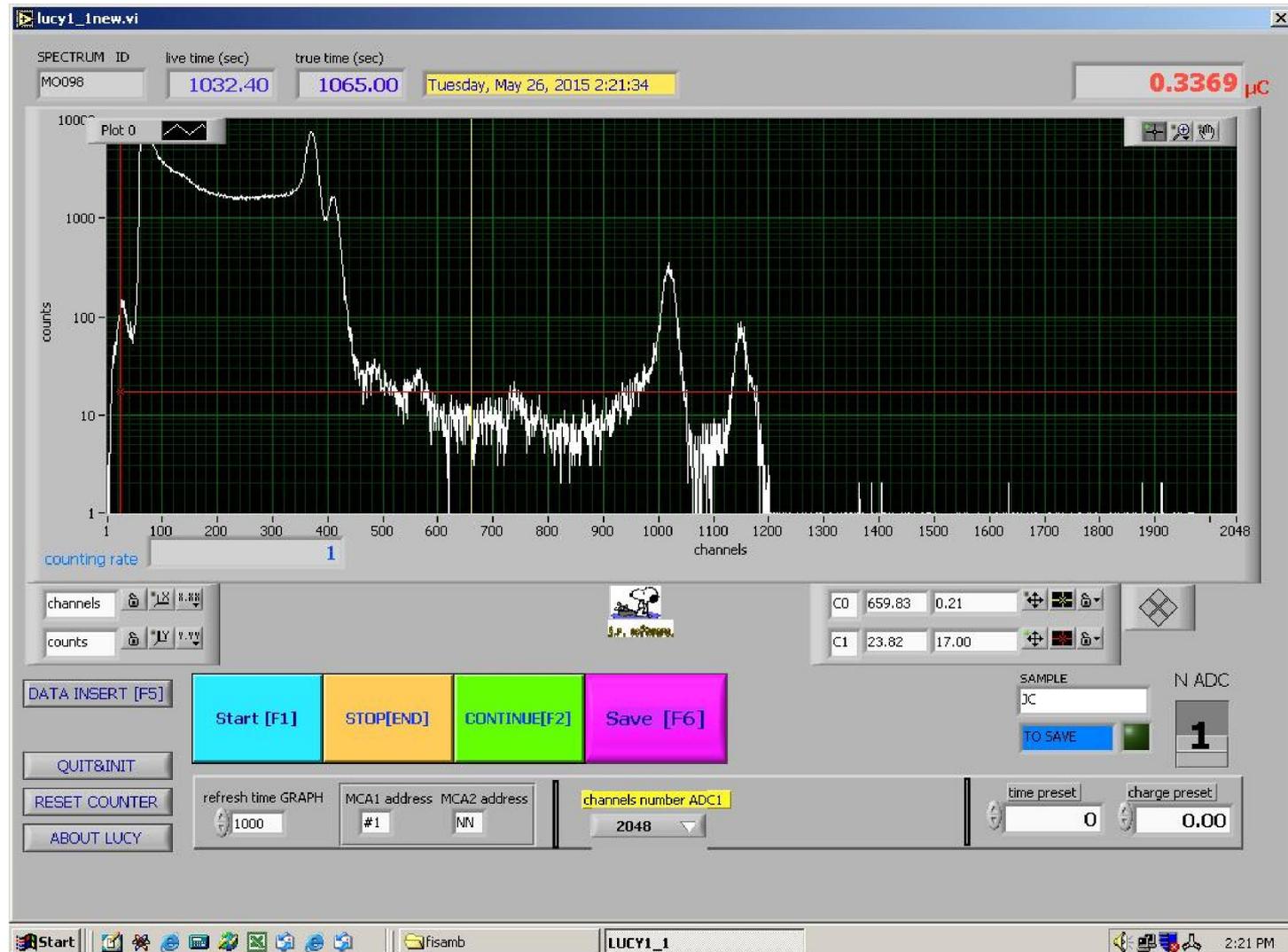
- ✓ Mappe elementali

- ✓ Sensibilità dal sodio Na in poi

- ✓ Nessuna informazione sui legami chimici

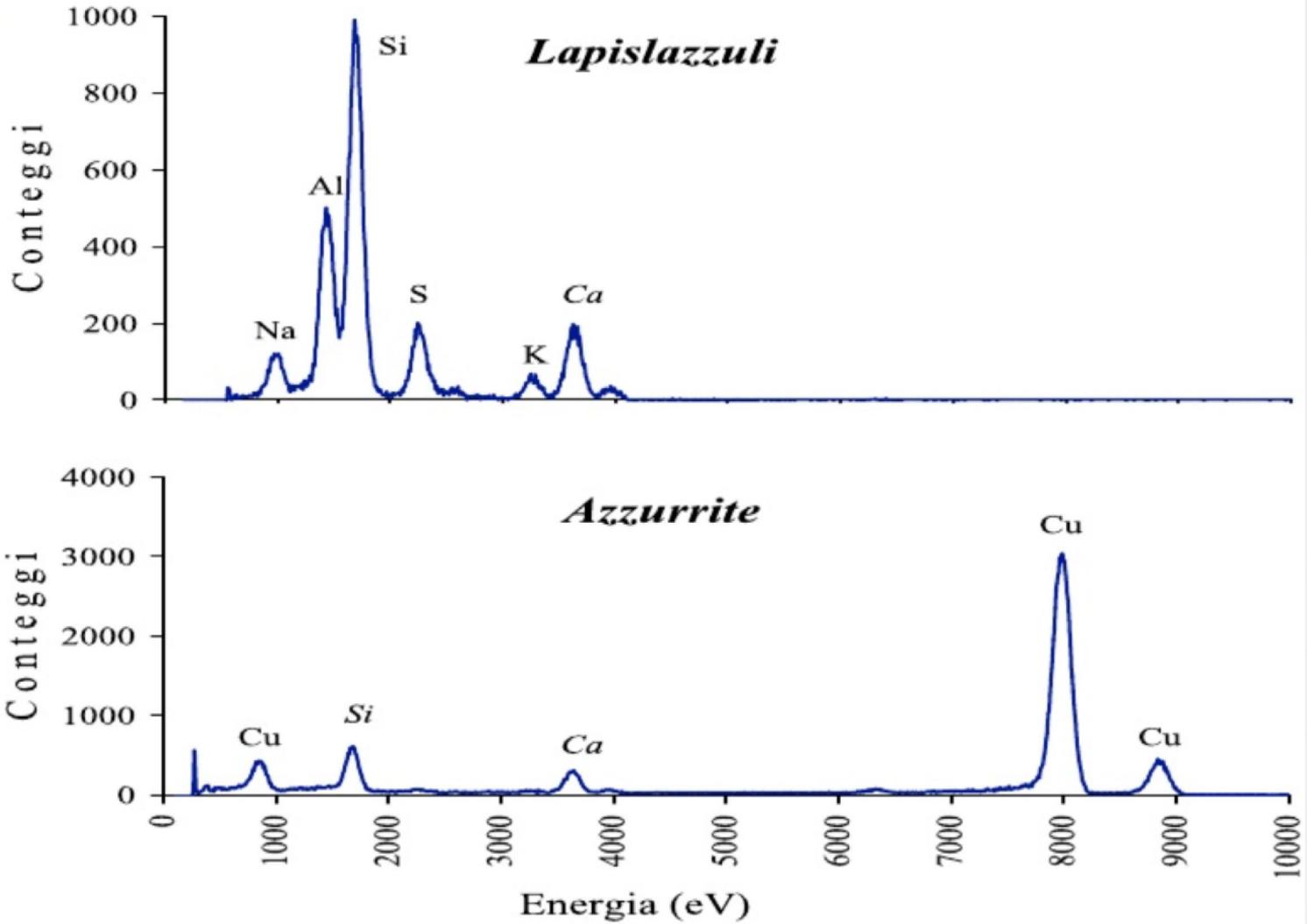
- ✓ Trasporto dei campioni in laboratorio

I dati sono ...

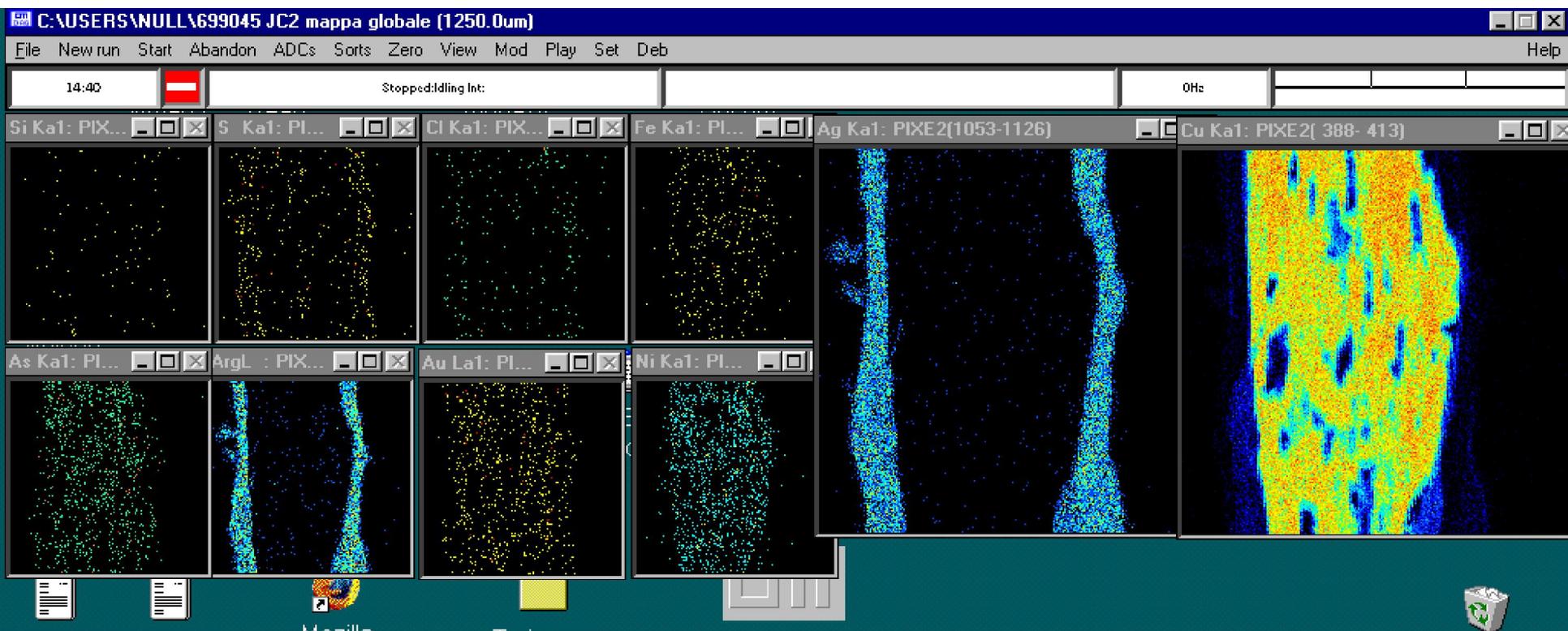


Istogrammi

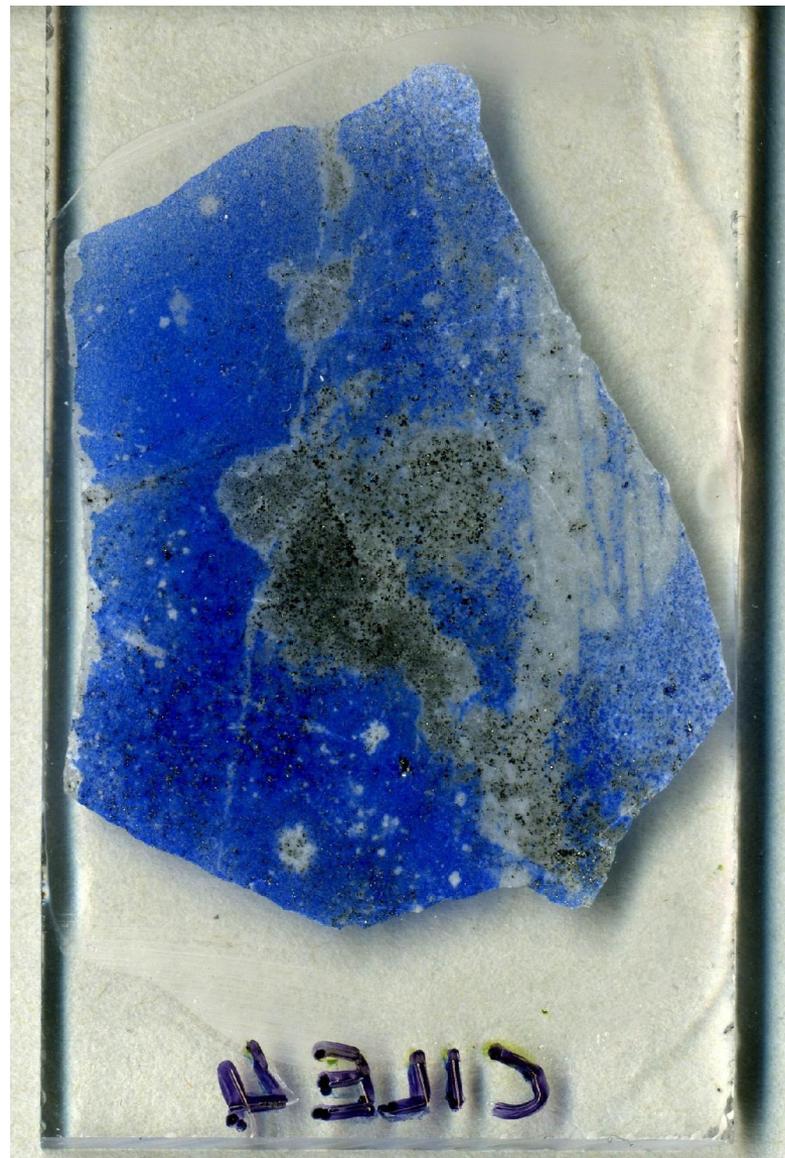
I dati sono ...



Istogrammi



Lapislazzuli



Elementi maggiori nel lapislazzuli

Si tratta di una roccia di colore blu formata da un aggregato di diversi minerali



LAZURITE



DIOPSIDE
 $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$



WOLLASTONITE
 CaSiO_3



K-FELDSPATI
 KAlSi_3O_8



Ed altri...

CALCITE
 CaCO_3



PIRITE
 FeS_2



Giacimenti



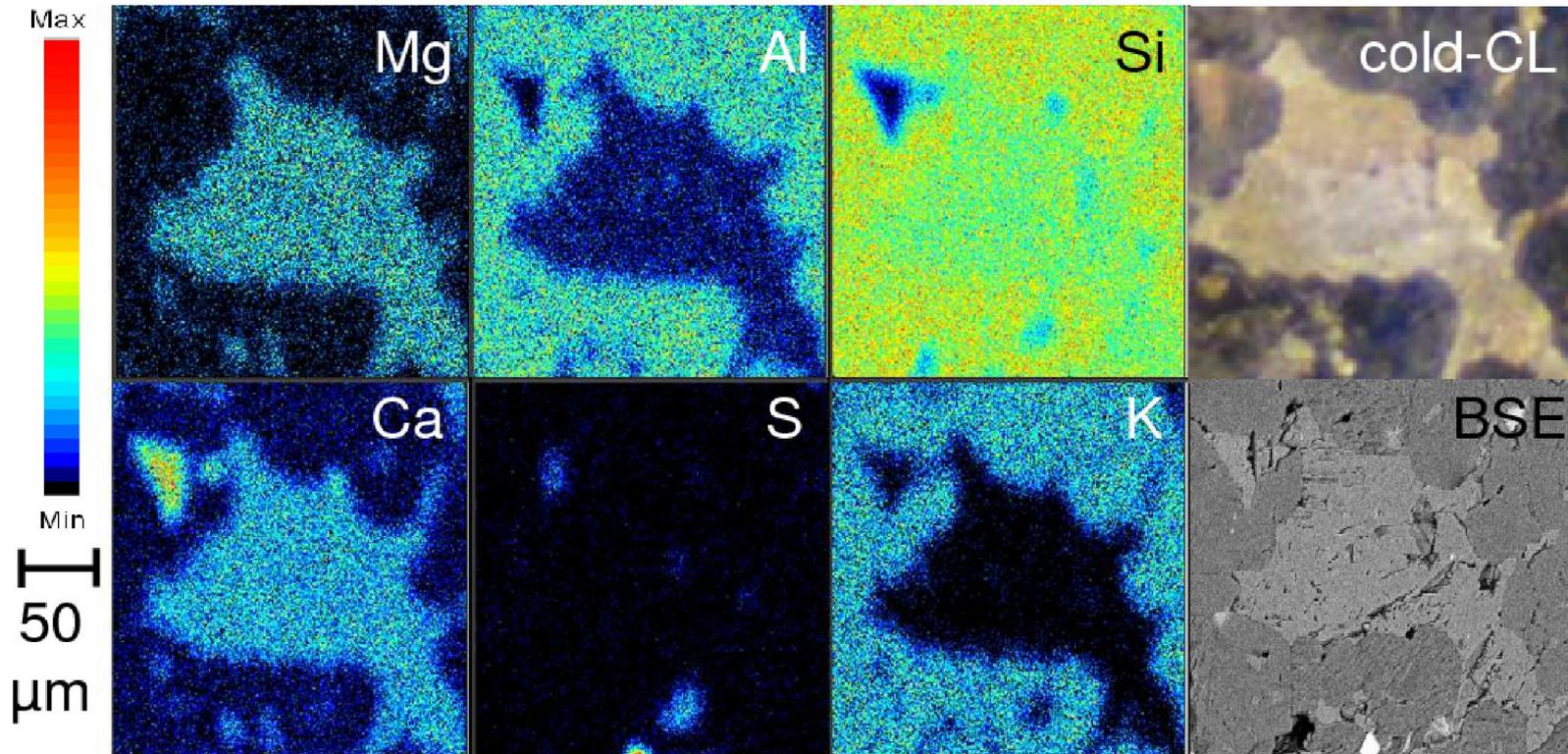
Analisi del lapislazzulo

Annual Report 2010

Pietra semi-preziosa nota da 7000 anni, ne esistono pochi giacimenti perché si forma in condizioni geologiche poco probabili

AN2000 a Legnaro
Fascio di protoni a 600 keV
Diametro fascio = 5 μm
Intensità = 1 nA
Anno 2009

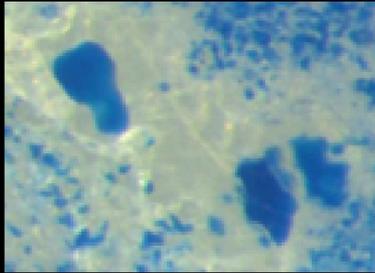
Contributo: Compagnia di San Paolo



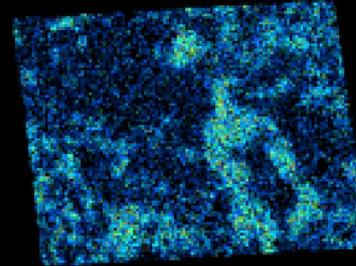
Studio di provenienza

500 μm

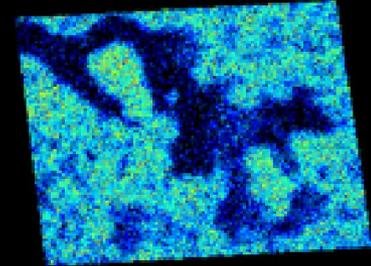
Microscopio



Mg

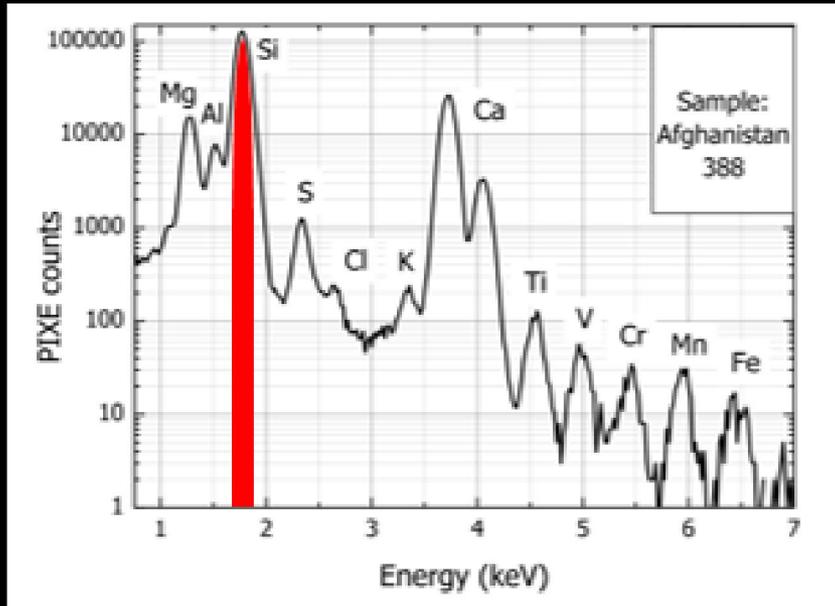


Al

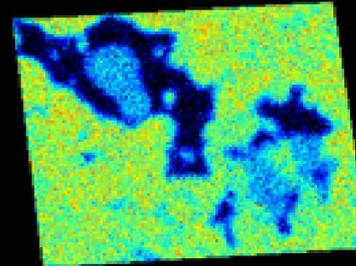


Mappe PIXE

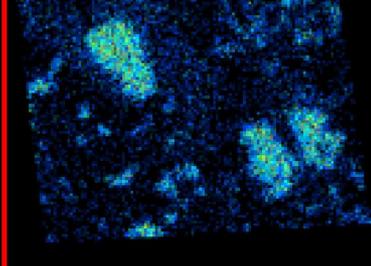
Spettro PIXE



Si



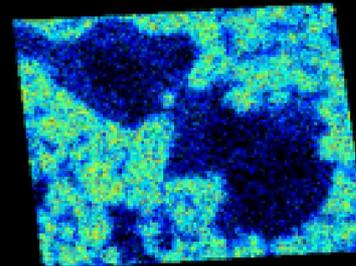
S



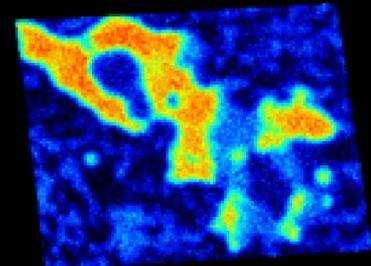
Max



K



Ca



Min

Diopside

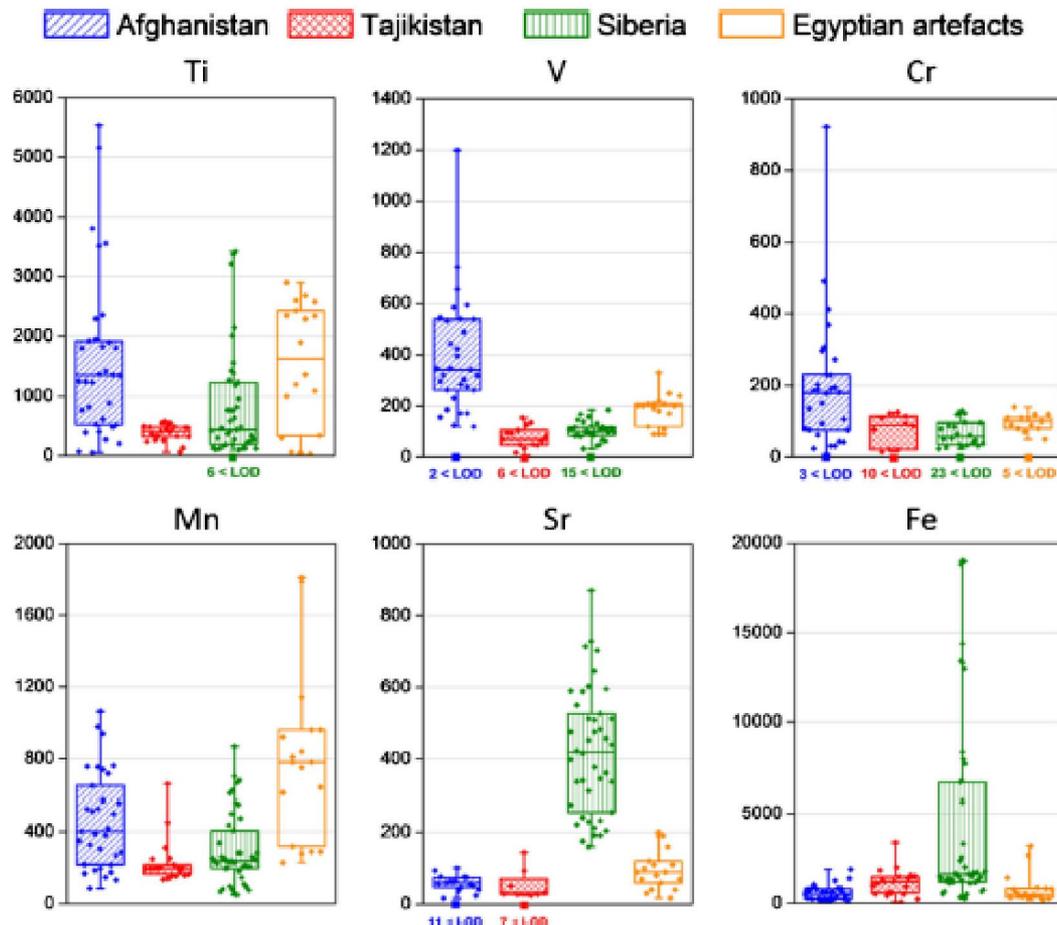


Fig. 7 Trace element contents in diopside crystals (in ppm): comparison between Egyptian artefacts and rocks from our database (Re 2015). The square symbols in correspondence to 0 value represent the numbers of measurements below the limit of detection (LOD)

2017 Lo Giudice et al - AAS 9(4)[637-651]

Tracce di elementi minori nel minerale

Titanio
Vanadio
Cromo
Manganese
Stronzio
Ferro

ESERCIZIO

Ti (1954 ± 78) ppm
V (595 ± 53) ppm
Cr (297 ± 36) ppm
Mn (381 ± 26) ppm
Sr (0 ± 0) ppm
Fe (92 ± 13) ppm

Diopside: minerale della famiglia del pyroxene, inosilicato con una singola catena di calcio e magnesio.

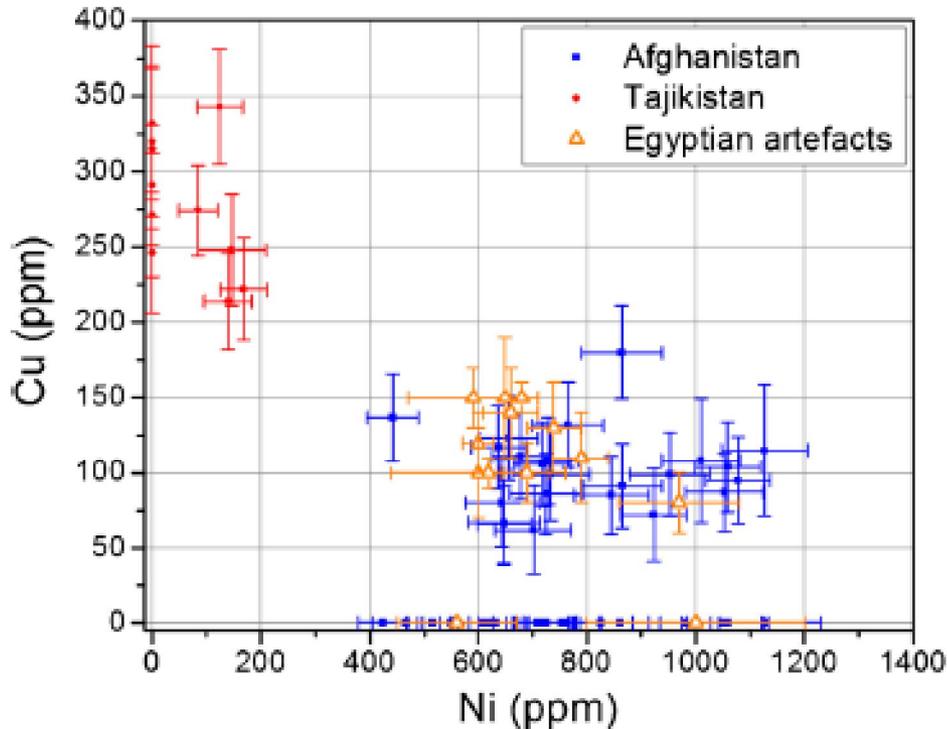


Fig. 9 Cu versus Ni contents in pyrite crystals from μ -PIXE measurements. The individual errors associated with each measurement are plotted, whereas the values below the limit of detection (LOD around 100 ppm for Ni and 50 ppm for Cu) are represented on the axes

2017 Lo Giudice et al - AAS 9(4)[637-651]

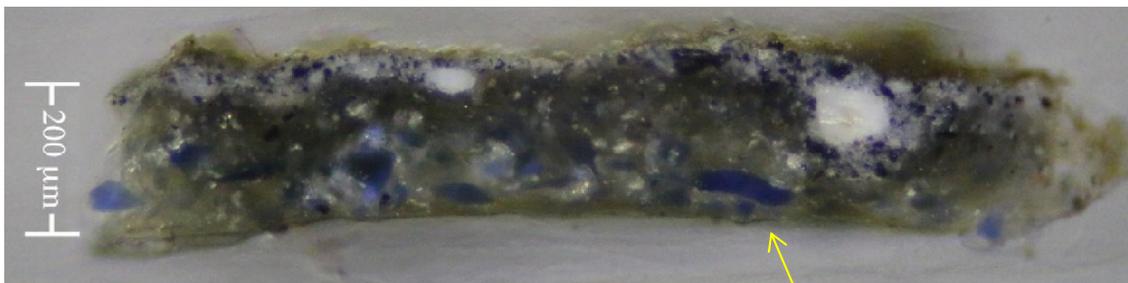
Tracce di elementi minori nel minerale

Rame
Nichel

ESERCIZIO

Ni (1074 ± 74) ppm
 Cu (56 ± 27) ppm

Studenti di quarta analizzano ...



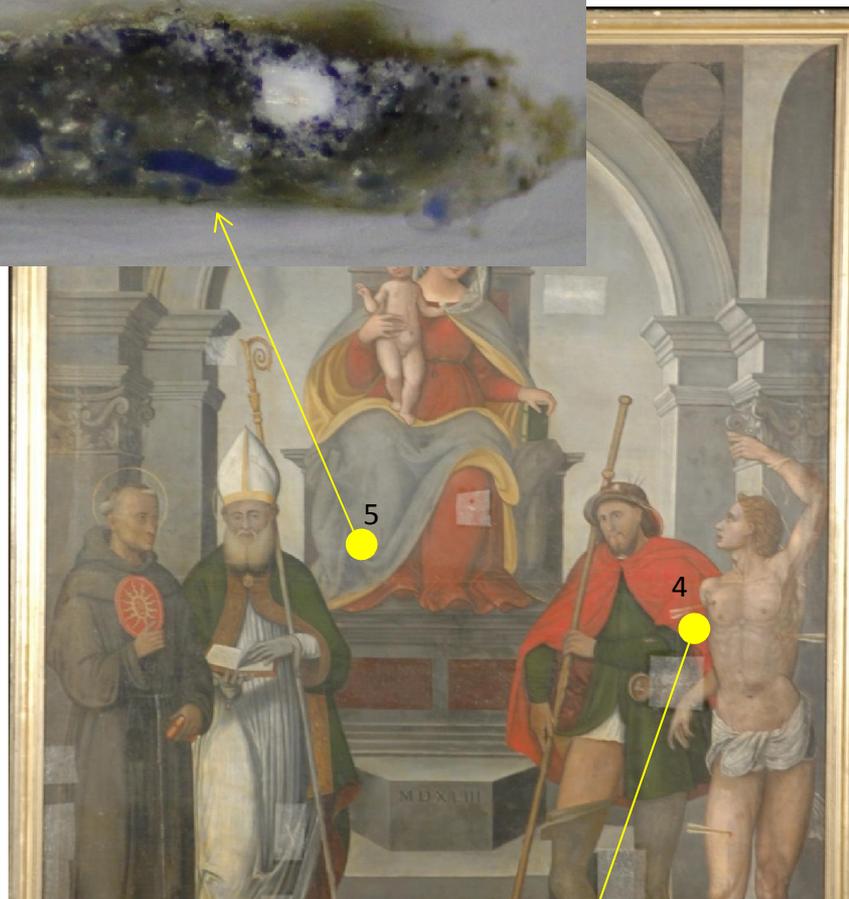
Giovanni da Mel

*Madonna e Bambino tra i
santi Bernardino, Felice,
Rocco e Sebastiano*

1543

olio su tavola,
176 cm x 238 cm

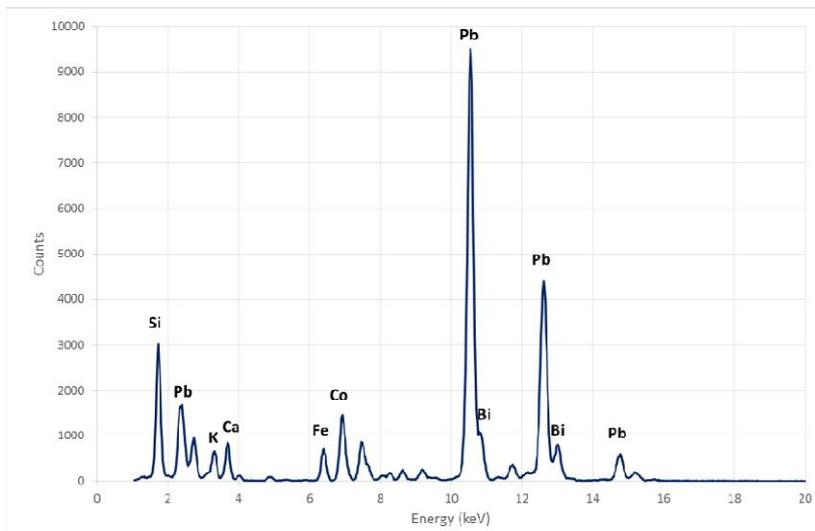
Chiesa parrocchiale di
Trichiana (BL)



Studenti di quarta identificano ...

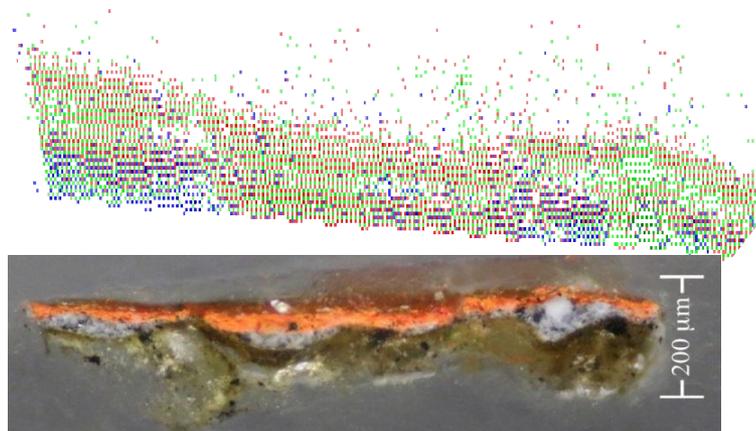
Madonna Campione 5

- Pb (Biacca)
- Co (Smaltino)
- Si (Smaltino)



San Rocco Campione 4

- Hg (Cinabro)
- Pb (Biacca)
- Ca (Gesso)



Conclusioni su PIXE

La PIXE è un valido supporto per numerose scienze.

L'uso della PIXE in complementarità con altre tecniche - possibile perché la PIXE non è invasiva - di tipo nucleare quali RBS e PIGE consente molto spesso un'analisi su tutta la tavola periodica degli elementi.

FISICA DELL'AMBIENTE

analisi di aerosol, sedimenti,
materiale insoluto in acqua,
materiale soluto in acqua

GEOLOGIA

determinazione dell'età
delle rocce, studio degli
elementi in traccia

FARMACOLOGIA

studio degli elementi in
traccia su medicinali
tradizionali

SCIENZA DEI MATERIALI

studio delle contaminazioni
superficiali su materiale
trattato come semiconduttori
drogati, acciai speciali

ARCHEOLOGIA

ASTROFISICA

FISICA MEDICA

analisi di materiale organico
come fibra, siero, plasma
per lo studio di elementi in
traccia.

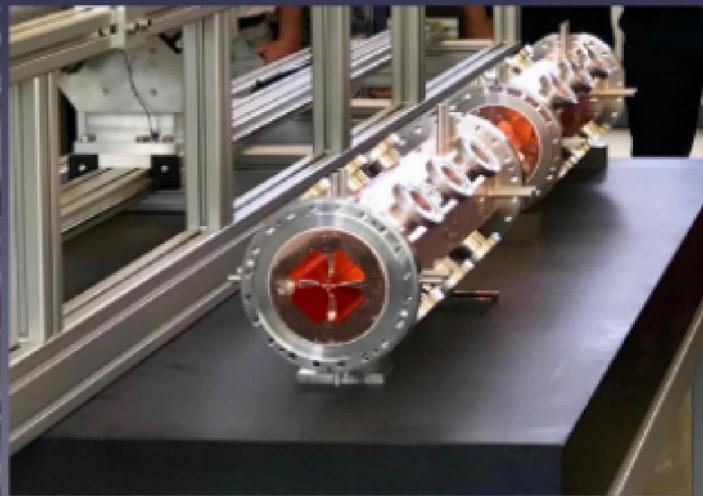
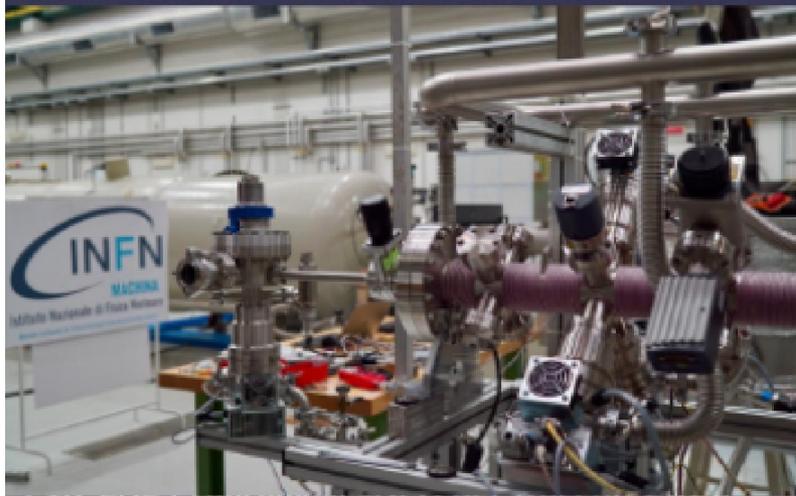
FISICA DEI BENI CULTURALI

studio di opere d'arte per la
datazione, l'attribuzione, lo
studio delle tecniche
pittoriche e la loro
salvaguardia

Movable Accelerator for Cultural Heritage In-situ Non-destructive Analysis



- Il primo acceleratore di protoni ($E=2\text{ MeV}$) **trasportabile** → sarà installato presso l'Opificio delle Pietre Dure di Firenze



Sommario

- Beni culturali e fisica nucleare
- Fisica dei beni culturali con acceleratori
- **Fisica dei beni culturali senza acceleratori**
- La rete CH-net dell'INFN

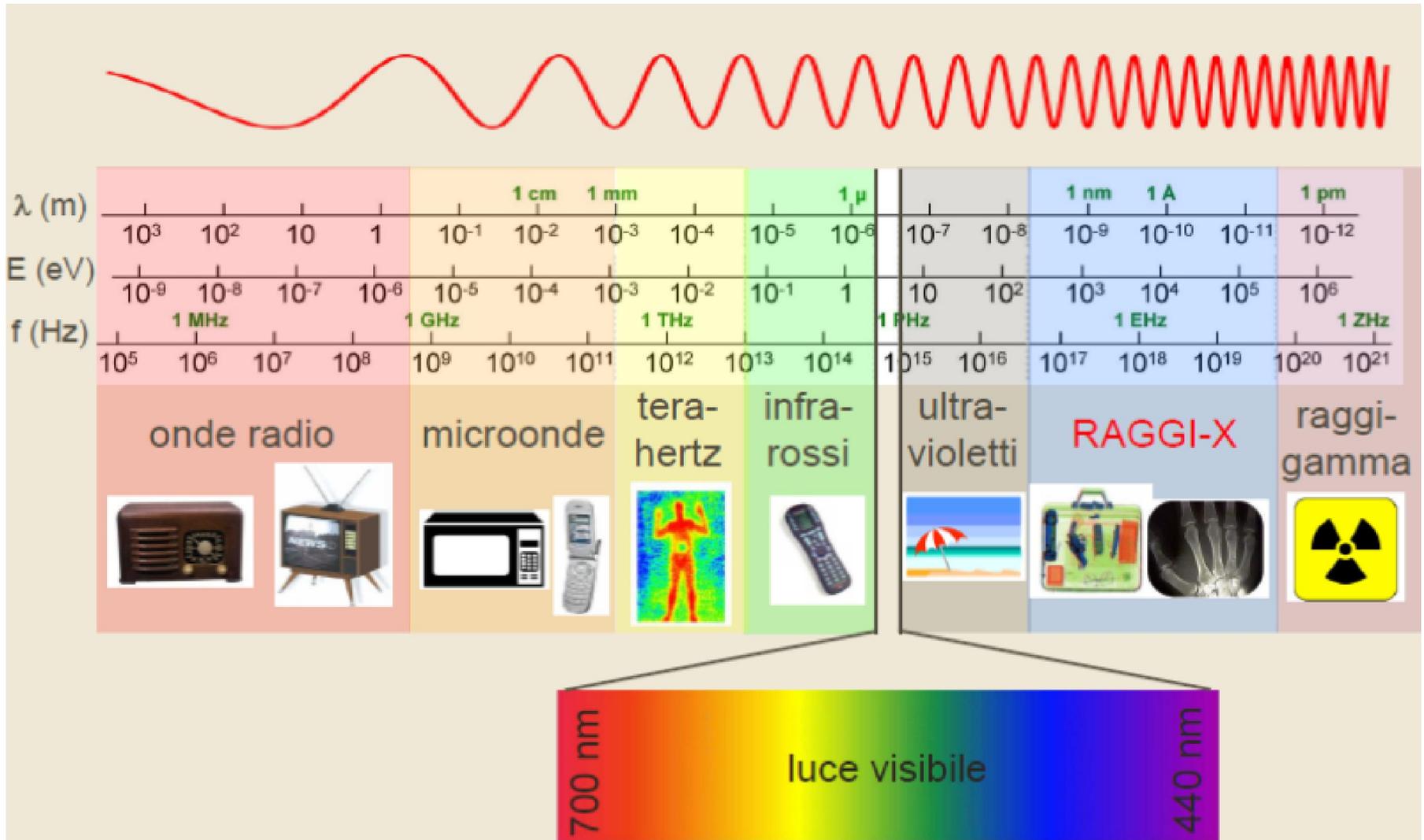
Le tecniche per immagini

NON invasive → non si modifica l'oggetto in esame
(nessun campione prelevato)

NON distruttive → il campione (o l'area) analizzato si
conserva identico

Il risultato ottenuto senza acceleratori è un'**immagine**.

Lo spettro elettromagnetico



La struttura di un dipinto

Vernice

strato di sacrificio che protegge il dipinto e rende più brillanti i colori

Strato pittorico

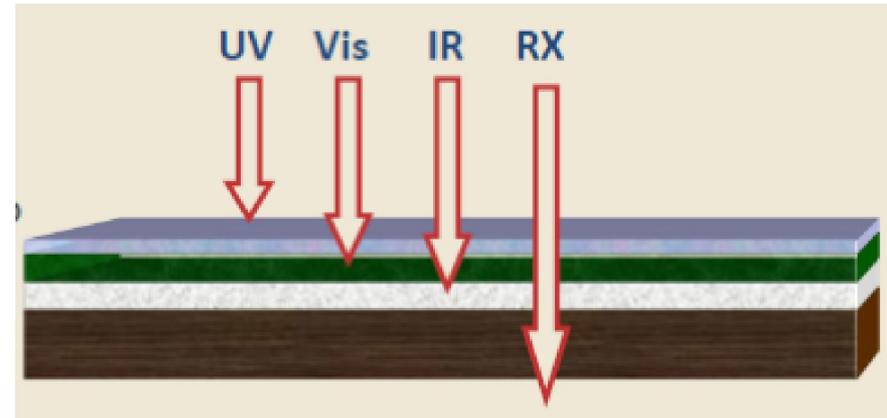
Pigmento = colore e potere coprente

Legante = mantiene il pigmento ancorato allo strato preparatorio

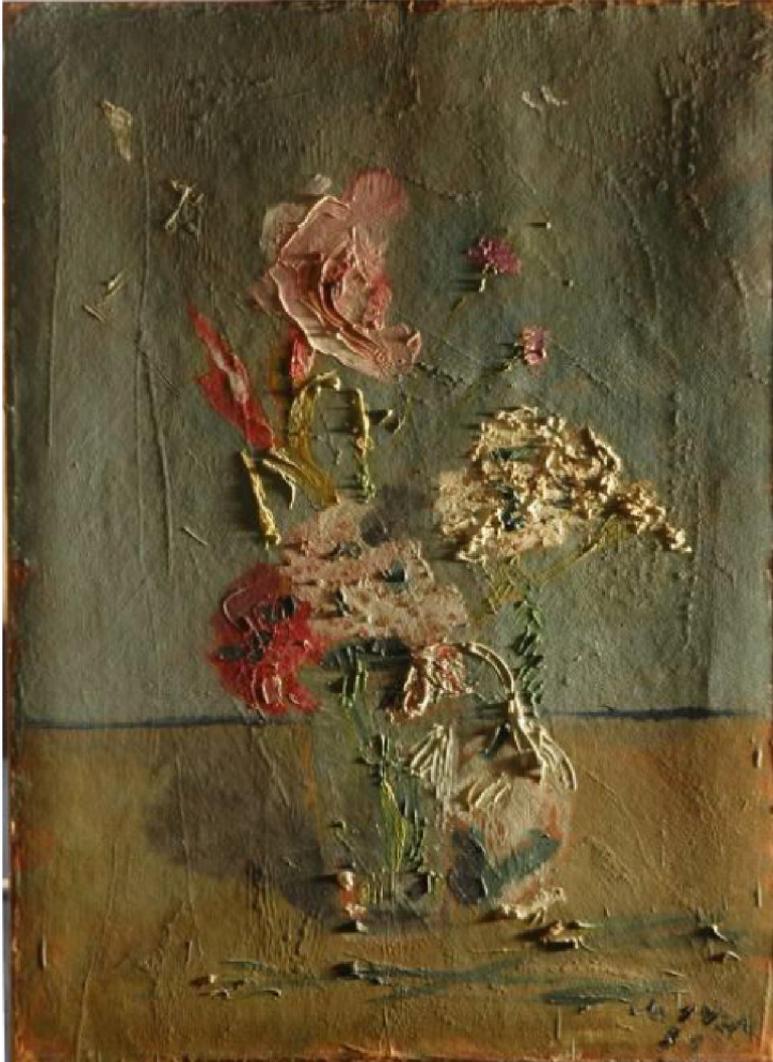
Disegno

Strato preparatorio: gesso e colla

Supporto: legno o tela



Luce radente



Evidenzia le asperità della superficie

Filippo De Pisis

Il gladiolo fulminato

1930, olio su cartone incollato su legno

71 ,5 x 51 cm

Ferrara,

Museo De Pisis

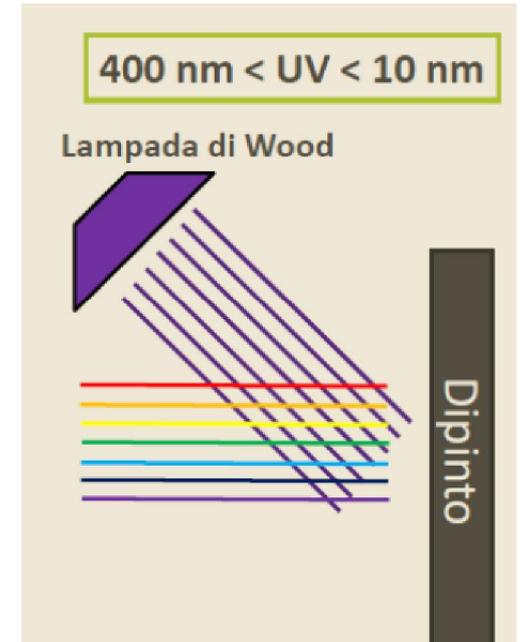
Fluorescenza ultravioletta

Fluorescenza:

Proprietà per cui irraggiando un materiale con radiazione di una data energia, questi emette una radiazione di energia minore (λ maggiore).

La fluorescenza ultravioletta è tipica per i materiali organici (ad esempio, le vernici) ed è maggiore per materiali più antichi.

La **lampada di Wood** emette radiazioni ultraviolette grazie a vapori mercurio e presenta un vetro scuro blu o viola (ossido di nichel), che blocca la luce visibile.



Fluorescenza ultravioletta



Fluorescenza ultravioletta



Visibile la fluorescenza del giallo di cadmio

Riflettografia infrarossa

Propagazione della luce*:

In un mezzo trasparente e omogeneo, che contiene particelle disperse, poco assorbenti e di dimensioni confrontabili con λ incidente, l'attenuazione del fascio è dovuta per lo più alla diffusione (scattering).

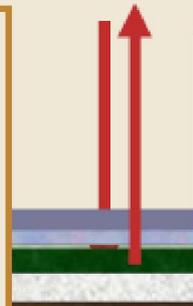
750 nm < NIR < 3 μ m

Mezzo = legante
Particelle = pigmenti

$$S = 1/\lambda$$

Aumentando λ , la propagazione in avanti è favorita

Disegno preparatorio:
Contrasto tra materiale assorbente (carbonioso) e materiale riflettente (preparazione chiara).



N.B. Il risultato riflettografico dipende dalla trasparenza degli strati pittorici (spessore, pigmenti) e dal tipo di rivelatore (range spettrale)

Riflettografia infrarossa



Riflettografia infrarossa



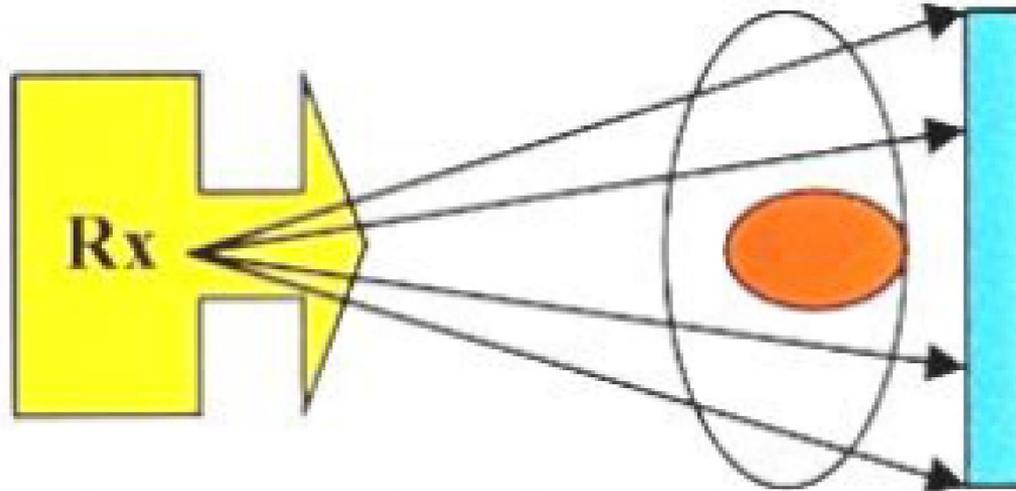
Visibile il pentimento

Studenti analizzano ...



Edoardo **Pazzini**, *Lungo la strada per Padulli*, 1943,
olio su cartone, 32 cm x 21 cm, collezione privata

Radiografia X



Tubo a raggi X – oggetto da analizzare – lastra fotografica

I fotoni X sono emessi per radiazione di frenamento (bremsstrahlung) dagli elettroni bruscamente decelerati dall'anodo

Minor numero di raggi X → zone chiare

Maggior numero di raggi X → zone scure

Legge di Lambert-Beer per attenuazione dei raggi X nella materia

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Radiografia tradizionale VS digitale



L'immagine radiografica tiene conto delle caratteristiche del dipinto:
spessore, numero atomico, densità.

X Ray Fluorescence XRF

Si analizzano i raggi X emessi dalla fluorescenza.

L'emissione è indotta da un fascio di radiazione elettromagnetica (raggi X primari ottenuti da tubo a raggi X, lungo ordine di cm).

XRF è meno quantitativa, meno sensibile per gli elementi leggeri rispetto a tecniche IBA.

XRF è trasportabile!

Ai LNL e al LABEC sono disponibili apparati portatili.

Un sistema XRF a scansione della rete INFN CH-net è installato in permanenza all'Opificio delle Pietre Dure a Firenze.

Apparato XRF del LABEC





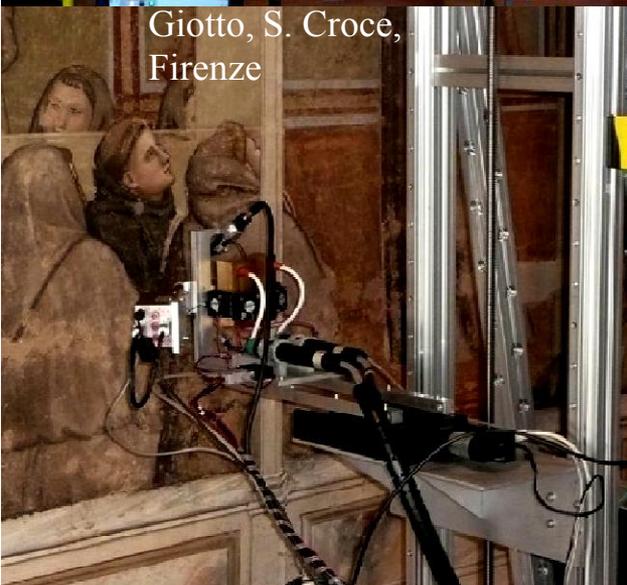
Piero della Francesca, Sansepolcro



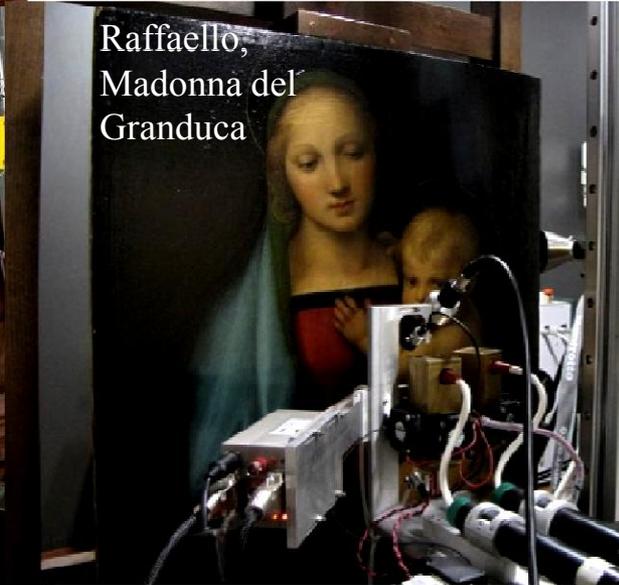
Maestro di Figline, S. Croce, Firenze



Chimera di Arezzo, Museo Archeologico Firenze



Giotto, S. Croce, Firenze

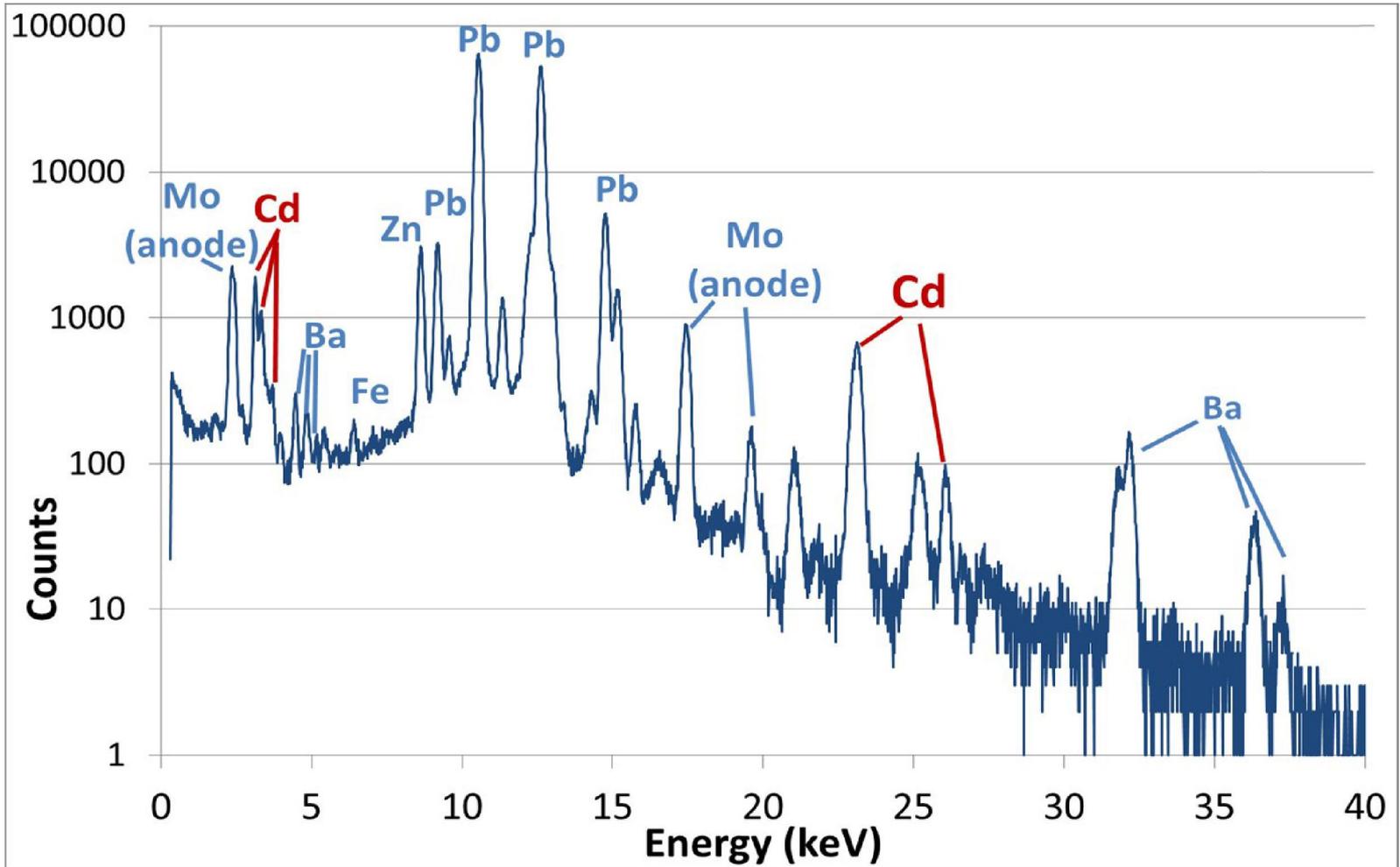


Raffaello, Madonna del Granduca



Beato Angelico, S. Marco, Firenze

Spettro in fluorescenza X



Visibile il picco caratteristico del giallo di cadmio

XRF per pigmenti antichi

Esempi:

Pigmento:

Cinabro



Biacca



Giallorino



Formula:

HgS

$(\text{PbCO}_3)_2 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$

Pb_2SnO_4

Periodo:

Antica Grecia ad oggi

Antichità al XIX secolo

Tardo Medioevo a oggi

Costruzione della tavolozza dei colori del pittore per un restauro

Una recente applicazione di XRF

Stato al maggio 2017



Carlo Bononi, *Incoronazione della Vergine*, 1617, olio su tela, Ø2.8 m, Ferrara, Santa Maria in Vado

Spettroscopia Raman

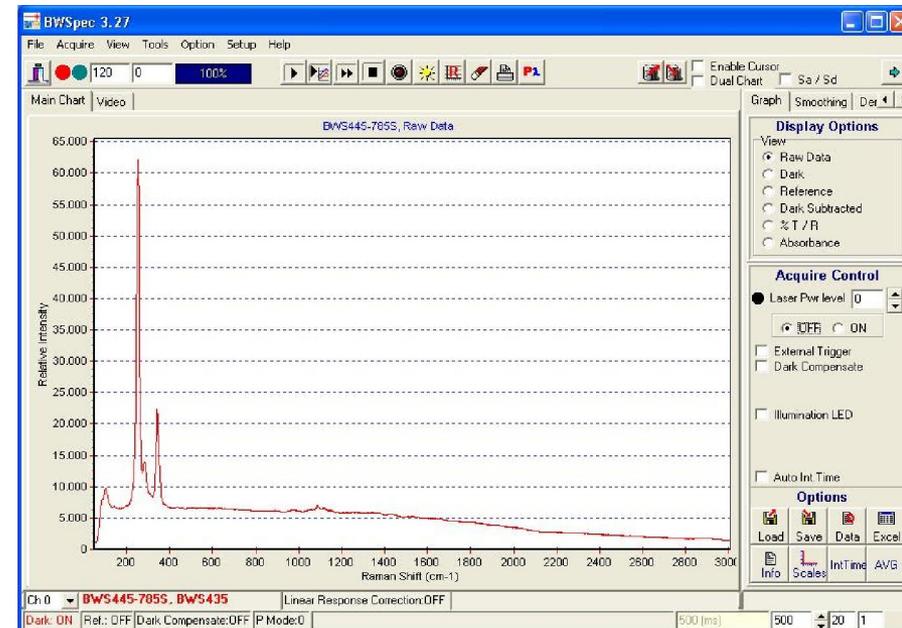
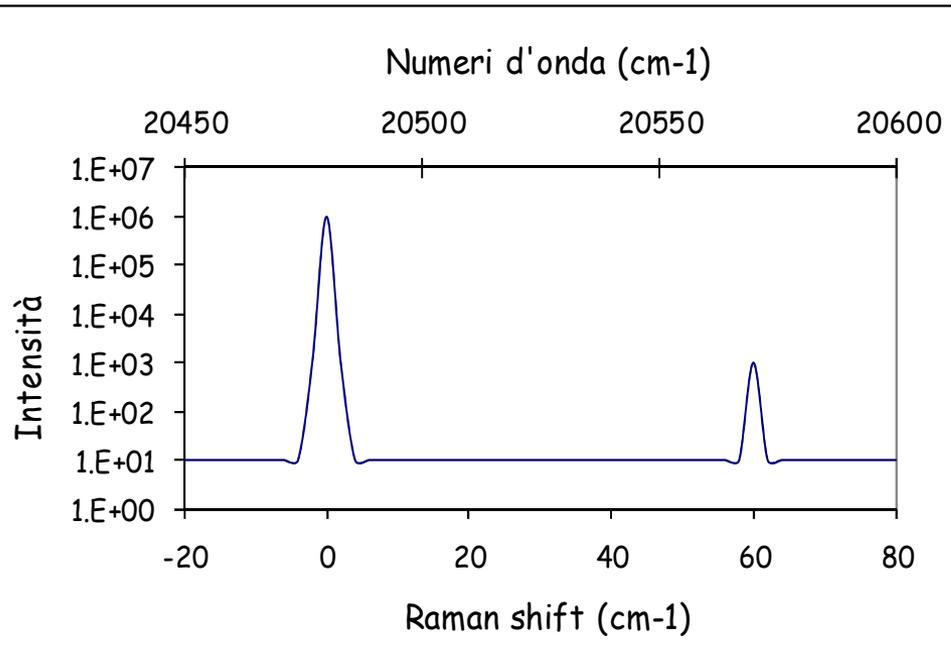
La spettroscopia Raman è una tecnica di analisi molecolare scoperta nel 1928 dal fisico indiano Raman. Egli scoprì che la differenza tra radiazione diffusa e radiazione incidente è legata alla struttura chimica delle molecole responsabili della diffusione.

La radiazione elettromagnetica interagendo con gli elettroni delle molecole induce su di esse un dipolo elettrico oscillante responsabile del processo di diffusione della radiazione incidente. Analizzando la radiazione diffusa, si possono distinguere componenti con diverse energie. Le componenti Stokes che hanno energie minori e le componenti anti-Stokes che hanno energie maggiori, rispetto alla radiazione incidente provengono da processi di diffusione anelastici.

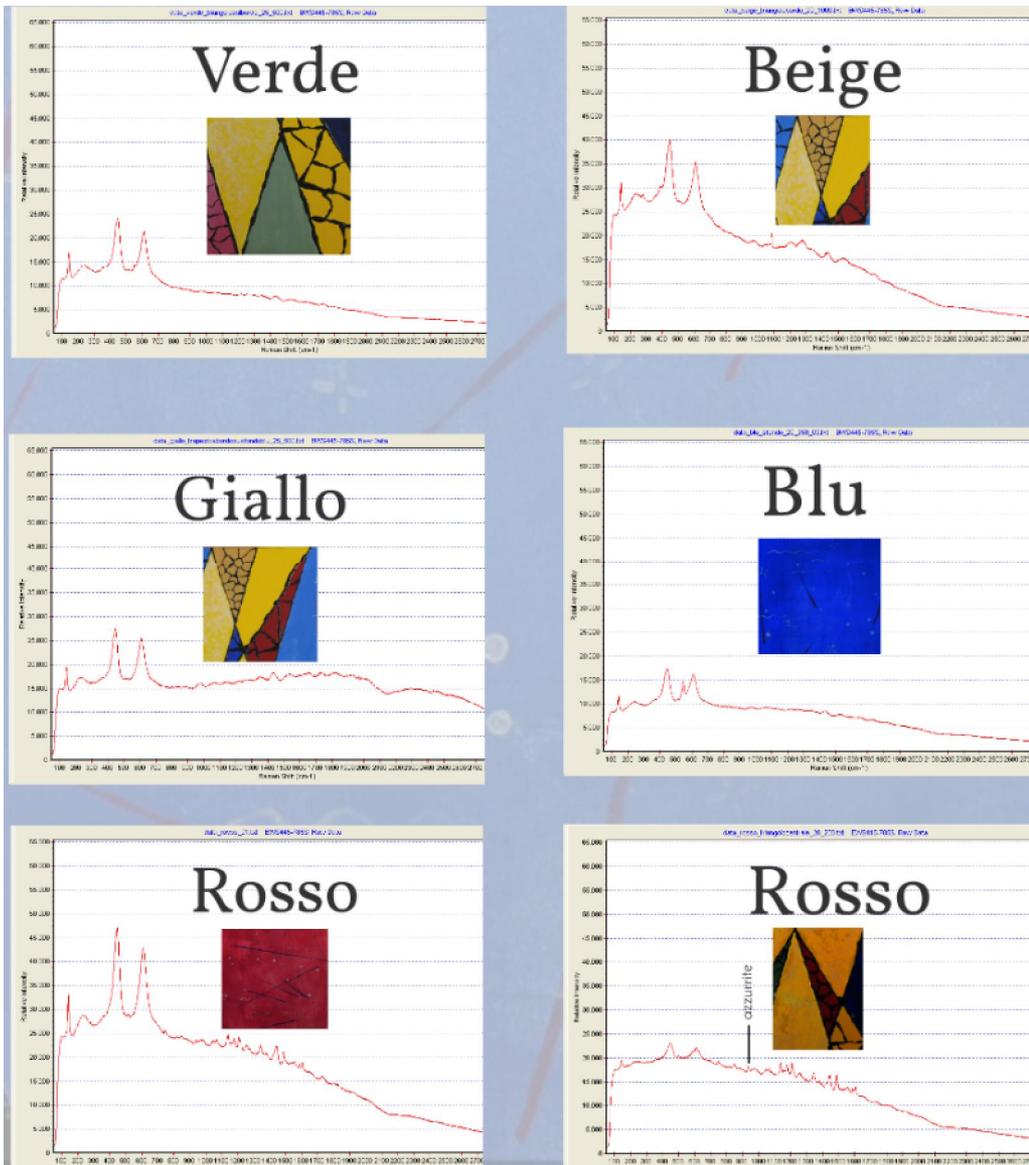
La spettroscopia Raman studia la composizione dei colori, in preparazione di eventuali restauri a seguito di uno scadimento della qualità.

Spettro Raman

Nello spettro Raman si ha in ordinata l'intensità di emissione luminosa e in ascissa lo spostamento Raman o Raman shift, cioè la differenza in numeri d'onda tra la radiazione osservata e la radiazione incidente.



Spettri Raman



Maria Tufano
 VETRATA
 1996
 Vinilico su tela preparata
 50 cm X 70 cm

Pregi e difetti della tecnica Raman

PRO:

- E' molto sensibile per l'analisi e l'identificazione dei composti, infatti ciascuna specie presenta un proprio caratteristico spettro Raman
- I tempi di misura sono estremamente brevi, la misura infatti richiede al massimo alcuni minuti
- La tecnica è non-distruttiva e può essere condotta anche in situ

CONTRO:

- Non tutti i composti forniscono uno spettro Raman, ad esempio i metalli
- Alcuni composti possono subire danneggiamento in seguito all'irraggiamento laser: diventa necessario controllare attentamente la potenza sul campione

Spettroscopia Raman



Olio su tavola



Olio su tela



Arazzo

Studi condotti da personale dei Laboratori Nazionali di Legnaro

Sommario

- Beni culturali e fisica nucleare
- Fisica dei beni culturali con acceleratori
- Fisica dei beni culturali senza acceleratori
- **La rete CH-net dell'INFN**



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Sito web

<http://chnet.infn.it/it/home-2/>

Le attività della rete CH-net afferiscono commissione
Trasferimento Tecnologico (TT) dell'ente.



Sedi aderenti a CH-net



17 strutture attive
in CH-net



Tecniche di fisica nucleare

Analisi in situ

Radiografie e tomografie X (TC)

Fluorescenza X (XRF)

Spettroscopia Raman

Diffrazione a raggi X (XRD)

Particle Induction X ray Emission con particelle α (PIXE- α)

Termografia

Analisi in laboratorio

Analisi con fasci di ioni (PIXE, PIGE, BS, IBIL, DPAA)

Radiografie e tomografie X (TC)

Fluorescenza X (XRF)

Microsonda a elettroni (SEM)

Fluorescenza indotta da laser (LIF)

Catodoluminescenza

Radiografia K-edge

Spettrometria SIMS

Spettrometria di massa (HR-ICP-MS)

Spettrometria di massa a ionizzazione termica (TIMS)

Datazioni

Radiocarbonio con spettrometria di massa con acceleratore (AMS)

Termoluminescenza e luminescenza otticamente stimolata

diagnostica

- conoscenza approfondita di opere d'arte e di reperti archeologici (datazione, materiali e tecniche peculiari di un artista, indagini sulla composizione dei materiali, tecniche di imaging, analisi del deterioramento)
- conoscenza ampia su tendenze e evoluzioni tecniche nel passato (acquisizioni di nuove tecnologie, apertura di nuove fonti di approvvigionamento dei materiali)

intervento

- supporto nelle decisioni sulle strategie di conservazione e restauro
- ruolo attivo nei procedimenti di restauro

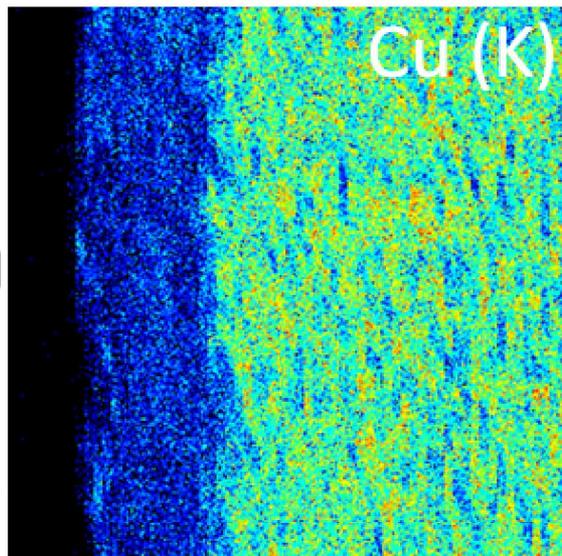
Conclusioni

- Tutte le tecniche di analisi scientifiche, combinate tra loro forniscono un risultato esaustivo sul bene culturale in esame.
- Le tecniche e gli strumenti di fisica nucleare hanno notevoli applicazioni nel campo dei beni culturali.
- Istituto Nazionale di Fisica Nucleare è impegnato nella fisica nucleare applicata ai beni culturali in una rete con 17 strutture (CH-net).
- In particolare, i Laboratori Nazionali di Legnaro ospitano un acceleratore Van der Graaff da 2 MeV, una delle cui linee di fascio è dedicata alla PIXE, e hanno in dotazione strumenti per analisi in situ con tecnica Raman e XRF.

Grazie per l'attenzione !!!

Altri contenuti

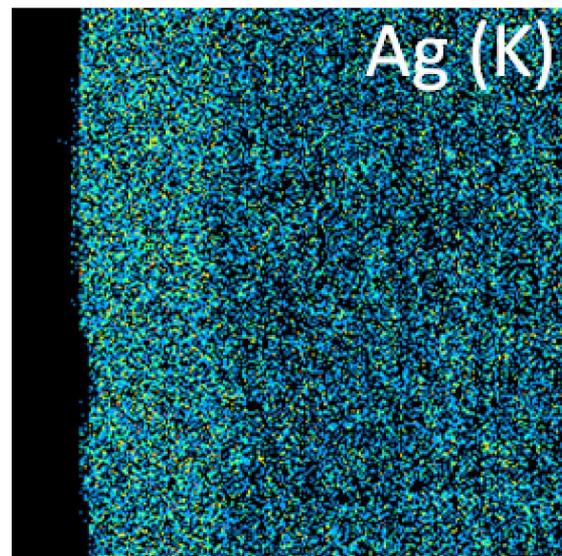
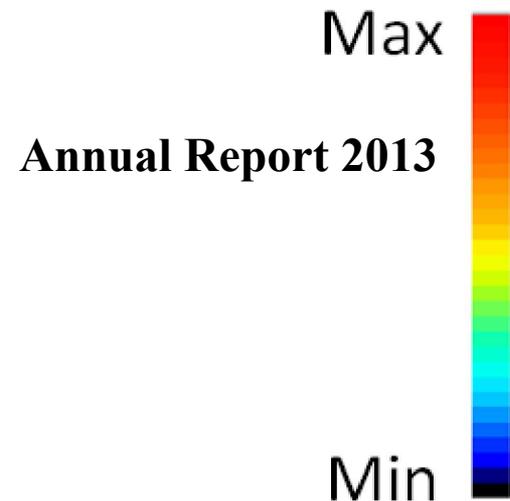
Analisi di antiche monete romane



Monete risalenti al II secolo AC
 Supporto con studi di metallurgia

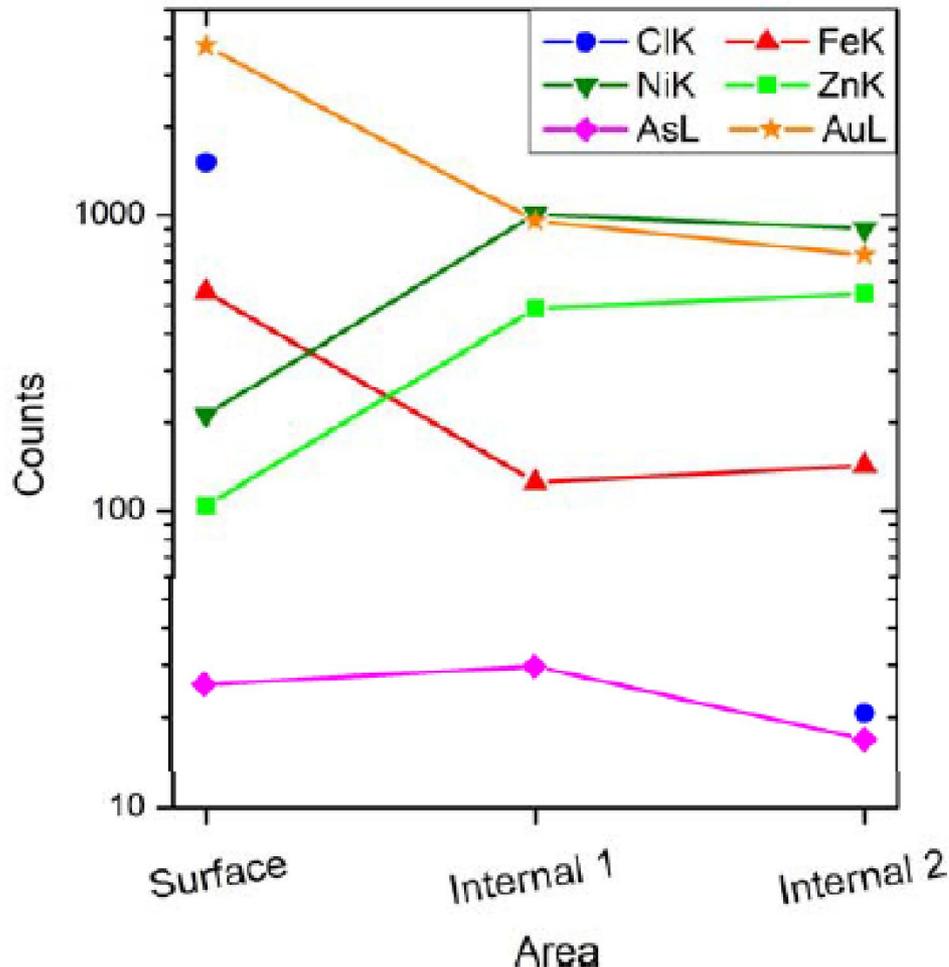
AN2000 a Legnaro
 Fascio di protoni a 2 MeV
 Diametro fascio = 5 μm
 Intensità = 500 pA
 Anno 2012

Mappe di una moneta romana:
 vista al microscopio
 distribuzione di rame Cu (PIXE)
 distribuzione di argento Ag (PIXE)



Ogni moneta ha una storia, non è un
 materiale preparato in laboratorio con
 tecniche moderne (i risultati possono
 variare molto in oggetti simili)

Analisi di antiche monete romane



Distribuzione degli elementi minori

Cloro e Ferro presenti in superficie
 → seppellimento in terra o acqua

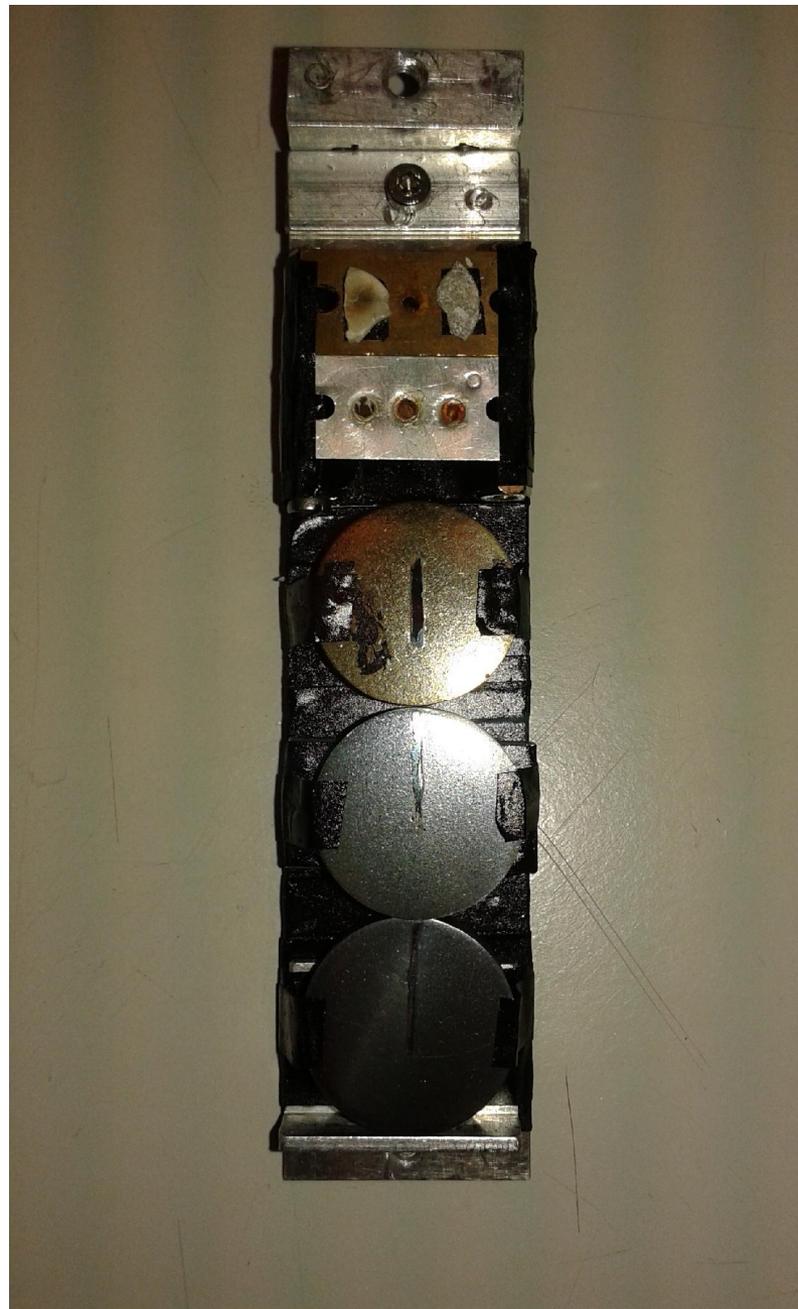
Oro presente in superficie
 → collegamento con strato d'argento

Zinco e Nichel presenti nell'interno
 → relazione con il rame

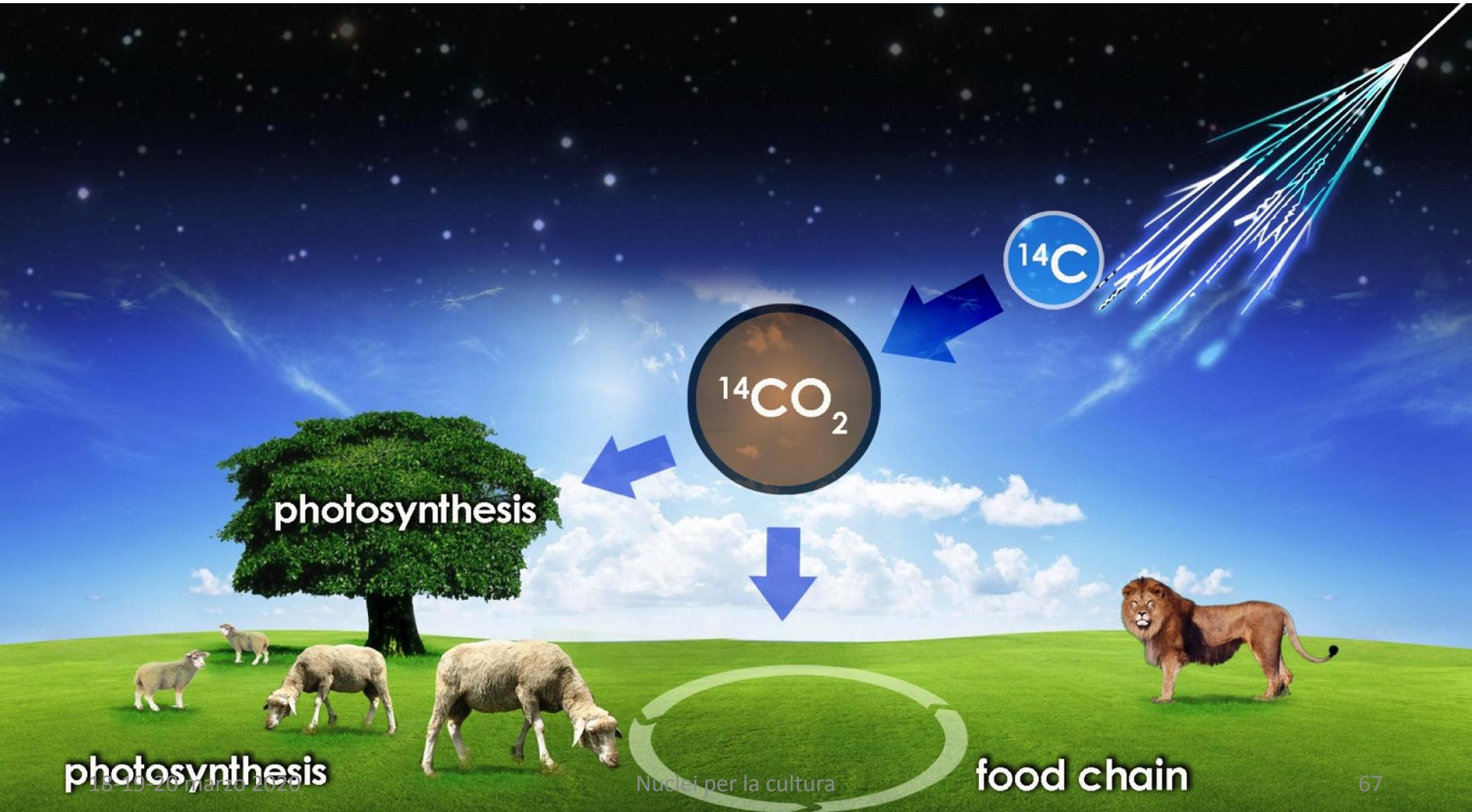
Annual Report 2013

Lo strato di argento in superficie è spesso intorno a (100-150) μm , a dimostrazione delle fini lavorazioni di quell'epoca.

Monete pronte per misura



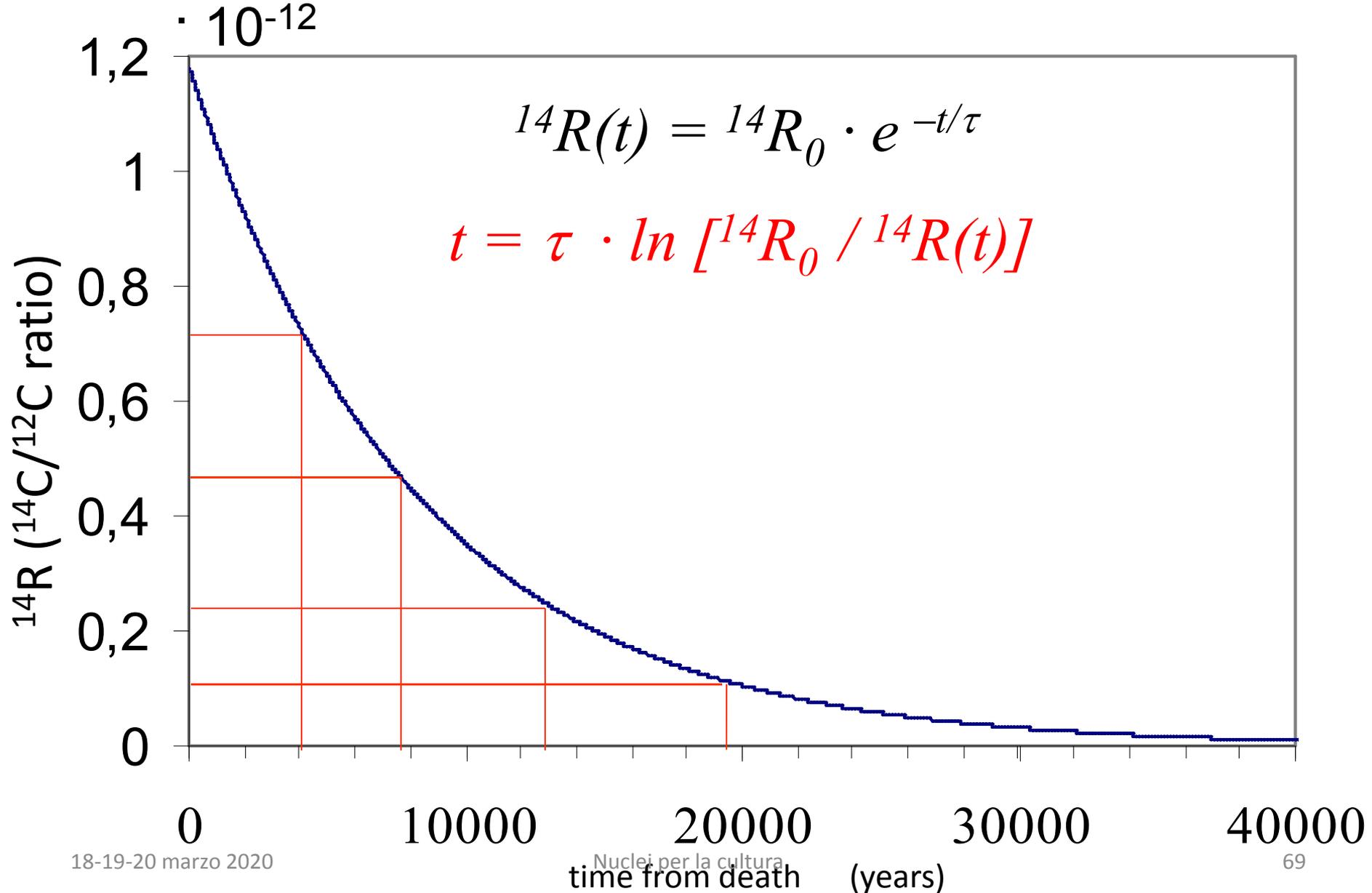
Principio delle datazioni col ^{14}C



Principio delle datazioni col ^{14}C

A partire dalla morte di un organismo, il decadimento radioattivo del ^{14}C non è più “compensato” da alcun apporto per vie metaboliche. Perciò, la concentrazione del ^{14}C nei resti di un organismo, dopo la morte progressivamente diminuisce.

In linguaggio matematico ...



La misura di concentrazione di radiocarbonio è la chiave per datare tutti i reperti di origine organica (data \equiv tempo dalla morte dell'organismo di origine):

ricostruzione cronologica assoluta di sequenze archeologiche

autenticazioni di opere d'arte

compatibilità di reliquie con la loro presunta attribuzione

Come si misurano concentrazioni residue così
piccole di ^{14}C ?

Con metodi e strumenti della Fisica Nucleare:
in particolare, usando acceleratori di
particelle, con la tecnica della

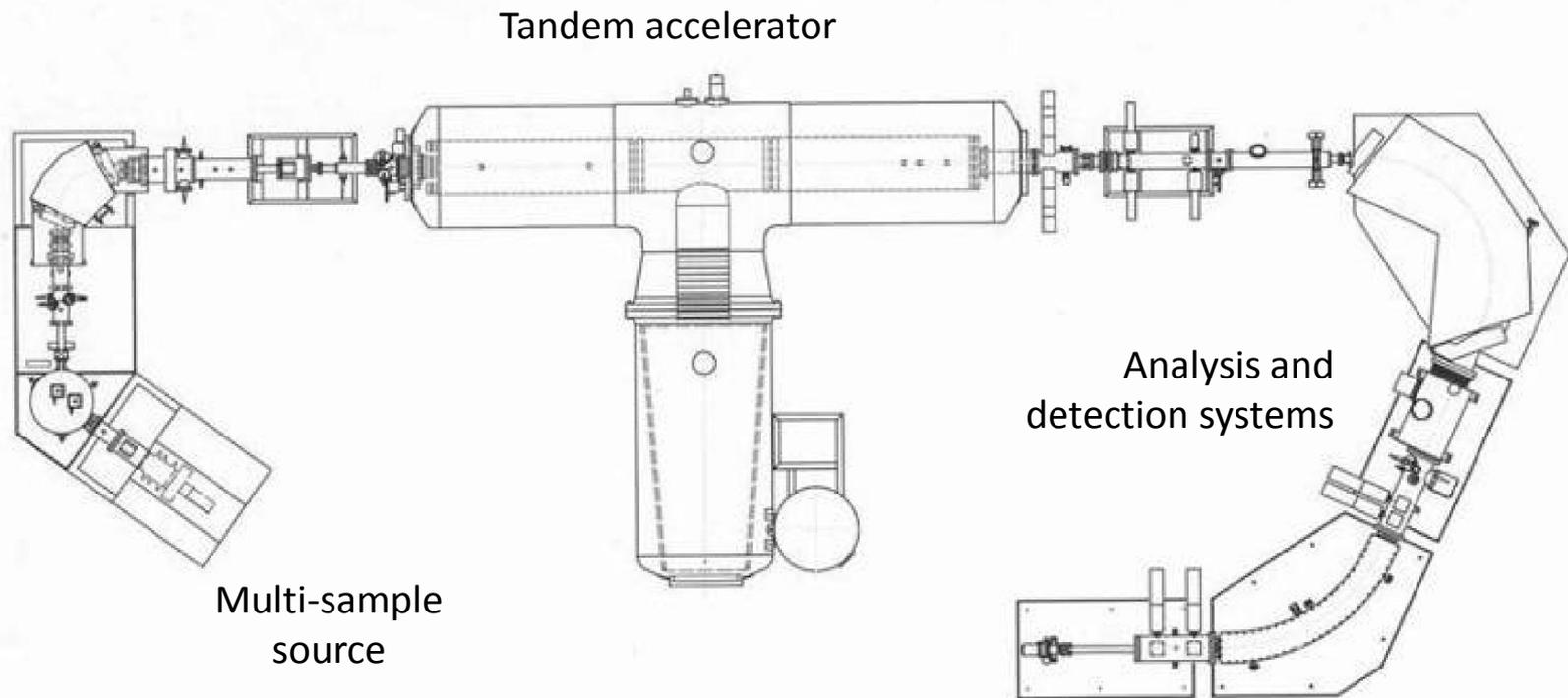
Accelerator Mass Spectrometry
(AMS)

Nell'AMS, si mette nella sorgente di ioni di un Tandem una piccola quantità di grafite, ottenuta dal carbonio del reperto da datare, ottenendone un fascio “estraendo” gli atomi dal materiale.

Dopo aver accelerato gli ioni a energie elevate, si possono separare a seconda delle diverse masse sfruttando le traiettorie differenti che ioni di masse diverse fanno in campi magnetici e elettrici.

Misura del ^{14}C con AMS

Lo *stripping* al terminale ad alta tensione
“distrugge” gli isobari molecolari ^{13}CH e
 $^{12}\text{CH}_2$ rompendo i legami fra i C e gli H



negativi (elimina
l'interferenza del ^{14}N)

sistemi di rivelazione ad alta energia
(rimuove le interferenze residue)

La sfida dell' AMS è ...

raggiungere un'enorme sensibilità
pur mantenendo alta precisione

In effetti, occorre misurare concentrazioni di ^{14}C
bassissime (fino a 10^{-15}) con
piccola incertezza

(ad esempio: un errore dello 0.5% sulla concentrazione
corrisponde a 40 anni sull'età)

La spettrometria di massa con acceleratore
ci riesce

Misura del ^{14}C con AMS

Sensibilità a concentrazioni fino a 10^{-15}

*sono databili reperti risalenti fino a oltre
50000 anni fa*

... e bastano piccolissime quantità di materiale
(pochi milligrammi, o anche meno)

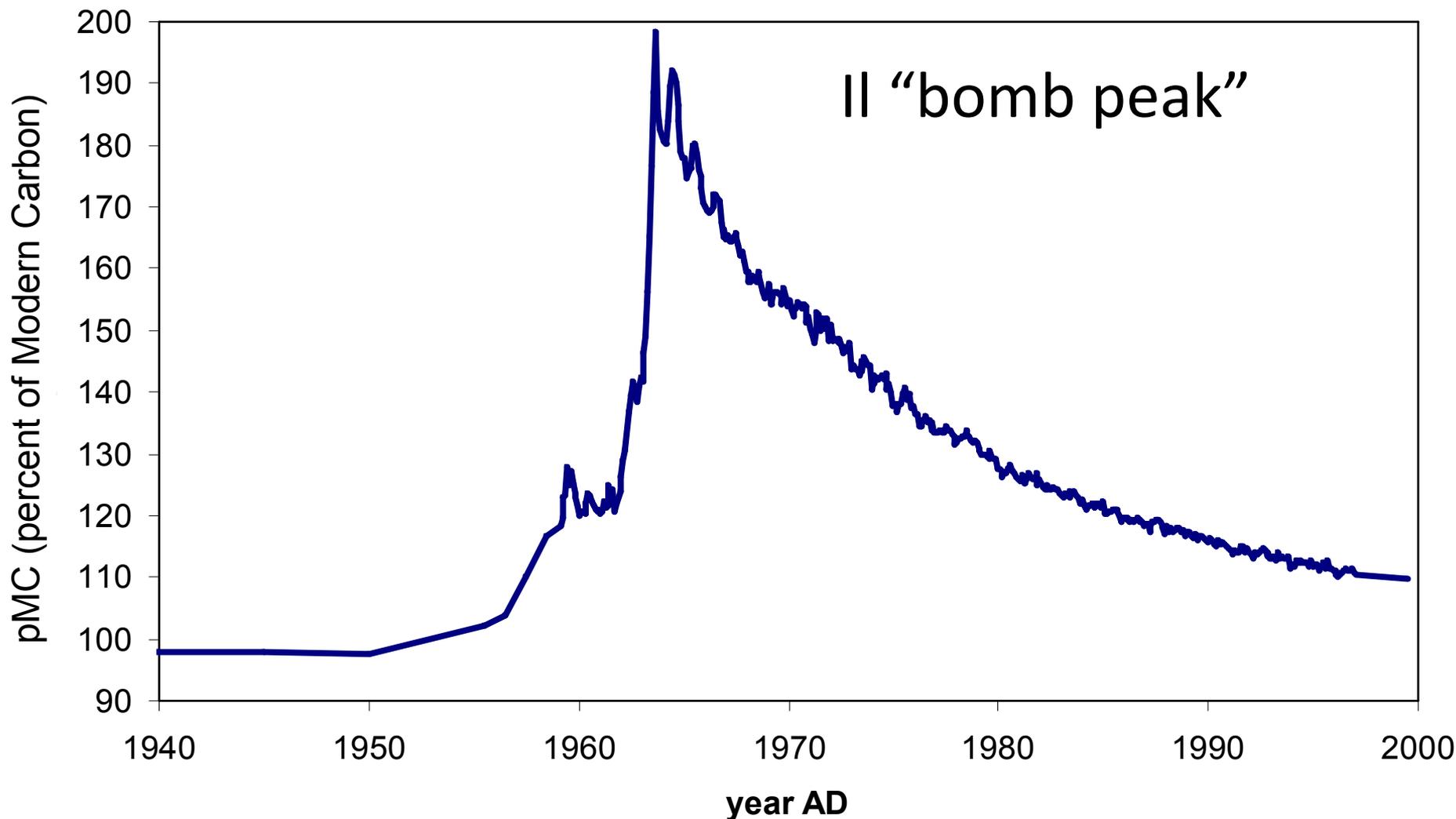




Le applicazioni tradizionali delle datazioni col ^{14}C sono in archeologia o per reperti storici.

Recentemente tuttavia INFN LABEC ha proposto e applicato con successo una idea originale per sfruttare misure di ^{14}C per la scoperta di falsi di arte contemporanea.

Sfruttare l'effetto delle esplosioni nucleari in atmosfera durante la guerra fredda



Quando si misura la concentrazione di ^{14}C di un supporto di un quadro, si ottiene solo un *terminus post quem* per la creazione dell'opera.

In caso di sospetti sull'autenticità, anche se la data del supporto “torna” con la data presunta del quadro, si può solo dichiararne la “compatibilità”.

Ma se viene fuori che il supporto risale a un periodo più recente della presunta data di esecuzione del quadro, non c'è dubbio:

in questo caso si tratta di

una prova inequivocabile di un falso!

Fernand Léger, Contraste de Formes

olio su tela, 92x73 cm

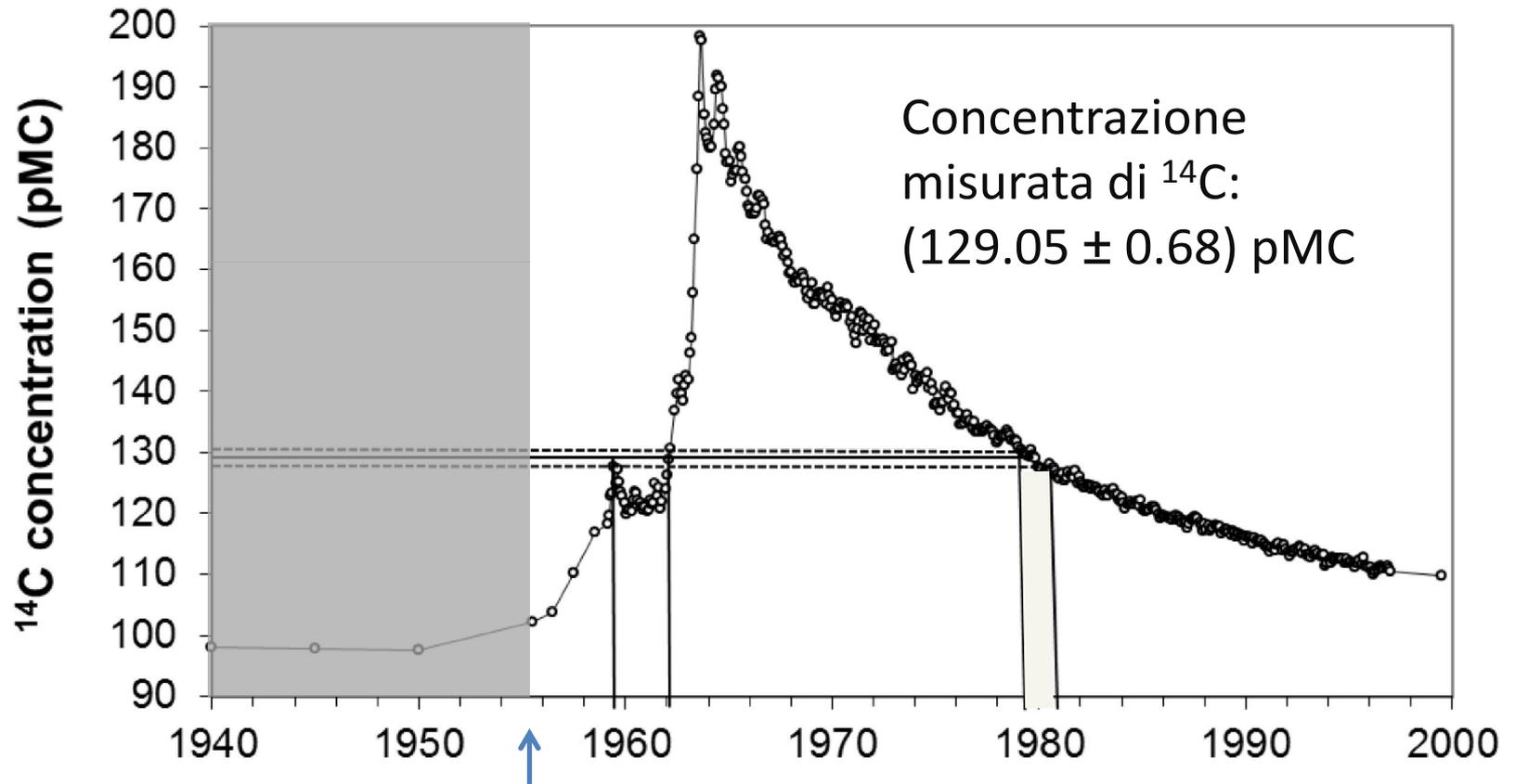
presunto dipinto del 1913-14

acquistato da Peggy
Guggenheim per la Venice
Foundation alla fine degli
anni '60

mai esposto al pubblico a
causa di sospetti subito
insorti che si trattasse di un
falso
(notevolissimo esempio di
correttezza)



La tela era stata prodotta con
piante di cotone tagliate nel
1959, o 1962, o 1979-80



morte di Léger \rightarrow il dipinto è falso