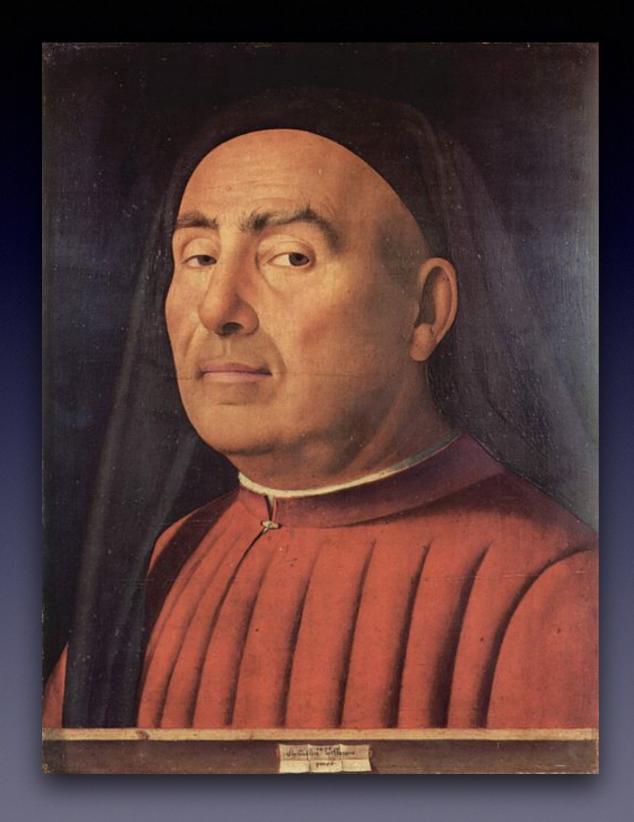


Beni Culturali con acceleratori

Mariaelena Fedi CHNet (Cultural Heritage Network) INFN Sezione di Firenze

Cosa hanno in comune?





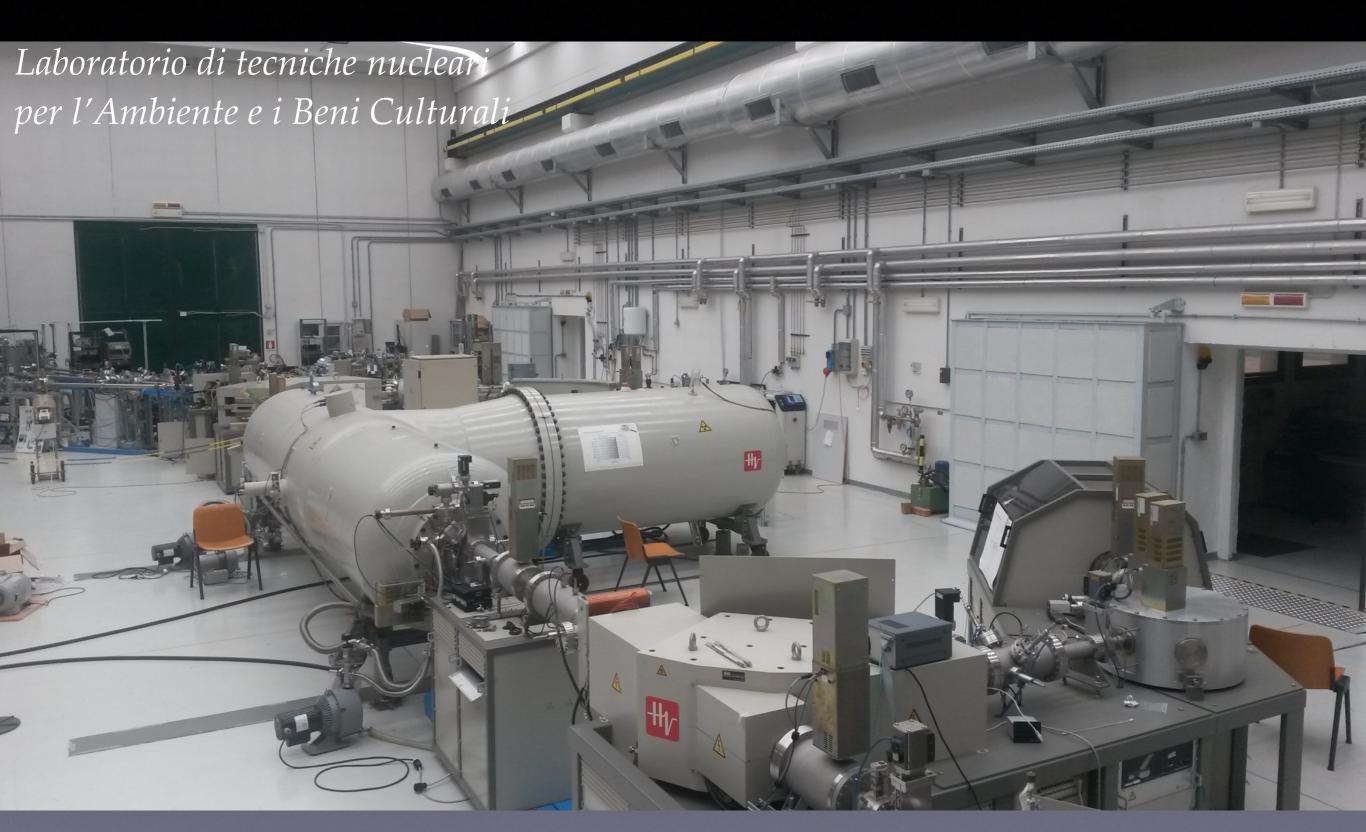
PID-LNL Programma INFN per Docenti 2020 Laboratori Nazionali di Legnaro

Cosa hanno in comune?





Un acceleratore elettrostatico di tipo tandem



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)

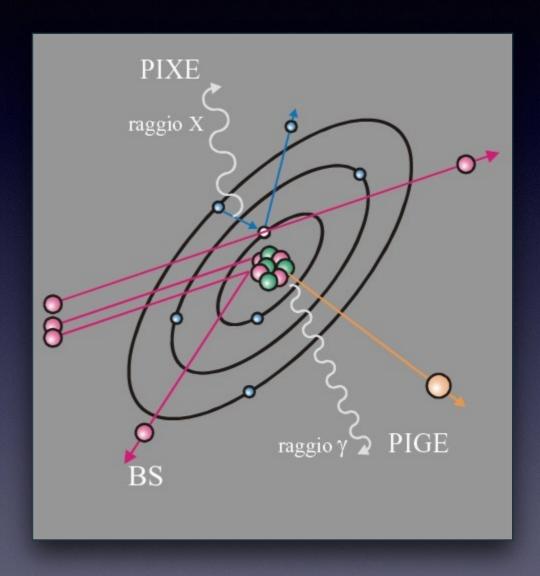


Accelerator Mass Spectrometry (AMS)

Misura della concentrazione di ¹⁴C

Ion Beam Analysis

- PIXE -> misura dei raggi X emessi -> analisi degli elementi
- PIGE -> misura dei raggi gamma emessi -> analisi di alcuni isotopi leggeri (per es. F, Na, Mg)
- BS -> misura delle particelle del fascio "rimbalzate" all'indietro
 -> analisi della componente organica (C, N, O)
- IBIL -> misura della radiazione luminosa uv-vis -> analisi di alcuni legami molecolari
- NRA -> misura delle particelle prodotte nelle interazioni nucleari -> analisi di isotopi



L'idea alla base della tecnica PIXE



Rivelatore

E_x= E₁-E_b

E_b

Campione-bersaglio

L'idea alla base della tecnica PIXE

- · Le energie degli elettroni nei diversi livelli atomici sono caratteristiche di ciascuna specie atomica
- · Anche le differenze tra di esse, cioè le energie dei raggi X, sono caratteristiche della specie atomica da cui sono emessi

Misuriamo l'energia dei raggi X



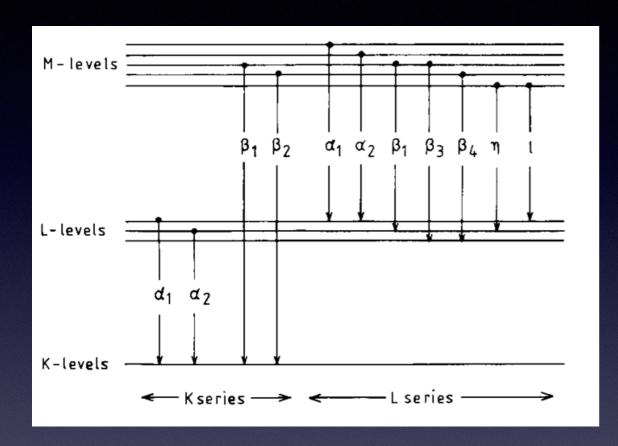
Identifichiamo l'elemento presente nel campione-bersaglio

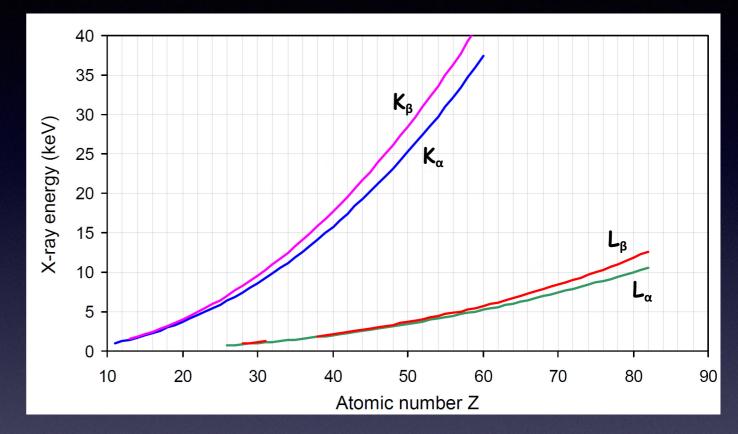
Contiamo quanti sono i raggi X di una certa energia



Possiamo stimare la concentrazione di quell'elemento

Le energie dei raggi X





Al \rightarrow 1.49 keV (K_{α})

 $Ca \rightarrow 3.69 \text{ keV } (K_{\alpha})$

Fe \rightarrow 6.40 keV (K_{α})

Pb \rightarrow 10.55 keV (L $_{\alpha}$)

•••

Come si costruisce l'esperimento

- Un acceleratore di particelle

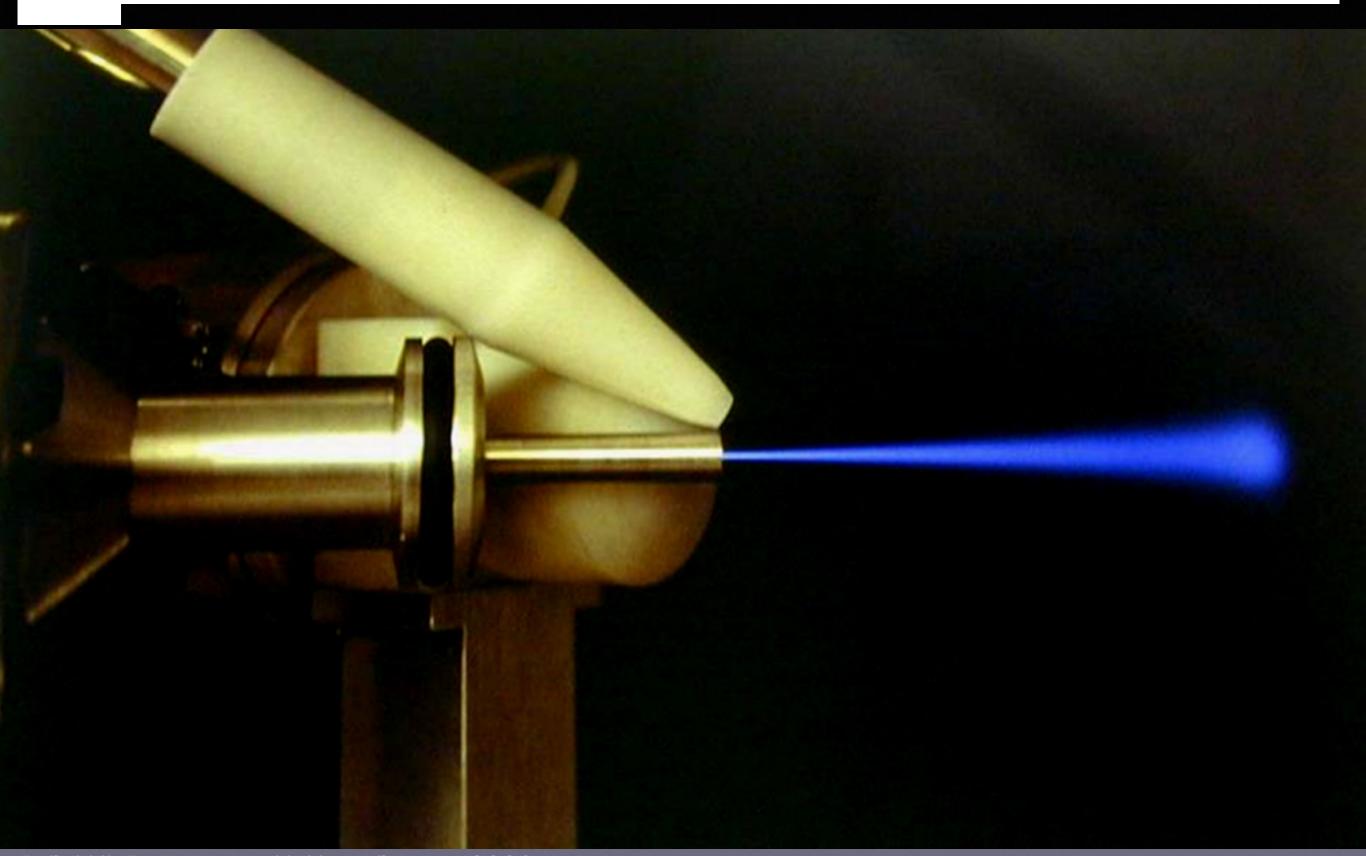
 il fascio di protoni che colpisce il bersaglio e stimola l'emissione di raggi X
- · Il campione-bersaglio
- Un (almeno) rivelatore sensibile ai raggi X
- · Una catena di elettronica e un sistema di acquisizione per raccogliere il segnale del rivelatore e visualizzare i dati



Si potrebbe prelevare un piccolo campione dall'opera

Oppure...

... si può estrarre il fascio in atmosfera



PID-LNL Programma INFN per Docenti 2020 Laboratori Nazionali di Legnaro



PID-LNL Programma INFN per Docenti 2020 Laboratori Nazionali di Legnaro

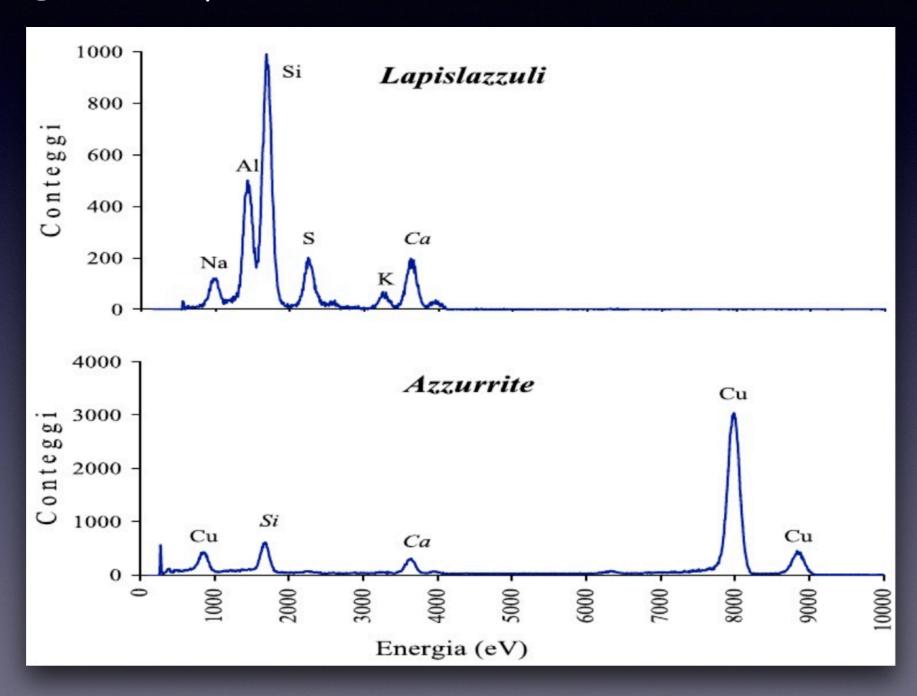
Pregi e limiti

- · Potendo lasciare il campione in atmosfera, non c'è alcuna necessità di prelievo -> misure non invasive e non distruttive
- La probabilità che venga emesso un raggio X è, fissato il numero di particelle incidenti, molto alta -> misure molto veloci
- · La PIXE è multielementale

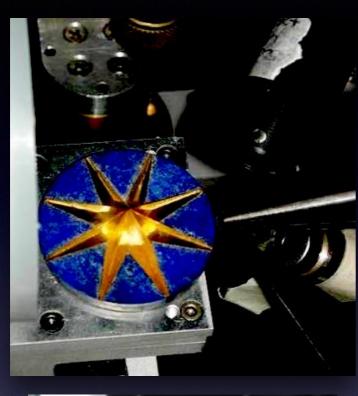
- · I raggi X emessi dagli elementi organici hanno un'energia molto bassa e non sono rilevabili in set-up esterni
 - Nei set-up in esterno sono rilevabili tutti gli elementi a partire dal sodio
- · Non si hanno informazioni dirette sui legami chimici ma solo sugli elementi
- · Dobbiamo portare in laboratorio i campioni da misurare

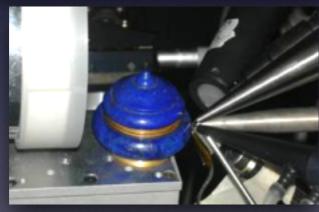
Come sono organizzati e visualizzati i dati

In istogrammi (spettri)



Tante applicazioni





"Collezione Medicea di Pietre Ornamentali" del Museo di Storia Naturale, Università di Firenze



Galileo Galilei, lettera autografa, Biblioteca Nazionale di Firenze

Tante applicazioni

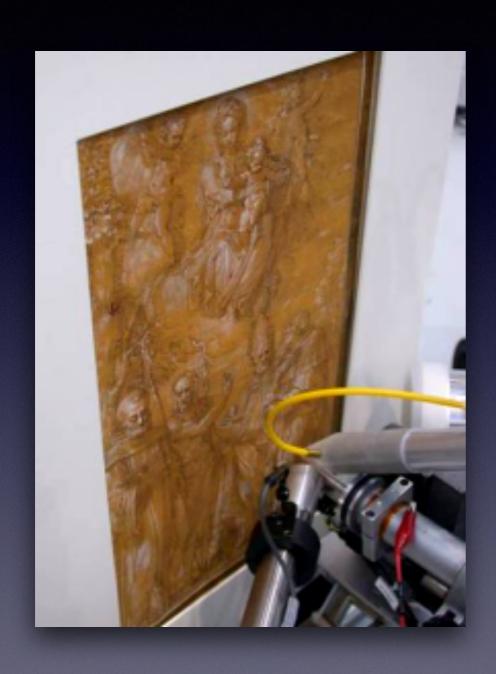


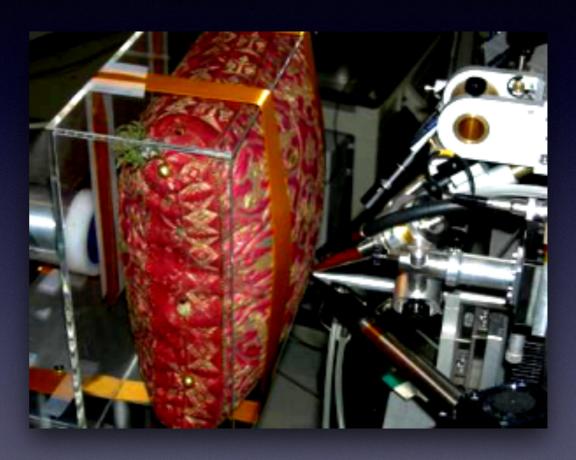
Leonardo da Vinci, Madonna dei Fusi



Antonello da Messina, Ritratto Trivulzio, Palazzo Madama Torino

Tante applicazioni

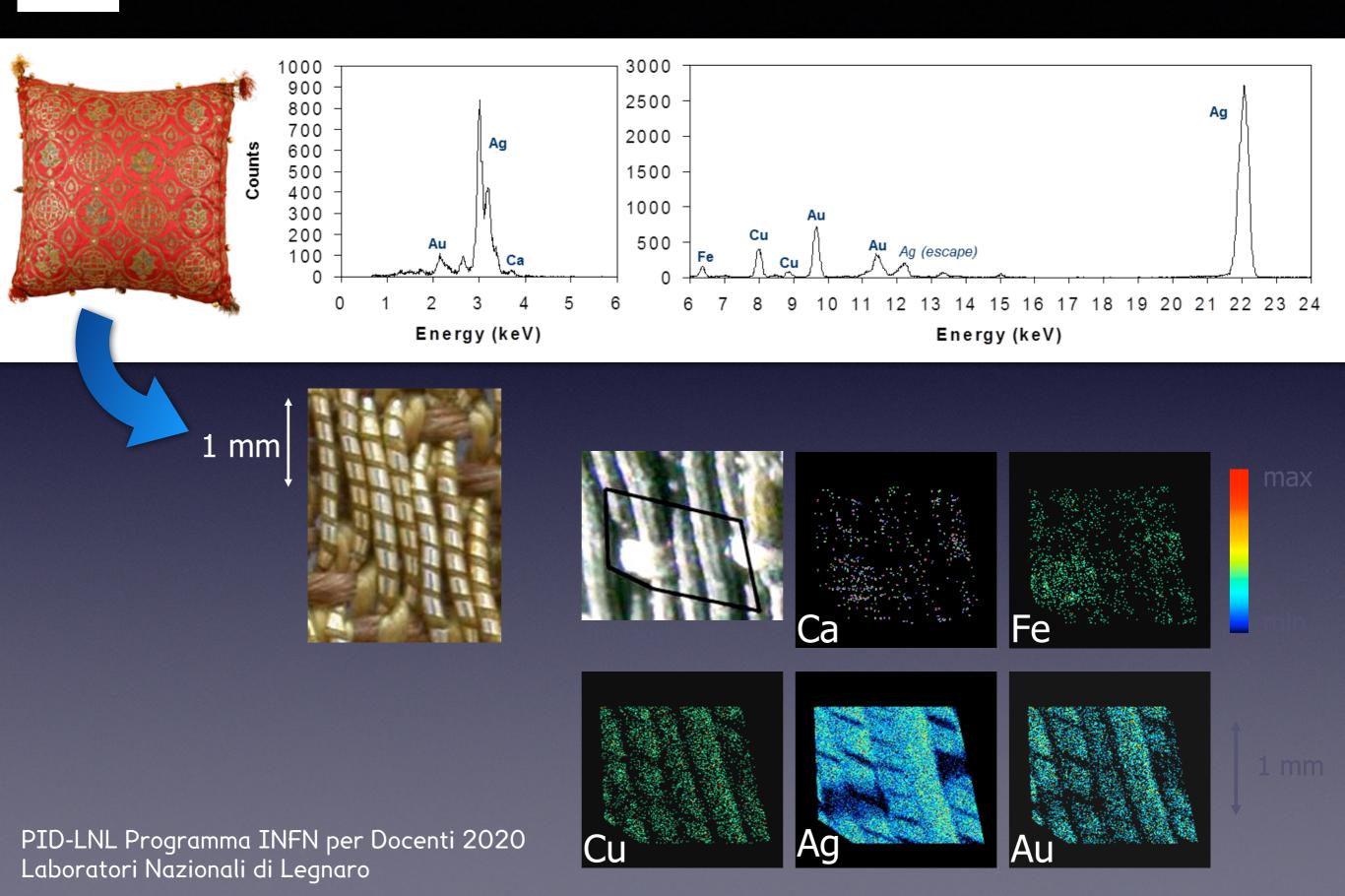




Non solo misure per punti

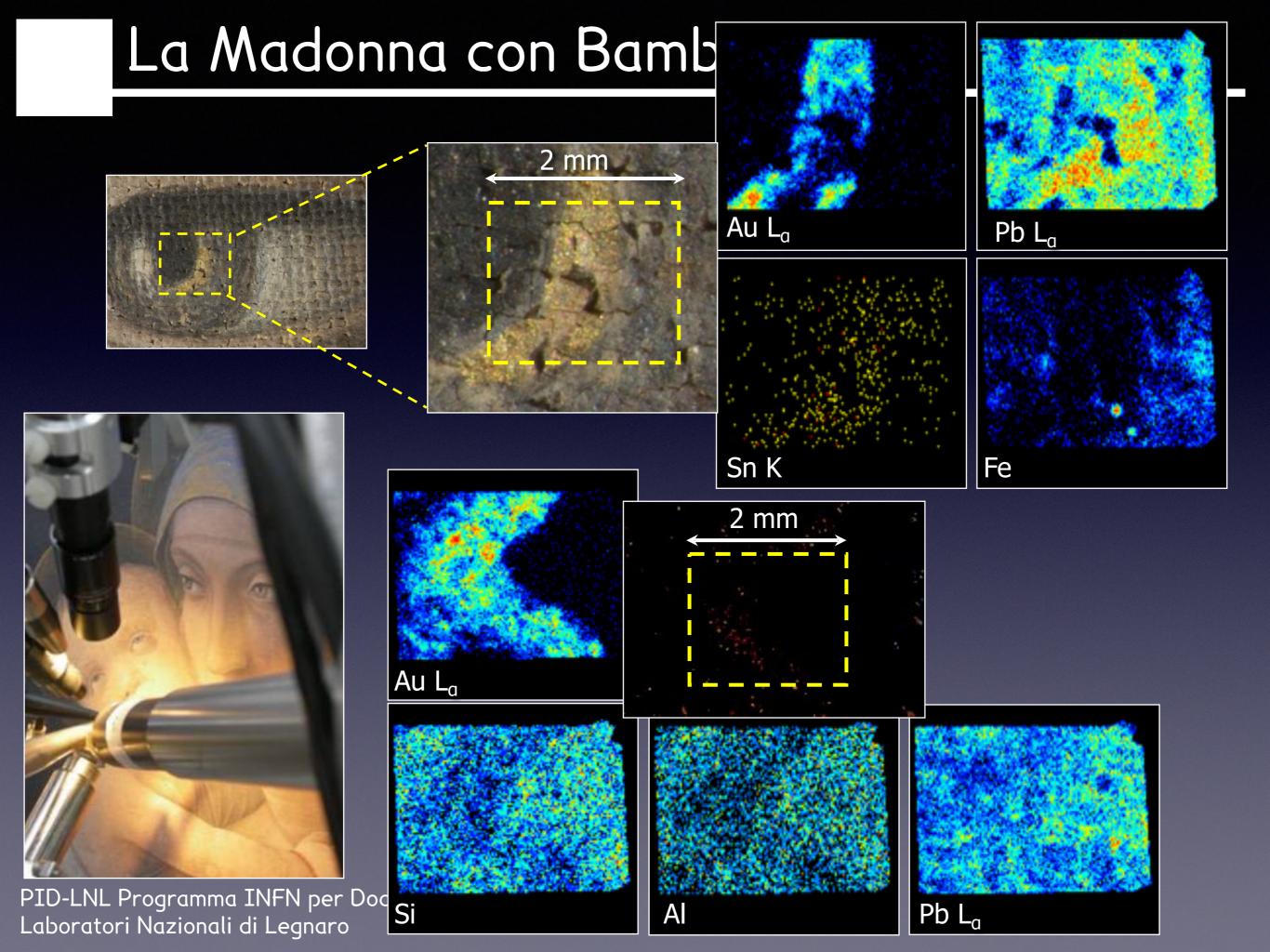
- · Si possono ottenere dei fasci molto piccoli (~µm) con dei sistemi di lenti magnetiche fortemente convergenti
 - Si può spostare il bersaglio rispetto alla finestra di estrazione del fascio
 - -> Per ogni "punto" analizzato si possono acquisire l'energia dei raggi X emessi, oltre che le coordinate di quel punto
 - \rightarrow (x_i, y_i, E_z)
 - -> distribuzione di come sono distribuiti gli elementi: mappe elementali

I ricami del cuscino di San Francesco



La Madonna con Bambino di Mantegna





Parlando di spessore investigato

· Le informazioni che otteniamo sono un "integrale" su tutto la profondità sondata del bersaglio



Ma di quali spessori parliamo?

Dipende:

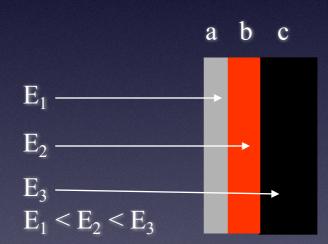
- Energia delle particelle del fascio —> cambia il range all'interno del bersaglio
- Composizione del bersaglio —> cambia la probabilità che i raggi X siano assorbiti all'interno



Qualche decina di µm (generalmente < 100 µm)

Energie del fascio diverse per...

- · Cambiando l'energia del fascio incidente variano:
 - · Il range dei protoni all'interno del bersaglio
 - · La probabilità che venga emesso un X da un dato elemento (sezione d'urto di produzione X)



PIXE differenziale

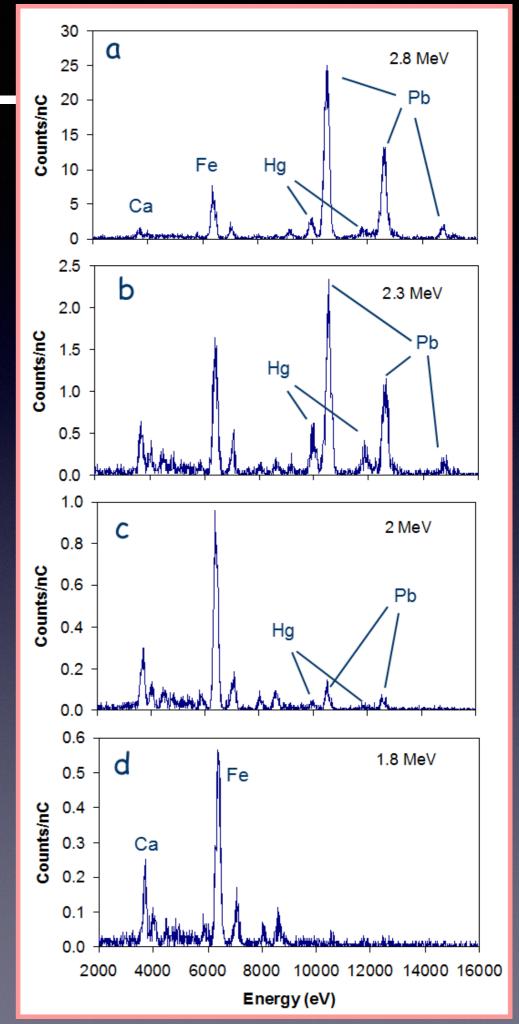
Un esempio da Leonardo



- · Hg -> cinabro
- · Pb -> bianco di piombo

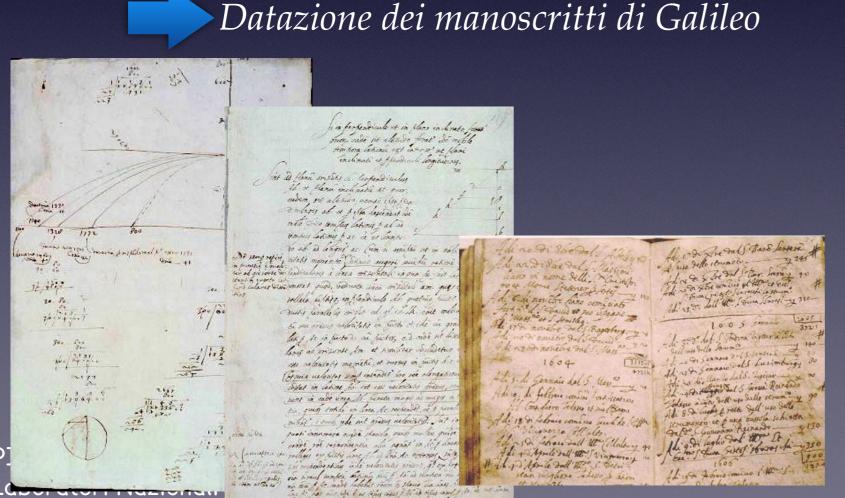
In b) e c), Hg/Pb aumenta rispetto ad a): lo strato di preparazione non viene più raggiunto dal fascio di protoni, perciò il suo contributo al picco del Pb scompare. In d), non sono presenti né Hg né Pb: i protoni si fermano nella vernice

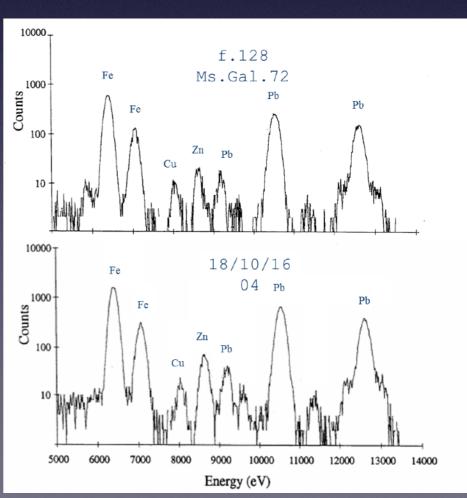
· Fe, Ca -> vernice



Dalla composizione alla datazione (indiretta)

- · Un dipinto: determinati pigmenti sono stati utilizzati solo in determinati periodi storici
- · Gli inchiostri di un manoscritto: le concentrazioni degli elementi presenti in traccia possono variare molto a seconda del periodo (grazie alle procedure artigianali di fabbricazione)







... MACHINA!

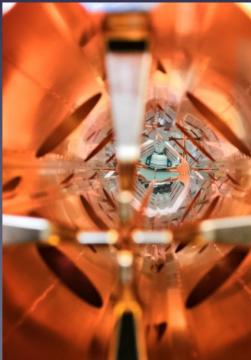
Movable Accelerator for Cultural Heritage In-situ Non-destructive Analysis



 Il primo acceleratore di protoni (E=2 MeV) trasportabile -> sarà installato presso l'Opificio delle Pietre Dure di Firenze

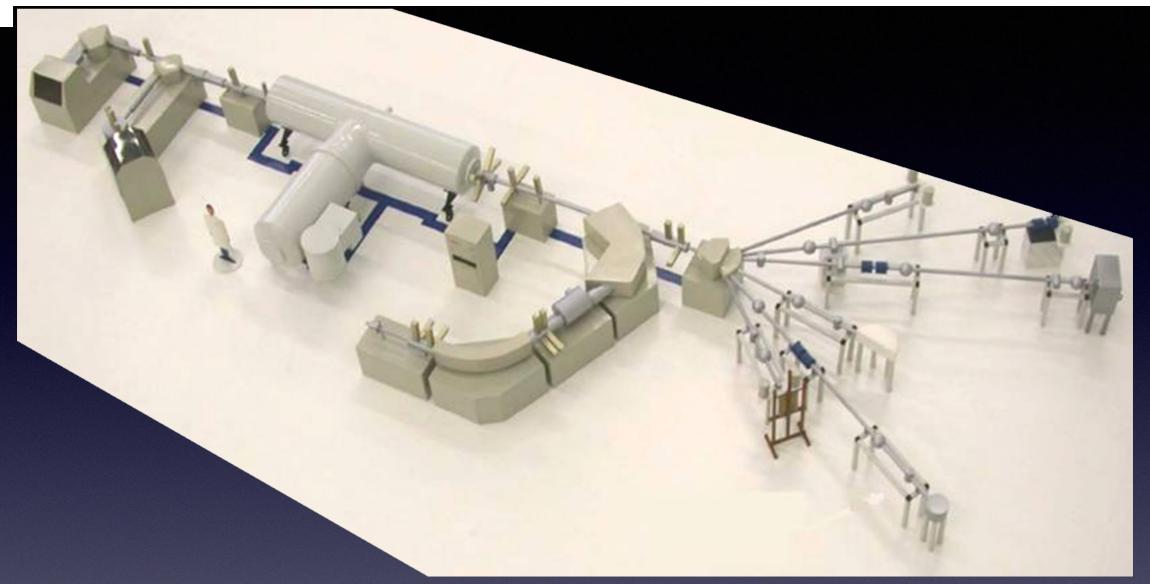






Contatti, per INFN:

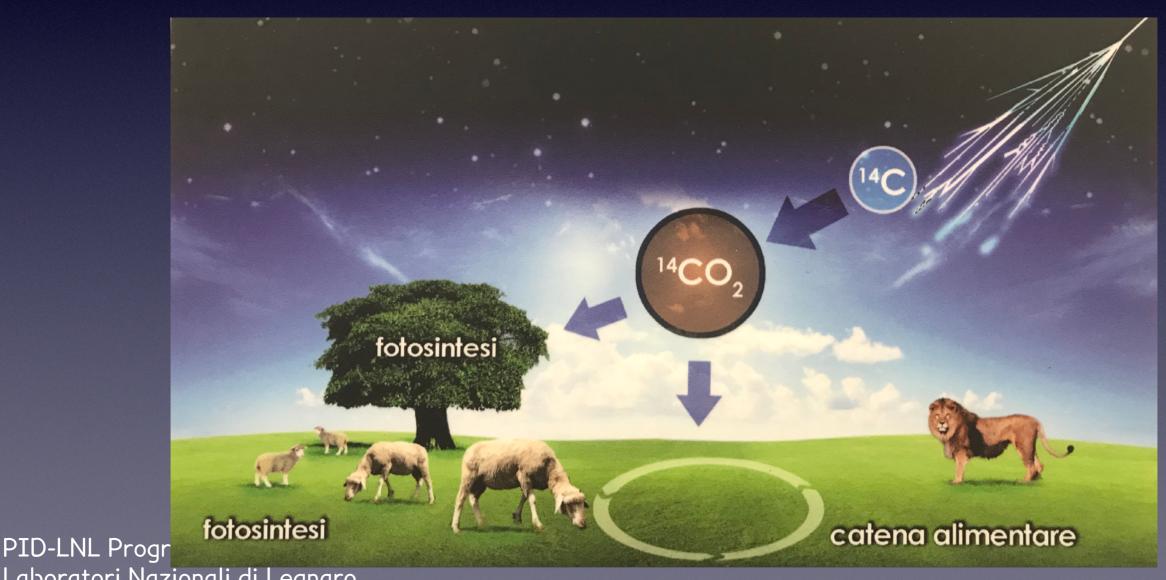
Accelerator Mass Spectrometry



- · Particelle cariche in un campo magnetico compiono traiettorie con raggi di curvatura diversi a seconda della loro massa (a parità di energia)
- Un acceleratore tandem permette di inserire dei "filtri" per sopprimere particelle interferenti

Un isotopo raro: il ¹⁴C (o radiocarbonio)

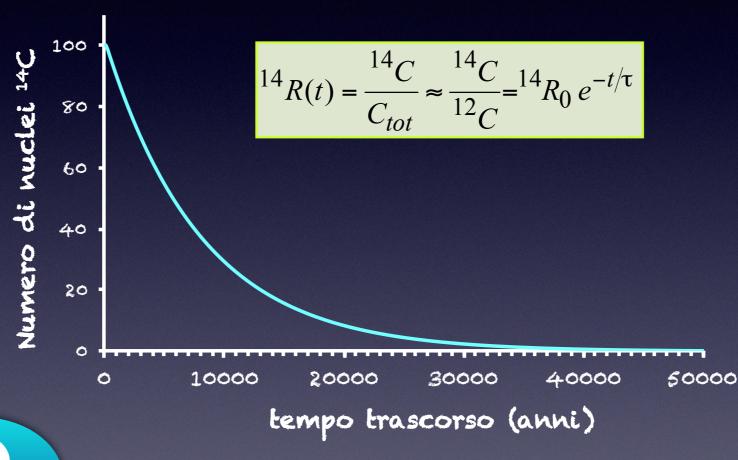
- · Il ¹⁴C è uno degli isotopi naturali del carbonio (insieme a ¹²C e ¹³C)
- · Si trova in atmosfera, negli oceani e in tutti gli organismi (o sistemi) in equilibrio con l'atmosfera e gli oceani stessi



Laboratori Nazionali di Legnaro

Il ¹⁴C è radioattivo

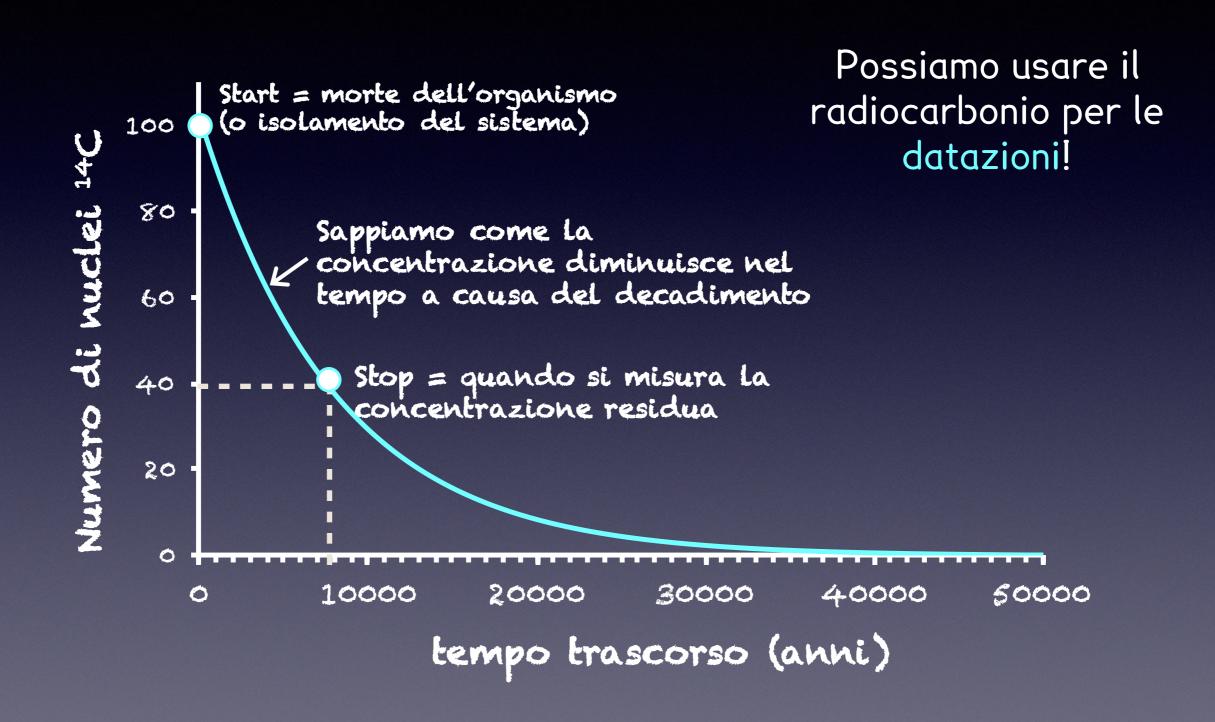
· Il nucleo ha una certa probabilità di trasformarsi in un nucleo di ^{14}N (decadimento β -)





Ma allora quanto ¹⁴C si trova in natura? La concentrazione è dell'ordine di 10-¹²

L'idea di base della datazione con ¹⁴C



L'età convenzionale di radiocarbonio

$$t = \tau \cdot \ln \left(\frac{^{14}R_0}{^{14}R(t)} \right)$$

- · Si parla di età convenzionale di radiocarbonio se:
 - τ = 8033 anni (vita media di Libby)
 - 14R₀ è scelta per convenzione come la concentrazione in atmosfera nel 1950
- · L'età convenzionale di radiocarbonio si misura in anni BP

- · Bisogna ricordarsi sempre di correggere ¹⁴R(t) misurata per gli effetti di frazionamento isotopico
- · Bisogna calibrare l'età convenzionale per avere la miglior stima dell'età vera del reperto

Quindi...

- · Cosa possiamo datare:
 - · Quei materiali che sono derivati da un organismo un tempo vivente
 - Quei sistemi, anche inorganici, che hanno acquisito carbonio perché erano in equilibrio con l'atmosfera o con gli oceani, e per i quali è identificabile uno "start"
- · Quale evento si data:
 - Sempre e solo la "morte" dell'organismo

Perché l'acceleratore

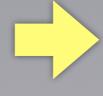
- · Il numero di atomi che vogliamo contare è molto basso
- · Esistono elementi e/o molecole che hanno caratteristiche molto simili al radiocarbonio ma che sono molto più abbondanti
- Per fare la misura è necessario prelevare un campione -> deve essere di piccola massa
- · E' importante cercare di fare misure veloci

Accelerator Mass Spectrometry

Cosa misuriamo delle

particelle:

- Energia
- Carica
- Massa

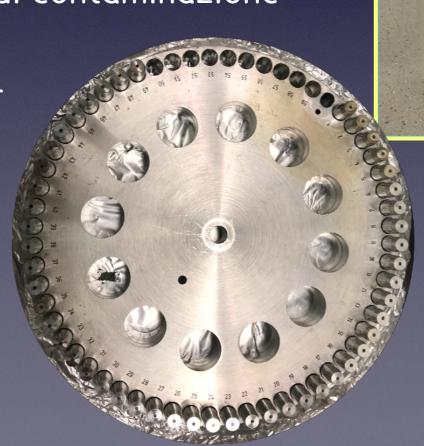


Per identificare e contare separatamente 12C, 13C e 14C

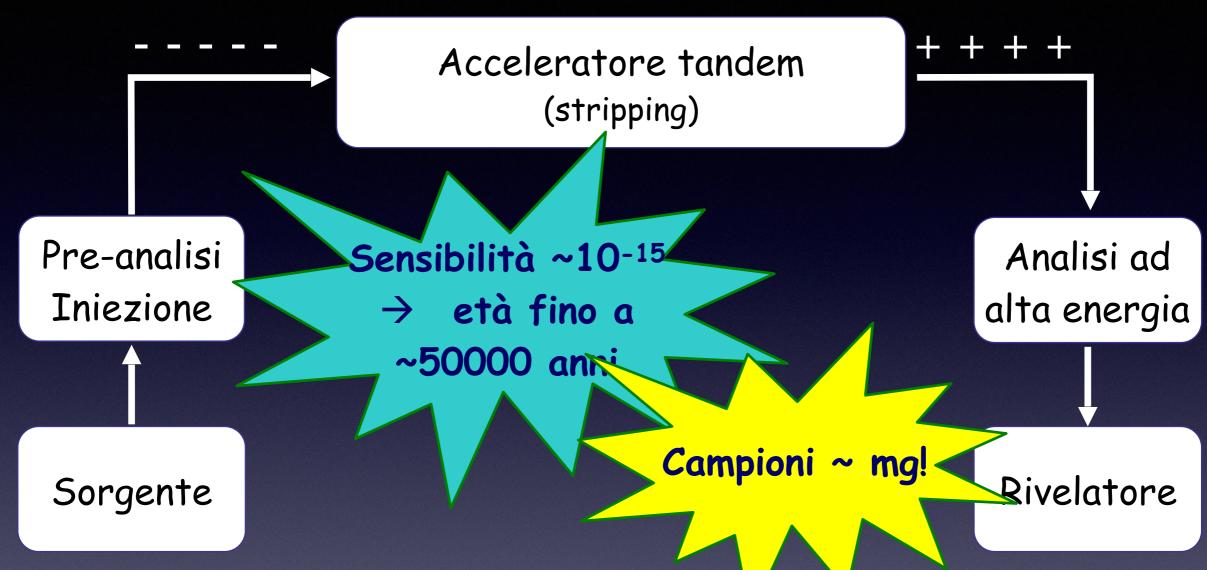
Gli step per la datazione

- · Selezione dei campioni:
 - · Identificazione del materiale
 - · Identificazione del contesto di ritrovamento
 - · Informazioni sullo stato di conservazione
- · Preparazione dei campioni
 - · Per eliminare possibili fonti di contaminazione
 - Per ridurre i campioni alla forma chimica più adatta per la misura
- Misura in acceleratore e analisi dati





Schema generale di una linea AMS



- · L'alta sensibilità (fino a ~10⁻¹⁵) è raggi<mark>v</mark>nta grazie all'elevata rimozione degli interferenti
 - · ¹⁴N → in sorgente
 - · ¹²CH₂, ¹³CH → al terminale con il processo di stripping

Siti archeologici







Baratti, Toscana – periodo etrusco e romano imperiale





Erimi Laonin Tou Porakou, Cipro – Età del Bronzo e periodo ellenistico

Opere d'arte



F. Léger (attr.), Contraste des Formes

PID-LNL Programma INFN per Docenti 2020 Laboratori Nazionali di Legnaro



Cornice del Trittico di Badia a Rofeno, Ambrogio Lorenzetti



U. Boccioni, L'Idolo Moderno

Vi ricordate il dipinto di Léger?



Contraste de formes Peggy Guggenheim Collection (mai mostrato al pubblico)

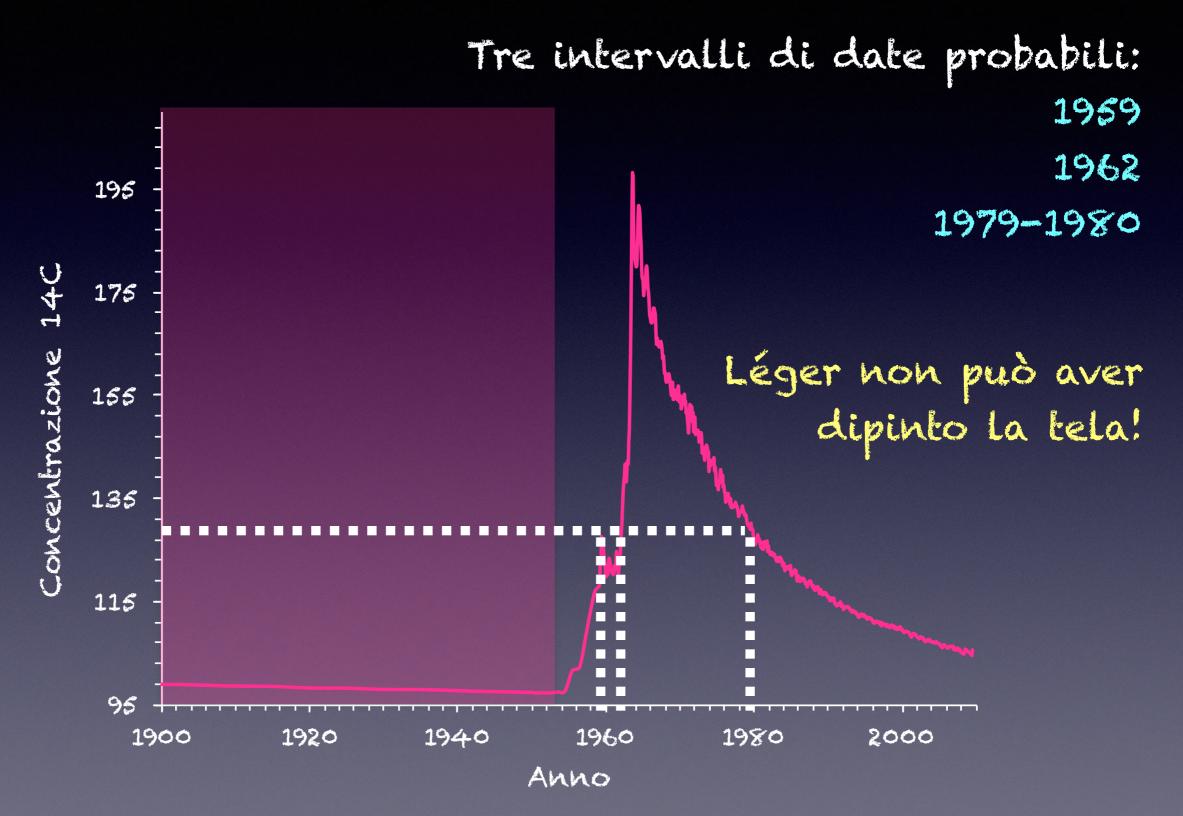


14C = (129.05 ± 0.68) PMC



Ma per un campione moderno $^{14}C \sim 100 \ pMC...$

Ecco il "Bomb Peak"!





Grazie ai colleghi del LABEC e di CHNet

...e grazie a voi!



fedi@fi.infn.it https://chnet.infn.it

Credits:

Zio Paperone e Battista e l'Organipotogramma (Topolino, 2016) A. Beaty (illustrazioni D. Roberts), Ada La Scienziata (Mondadori, 2016)

PID-LNL Programma INFN per Docenti 2020 Laboratori Nazionali di Legnaro