

# Applicazioni della Fisica Nucleare per I Beni Culturali e l'Archeometria

*Associazione*  
**UNIVERSITA'  
DEL TEMPO LIBERO  
DI CARAVAGGIO** *aps*

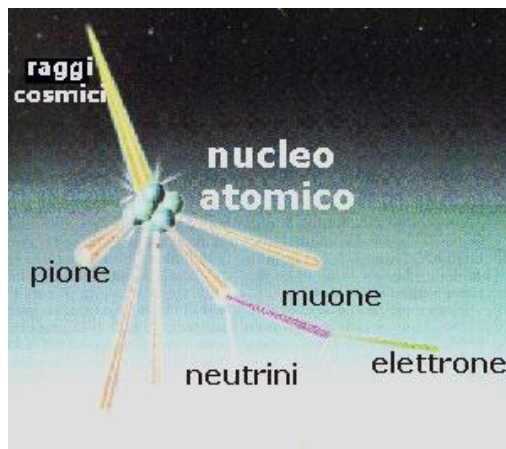
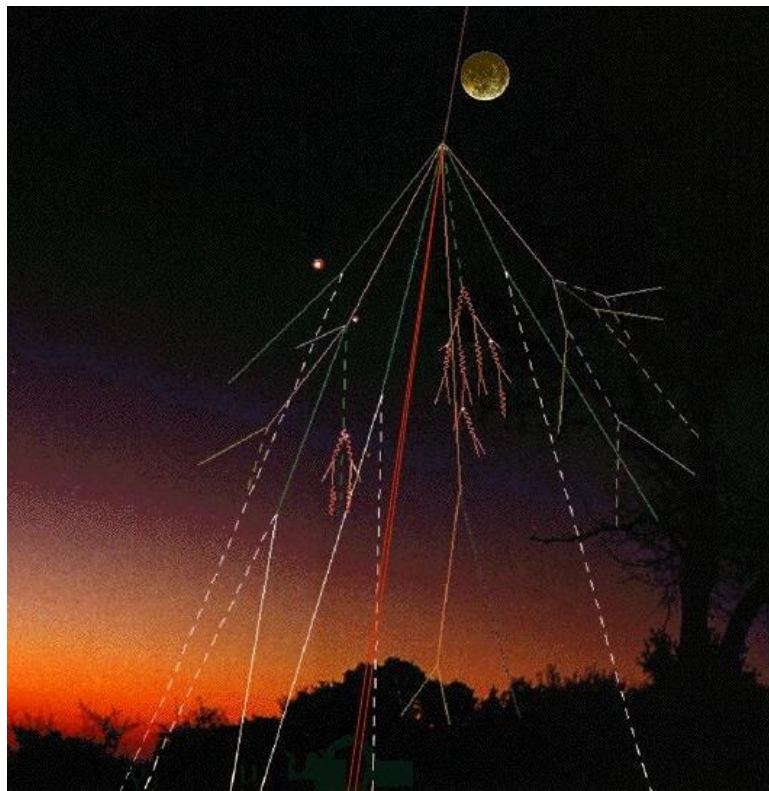


*G. Battistoni*  
*INFN Milano*

# I raggi cosmici

Si comincia a capirne l'esistenza nel 1912:

- Dallo spazio arrivano a noi protoni e nuclei di tutti gli elementi (He, B, Li, C, N, O,... fino a quelli pesanti)
- Spettro di energia vastissimo, che si estende ben oltre la massima energia dei nostri acceleratori di particelle
- Arrivano (meno) anche elettroni,  $\gamma$  e neutrini



I raggi cosmici fanno reazioni nucleari con l'atmosfera terrestre

# Radiografie giganti con i raggi cosmici

*Di tutto ciò che arriva dallo spazio, sulla terra a livello del mare resta quasi solo un tipo di particelle secondarie create dalle interazioni nucleari nell'alta atmosfera: i **muoni***

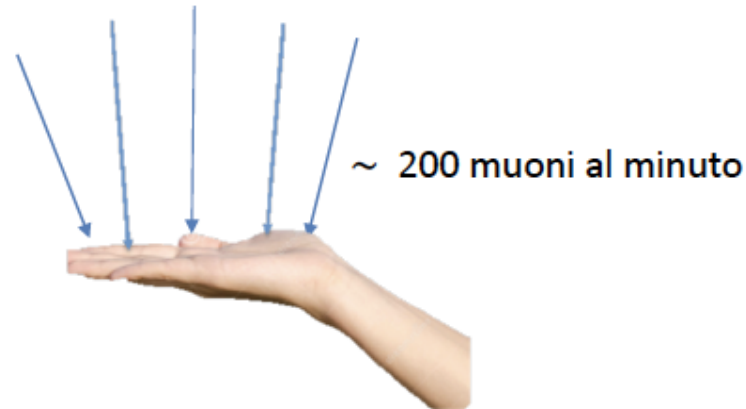
*Carica elettrica =  $\pm 1 q_e$*

*Massa  $\sim 105 \text{ MeV}/c^2$  (  $\sim 200$  volte più pesante dell'elettrone)*

*$\langle E \rangle = 4 \text{ GeV}$*

*Vita media =  $2,2 \mu\text{s}$*

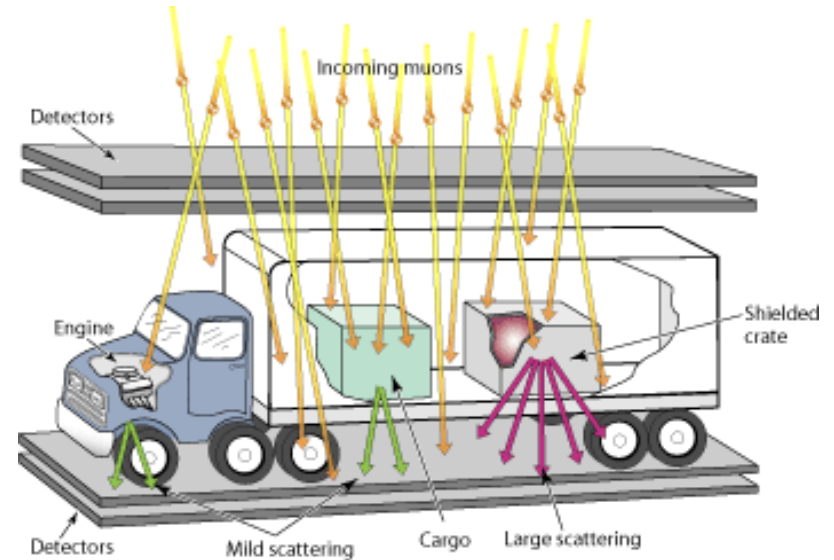
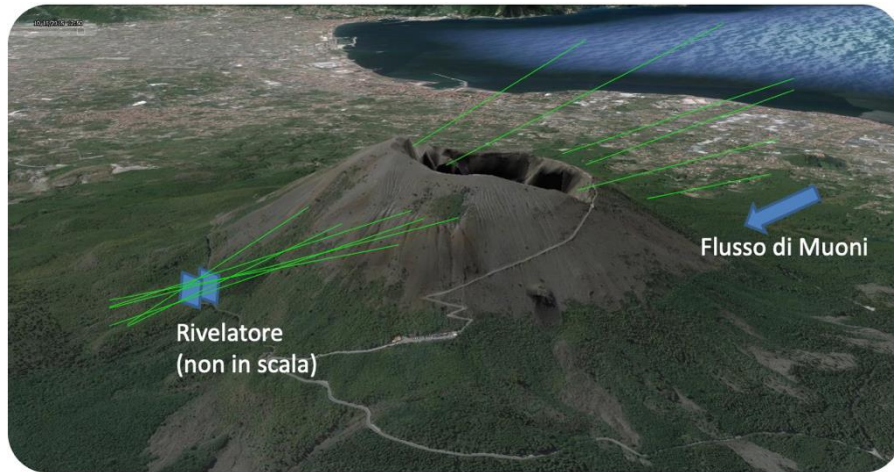
*$L \sim 15 \text{ km}$  @  $E = 4 \text{ GeV}$*



Usiamo il simbolo:  $\mu$

# Muoni cosmici e radiografie

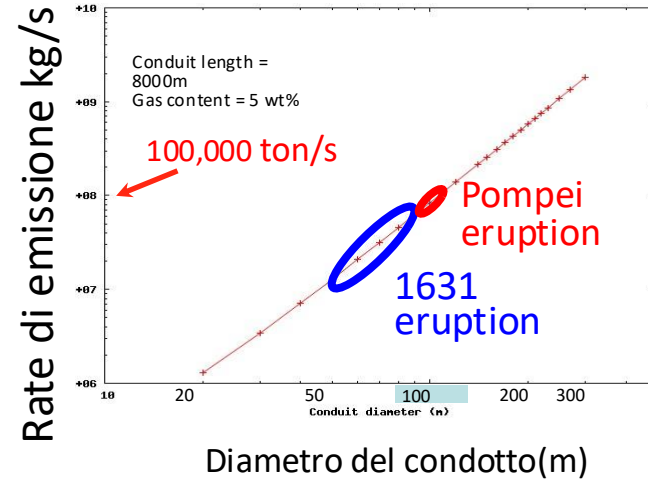
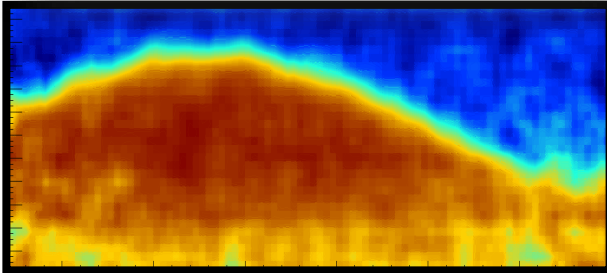
Possiamo usare questi raggi cosmici penetranti per fare radiografie giganti...



# Perché la $\mu$ -radiography di un vulcano

In vulcanologia è interessante sapere la dimensione del condotto di lava di un vulcano, perché la violenza di un'eventuale eruzione dipende anche da questo parametro.

I muoni sono in grado di attraversare una montagna da un versante all'altro rivelando eventuali densità differenti nella roccia: si può "fare la lastra" al condotto interno al cono di un vulcano



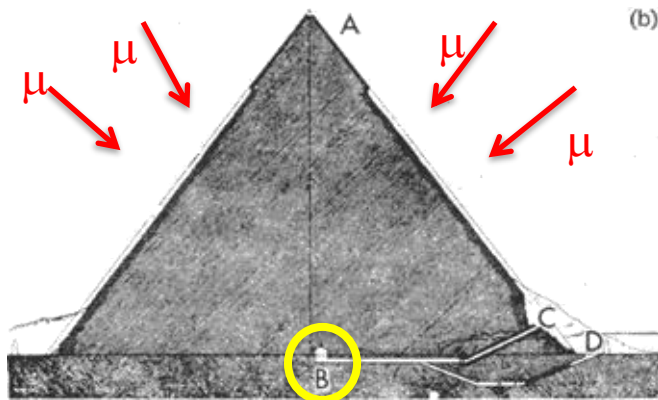
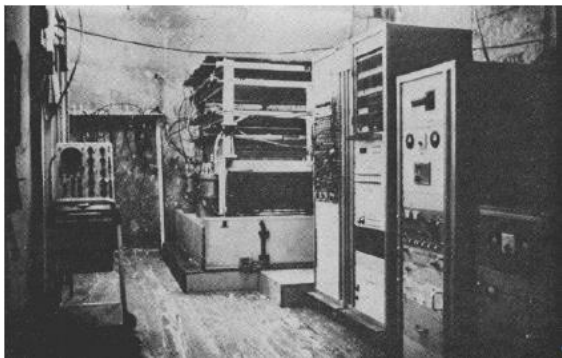
← Radiografia della montagna con i  $\mu$

# Radiografie delle piramidi con i raggi cosmici

il flusso di muoni dei Raggi Cosmici fu usato per fare una “radiografia” a un oggetto esteso (!) fu nel 1970 quando si cercarono delle camere segrete nella piramide di Chefren

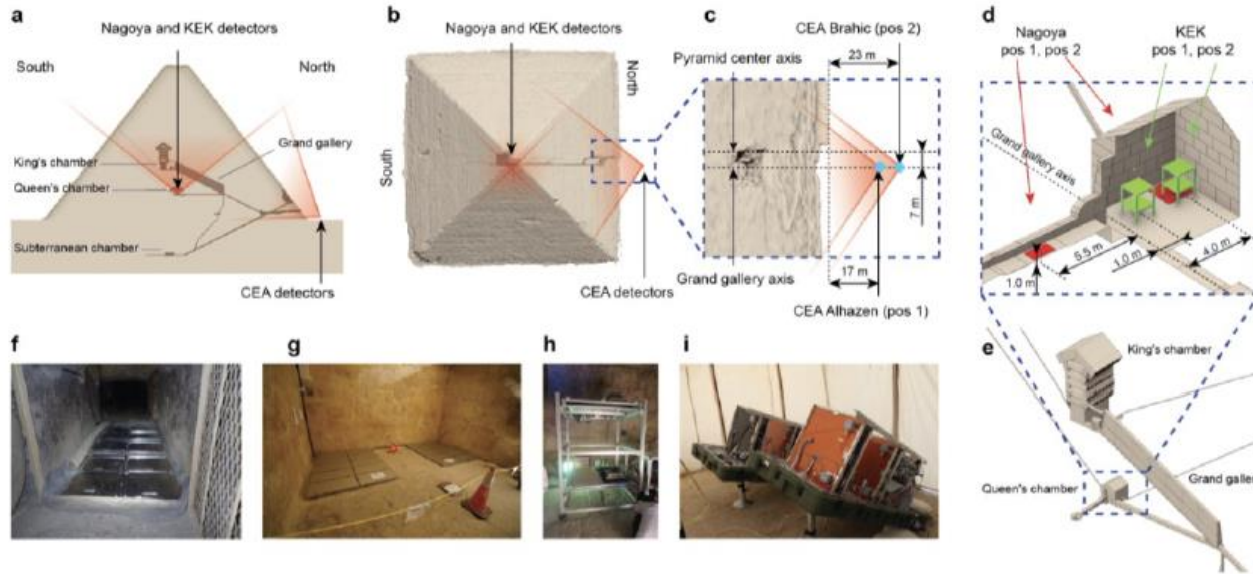
Il flusso dei muoni cosmici fu misurato da rivelatori posto nella camera sepolcrale alla base della piramide.

Se ci fossero stati delle zone vuote i muoni sarebbero penetrati piu' facilmente e si sarebbe osservato un flusso maggiore dalla direzione della “camera segreta”.



Per inciso., allora non si osservo' nessun'anomalia nella distribuzione dei muoni

# Nuova misura 2016 nella piramide di Cheope

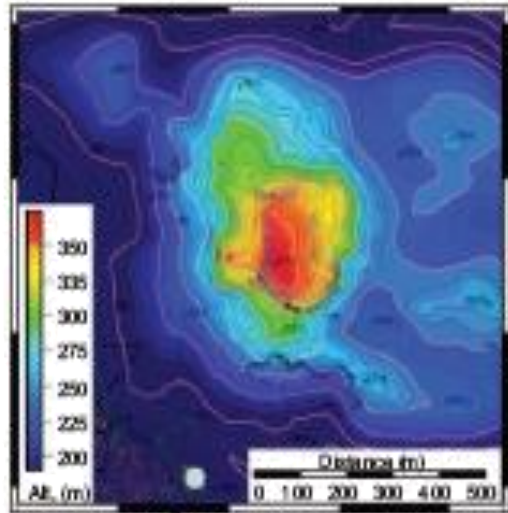


Utilizzo di moderni rivelatori di particelle elementari

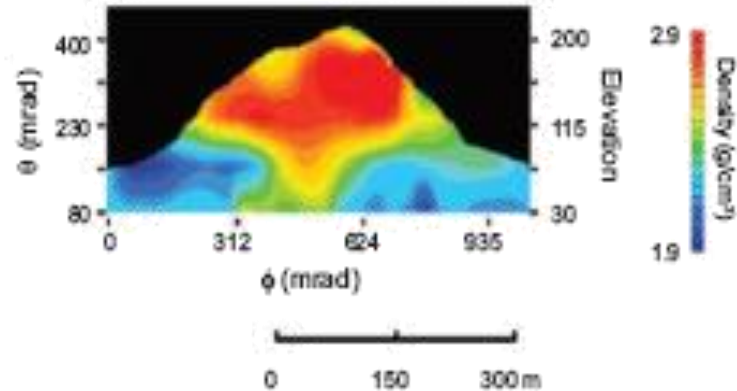
E' stato individuato un vuoto inaspettato!

*(K. Morishima et al, 2017)*

# Radiografia di un vulcano



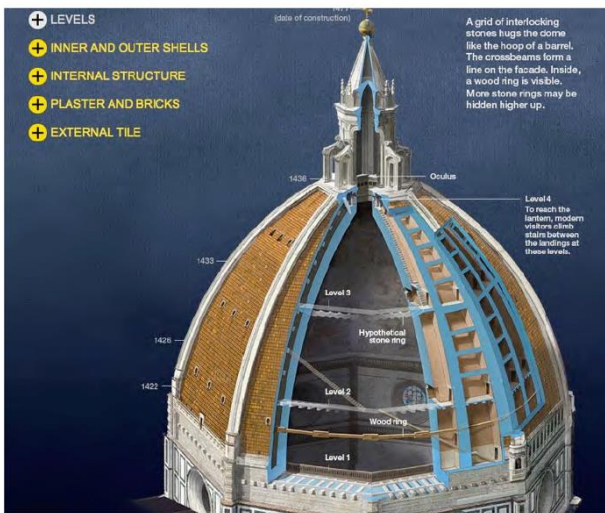
Muon Detector



- Sinistra – mappa del cono e posizione del rivelatore di muoni
- Destra – Foto del vulcano e lastra del condotto magmatico

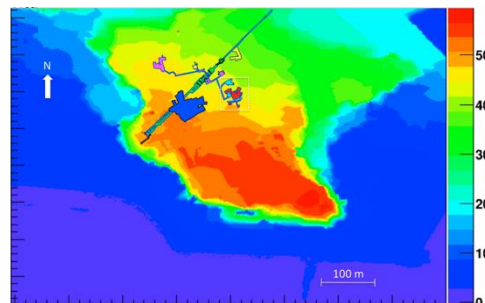
# Applicazioni simili

## Studio dello stato di conservazione della cupola del Brunelleschi



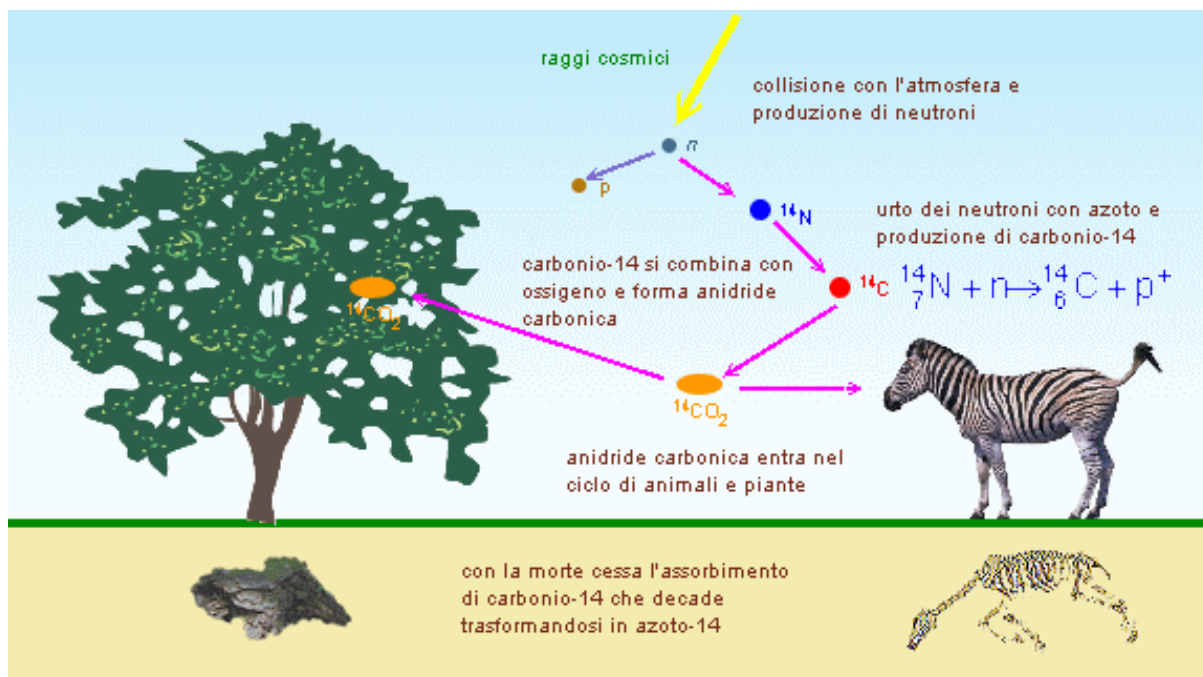
Guardincerri E et al. 2019  
Imaging the dome of Santa Maria del Fiore using cosmic rays.  
Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20180136.  
<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0136>

## Studio di cavità nel sottosuolo



# La datazione con il $^{14}\text{C}$

Una piccolissima concentrazione di  $^{14}\text{C}$  (carbonio-14) (circa uno ogni  $10^{12}$  atomi di carbonio) è presente nell'anidride carbonica in atmosfera, grazie al flusso di raggi cosmici che ricreano continuamente isotopi di  $^{14}\text{C}$  compensando in un equilibrio dinamico quelli che scompaiono per decadimento.



## La datazione con il $^{14}\text{C}$

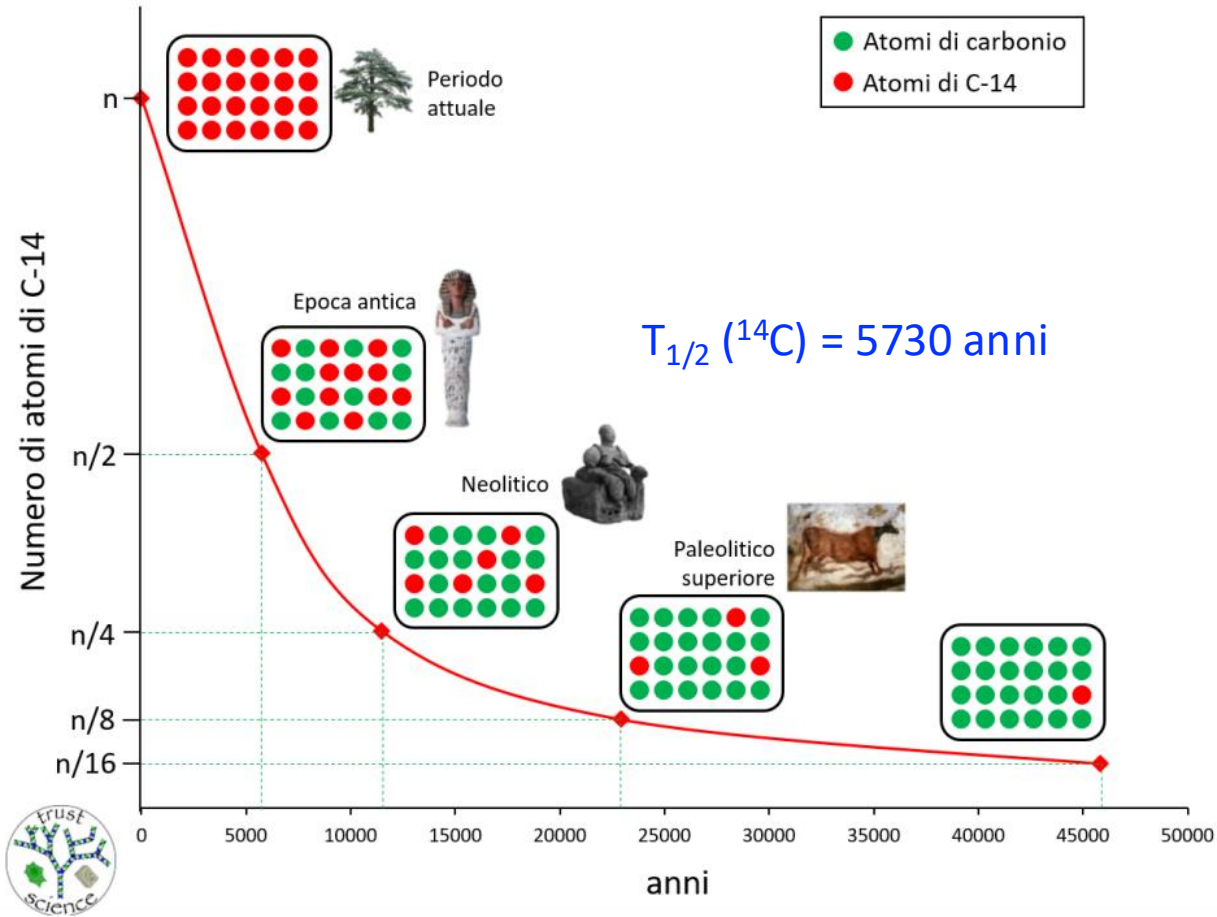
- Dopo la morte, però, la diminuzione di  $^{14}\text{C}$  nelle molecole organiche dei resti dovuta ai decadimenti radioattivi non è più compensata da riassunzione per vie metaboliche.
- Dal momento della morte, il rapporto tra  $^{14}\text{C}$  e carbonio totale progressivamente diminuisce seguendo l'andamento esponenziale del decadimento del  $^{14}\text{C}$ .
- Misurando la concentrazione rimasta oggi nei resti possiamo perciò ricavare il tempo passato dalla morte dell'organismo di origine.

$$T_{1/2} (^{14}\text{C}) = 5730 \text{ anni}$$

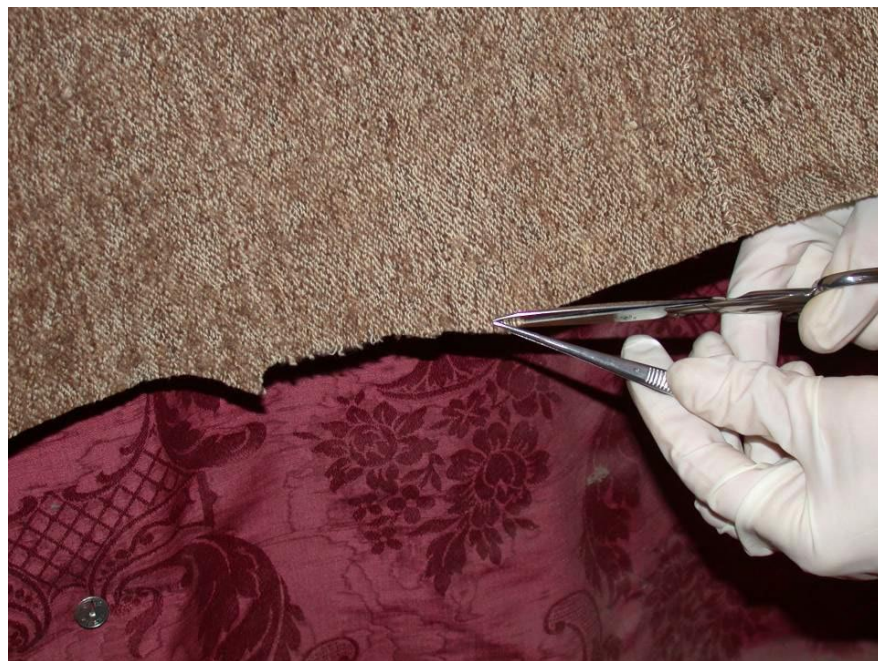
Per materiali non organici, altri isotopi radioattivi possono essere usati per la datazione:

Uranio-235	$T_{1/2} = 723 \text{ milioni di anni}$
Potassio-40	$T_{1/2} = 1300 \text{ milioni di anni}$
Uranio-238	$T_{1/2} = 4510 \text{ milioni di anni}$
Torio-232	$T_{1/2} = 13900 \text{ milioni di anni}$
Rubidio-87	$T_{1/2} = 47000 \text{ milioni di anni}$

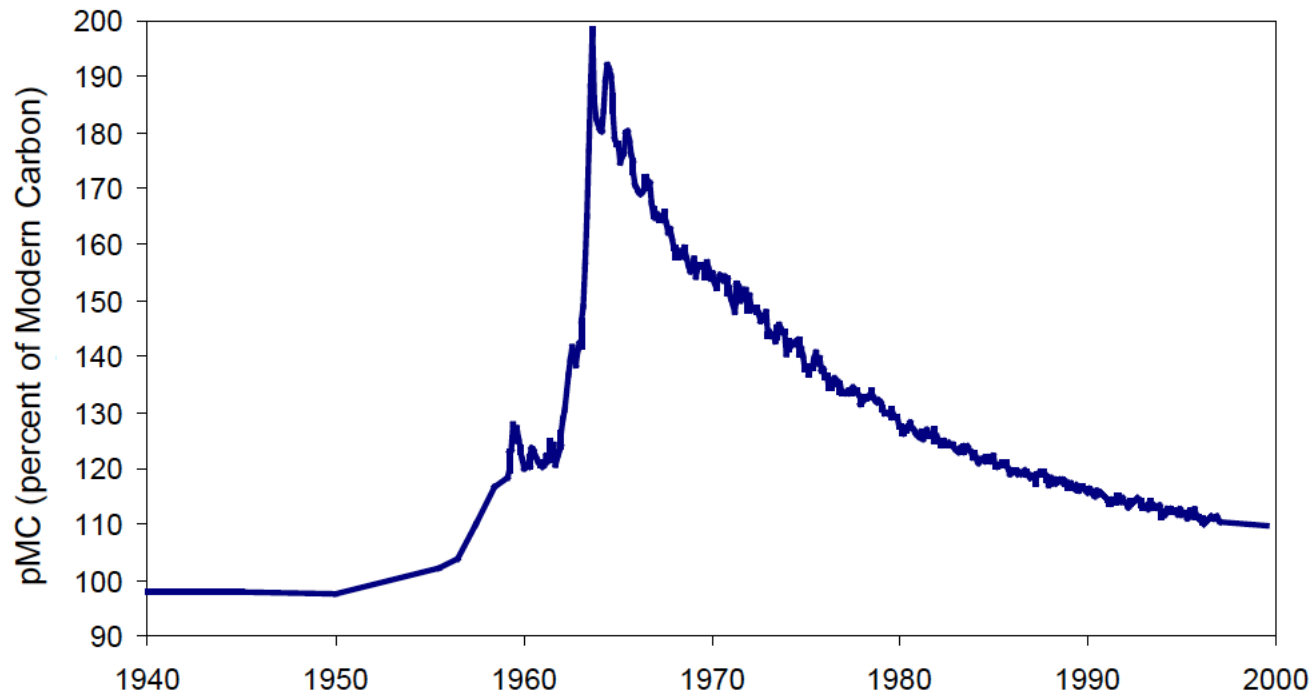
# Diminuzione dei livelli di C-14 negli organismi con il passare del tempo



Bastano pochi milligrammi di materiale, o meno

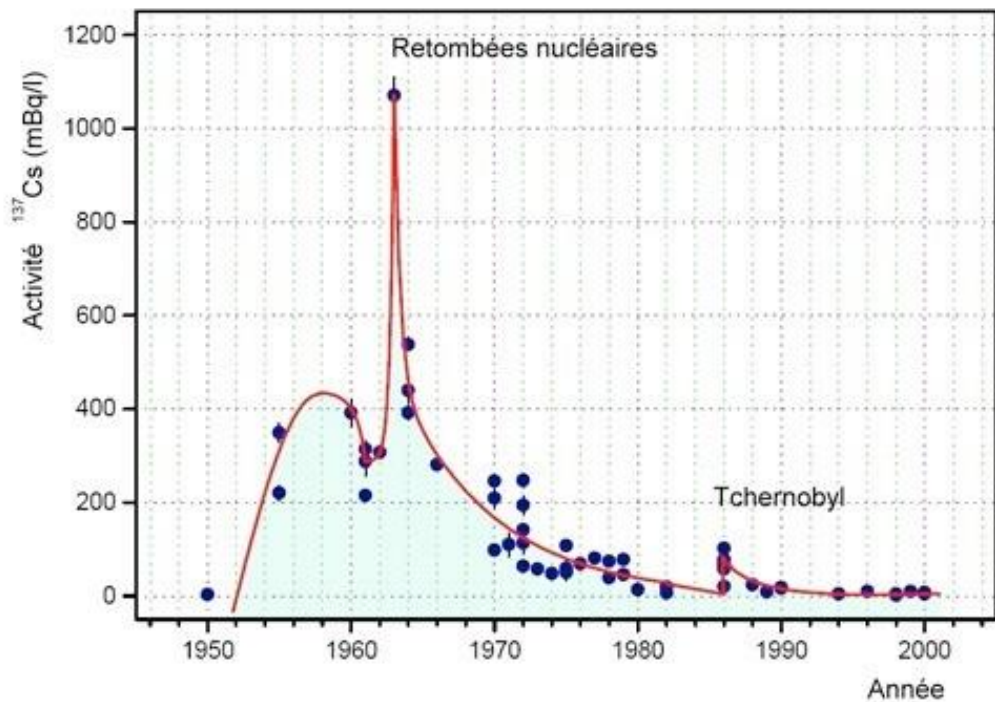


## II “Bomb Peak”

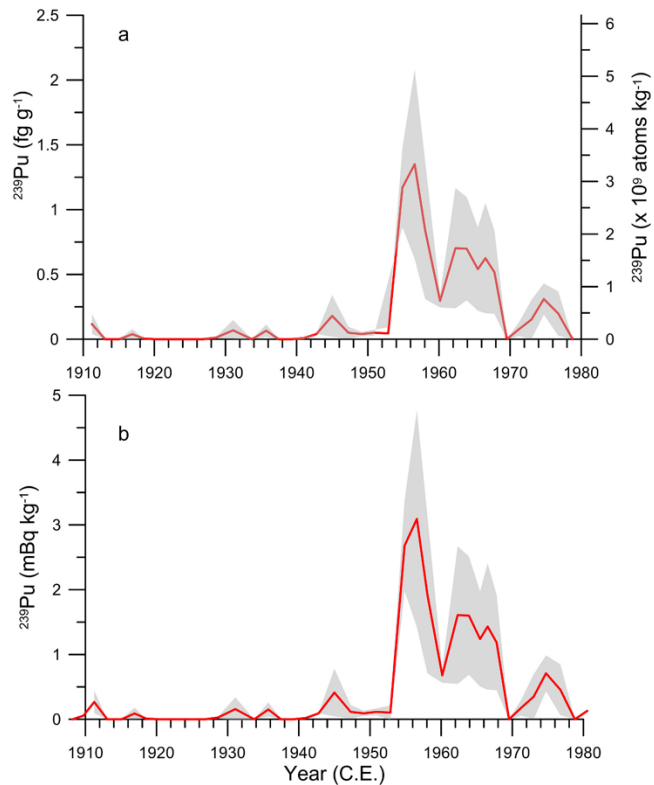


## Intermezzo: altre conseguenze del “Bomb Peak”

Dal documento del 2006 pubblicato dal IRSN (“Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire”) sull’impatto dei radionuclidi artificiali nell’ambiente francese



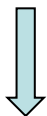
Andamento nel tempo della concentrazione (attività) di  $^{137}\text{Cs}$  nel vino Bordeaux tra il 1950 e il 2000, espressa in milli-Bequerel/litro



Concentrazione di  $^{239}\text{Pu}$  in un carotaggio di ghiaccio antartico  
*(M. Severi et al., 2023)*

# Fisica nucleare per i beni culturali e l'archeometria

- Tecniche di datazione e imaging
- Identificazione dei falsi d'autore

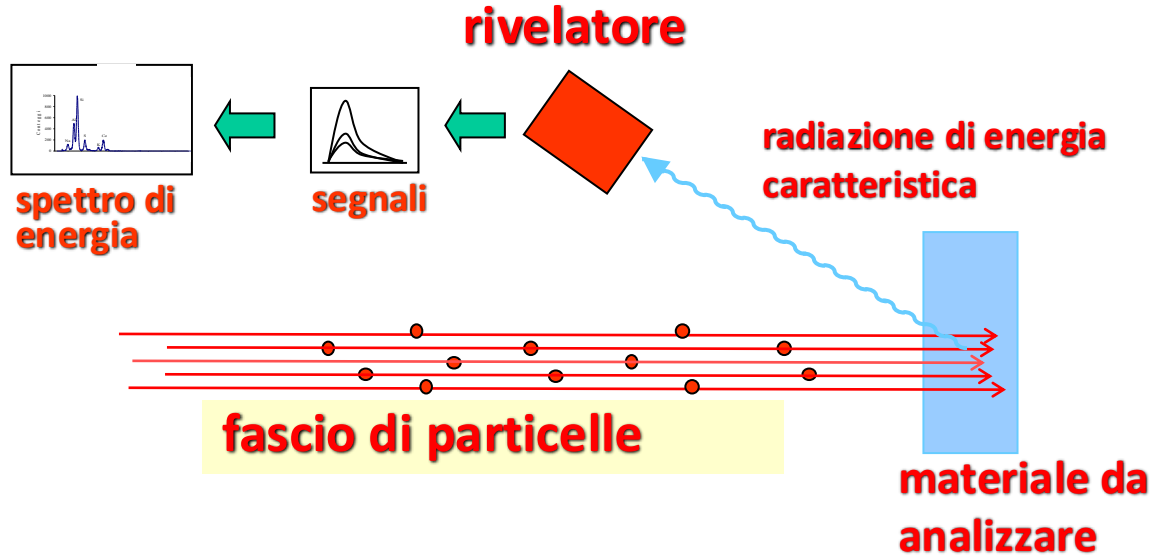


Per esempio:

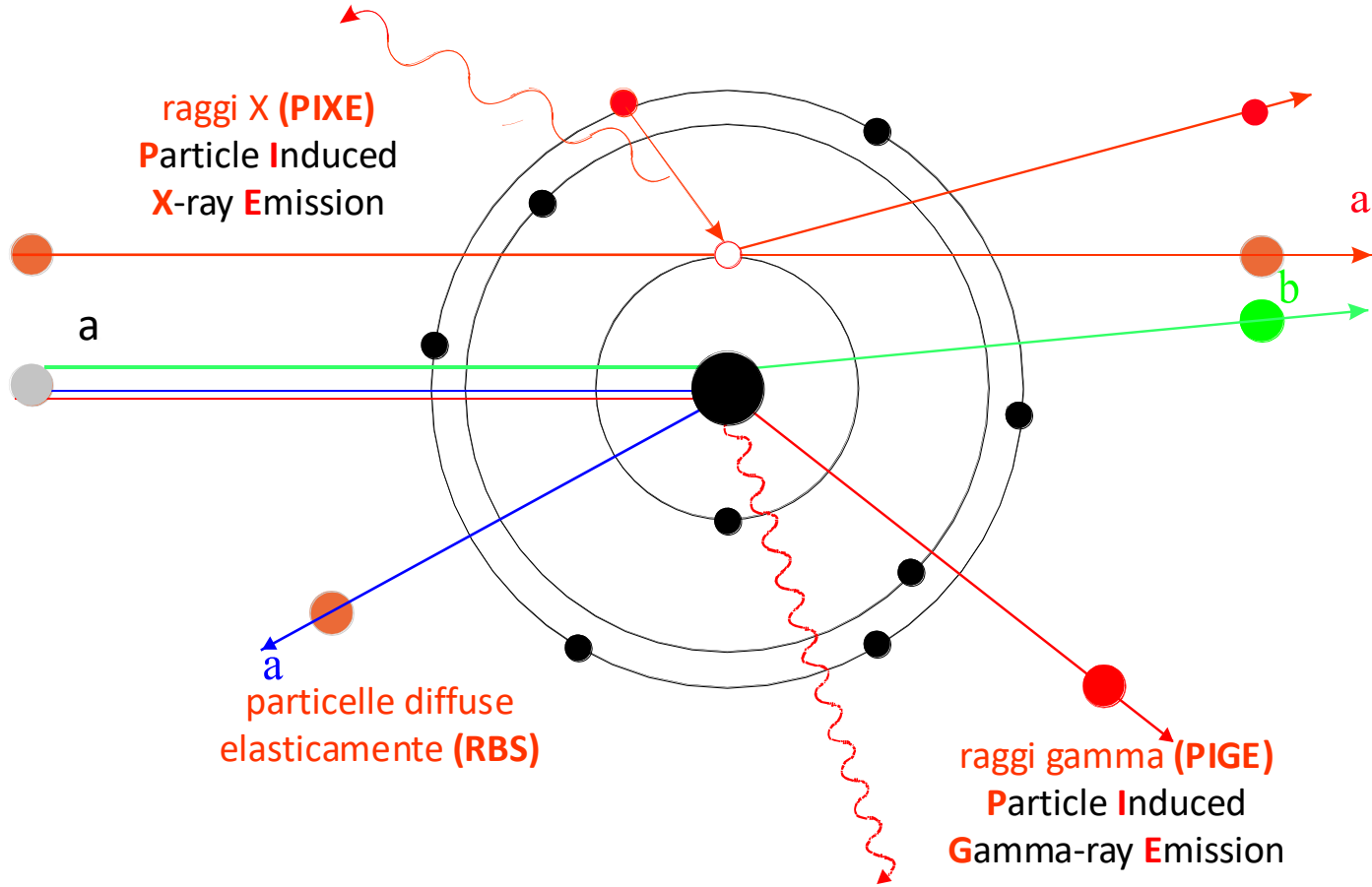
determinare con indagini non distruttive la  
composizione dei pigmenti utilizzati nelle opere d'arte:

*→ nelle varie epoche storiche si usavano pigmenti di  
natura diversa e ora non più disponibili*

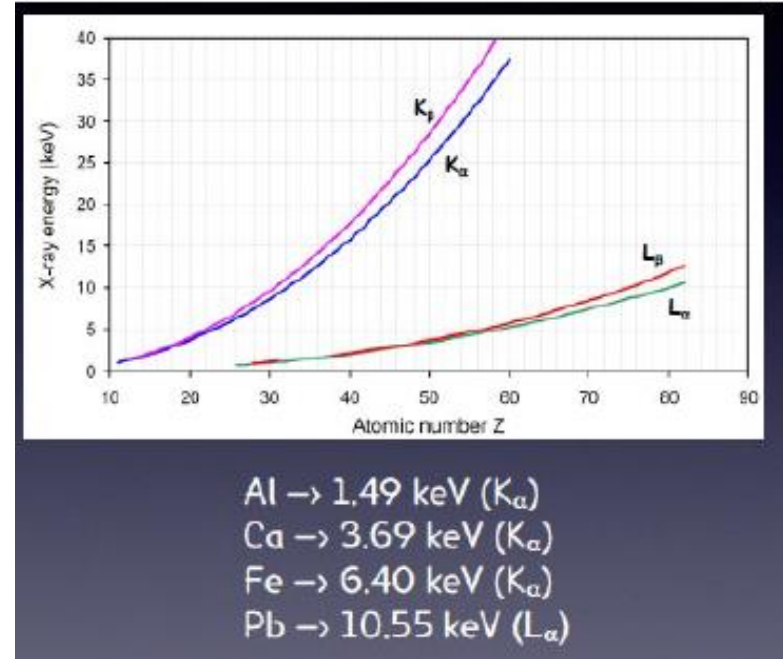
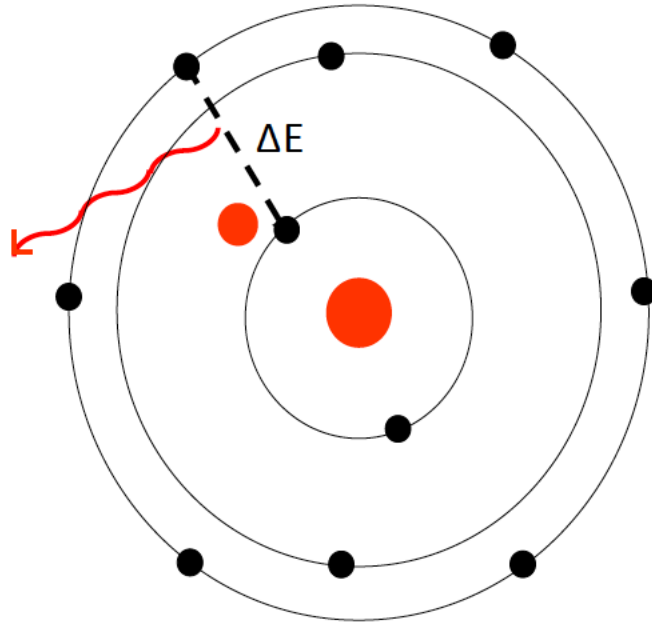
# Analisi di opera d'arte con fasci di particelle accelerate: Ion Beam Analysis (IBA)



# Ion Beam Analysis (IBA)



# PIXE: Particle Induced X-Ray Emission

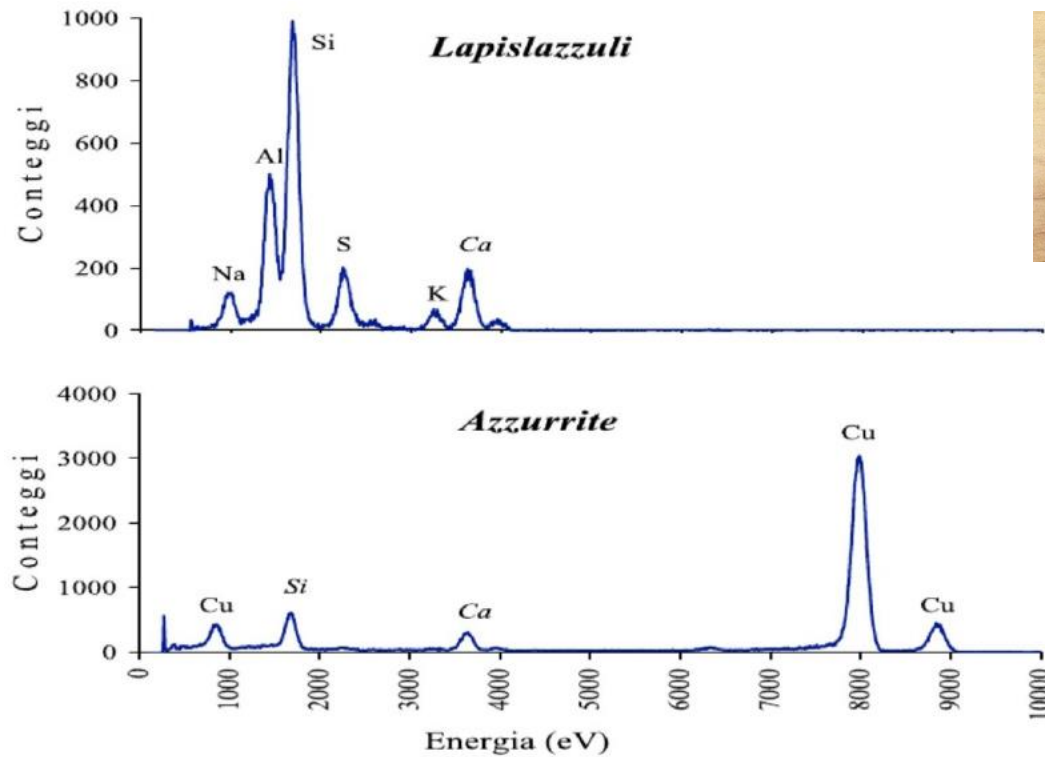


L'energia del raggio X è caratteristica dell'elemento che lo emette

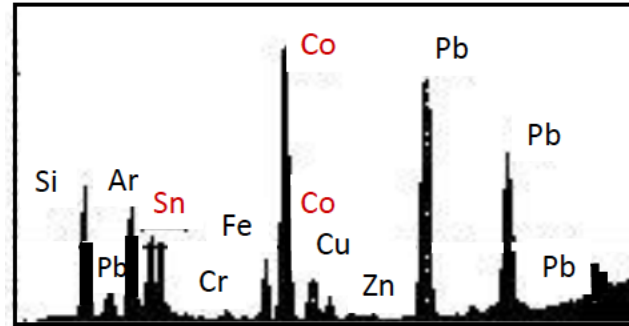
# Evoluzione storica dei principali pigmenti usati in pittura

Epoca storica. Classe cromatica	Antichità	Medioevo	Rinascimento	XVII- XVIII secolo	XIX secolo	XX secolo
Blue	Blu egizio	Oltremare (Lapislazzuli)			Oltremare artificiale	
			Blu di smalto		Blu di cobalto (1802)	
	Azzurro della magna(Azzurrite)			Blu di Prussia (1704)		
Red	Ocra rossa (Ossido di ferro)					
	Minio (ossido di piombo)					Quinacridone (1950)
	Vermiglione (Cinabro, solfuro di mercurio)				Rosso di cadmio (solfuro di cadmio)	
Yellow	Ocra gialla (Ossido di ferro)					
	Orpimento	Giallo Napoli		Aureolina	Giallo di cadmio (1830)	
		Arancio di piombo	Giallo Indiano			
Green	Malachite					Verde di cromo
	Terra verde				Verde smeraldo	Ftalocianine
White	Bianco di Piombo (Ossido di piombo)				Bianco di Zinco (1834)	Bianco di Titanio (1920)

## Esempi di spettri PIXE



## Esempio di uso di PIXE per l'arte



Qui lo spettro dei raggi X indica un pigmento con Co e SnO<sub>2</sub> che Modigliani non ha usato in nessun altro dipinto: è un falso?

Semberebbe proprio che sia un falso:  
Moens et al. 2000  
Devos, PhD Thesis U. of Ghent 1996

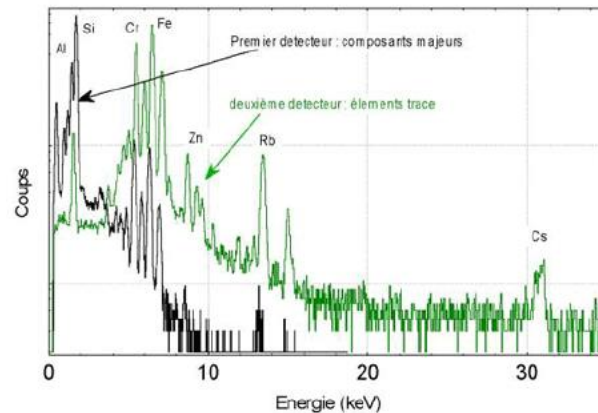
# Arte e Storia



*T. Calligaro et al. (1998)*

Statuetta di Ishtar, dea dell'amore dei Parti (III secolo a. C.)

I curatori del Louvre pensavano all'inizio che gli occhi rossi fossero fatti di vetro colorato



L'analisi PIXE ha determinato che gli intarsi erano di rubino:  
 $\text{Al}_2 \text{SiO}_4 (\text{F}, \text{OH})_2 + (\text{Cr}, \text{Fe})$

Il confronto del contenuto di Fe e Cr nei rubini di **Ishtar** con quello dei rubini di altra provenienza dà una forte indicazione che sia venuti da **Burma**

indizio di una antica connessione commerciale fra il vicino e il lontano oriente!

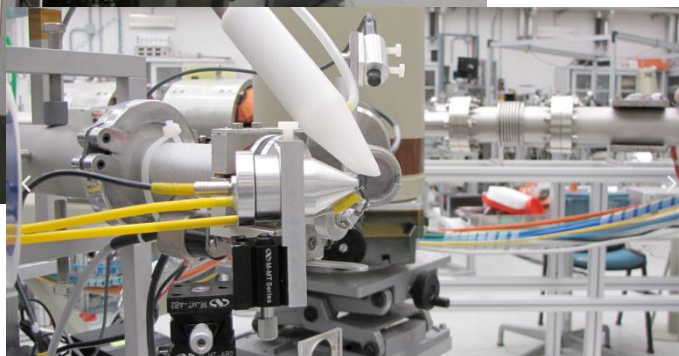
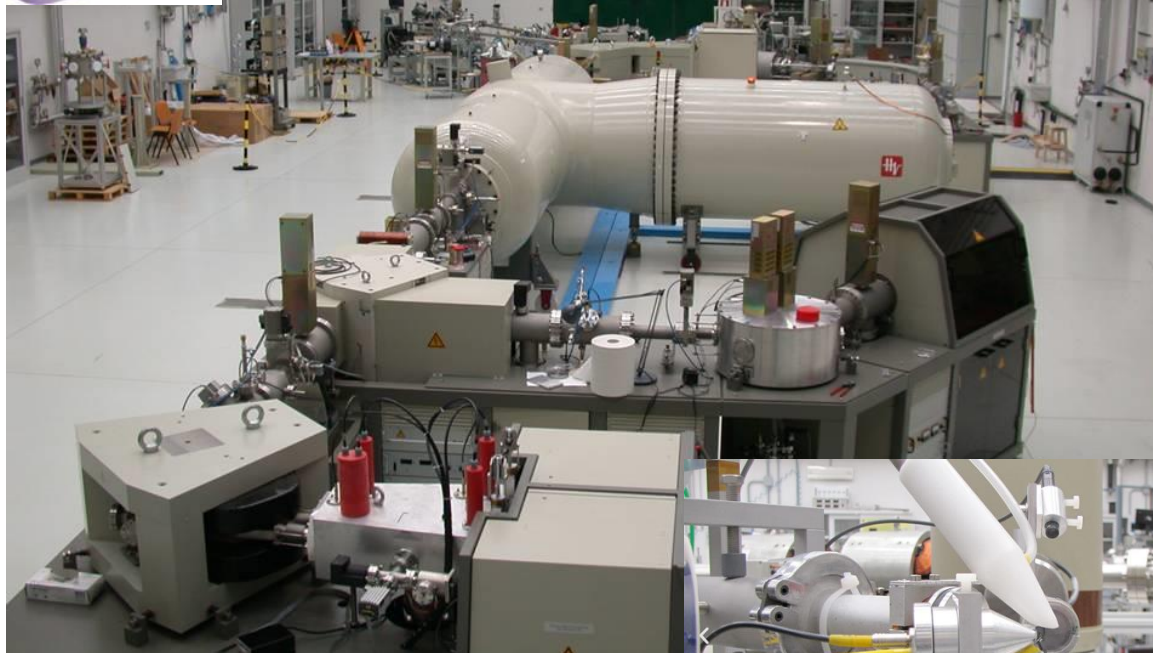




Presso il Polo Scientifico  
dell'Università degli Studi  
di Firenze, Sesto Fiorentino

<http://labec.fi.infn.it>

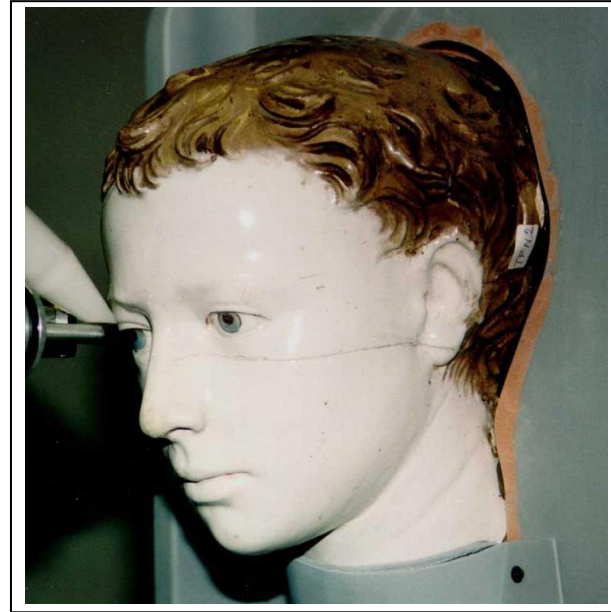
# acceleratore elettrostatico tandem da 3 MV



# Analisi di manoscritti antichi,



Analisi PIXE con fascio esterno del  
frontespizio del PI.16,22, dalla  
Biblioteca Laurenziana di Firenze



Analisi del “Ritratto di fanciullo”  
di Luca Della Robbia – prima del  
restauro all’Opificio delle Pietre  
Dure di Firenze



Una lettera di Galileo durante l'analisi PIXE

## Analisi di documenti di interesse storico

(INFN FI, Bibl.Naz. FI, MPI Berlin)  
**Misure PIXE per determinare quantitativamente la composizione di inchiostri antichi**

**Contributo importante alla ricostruzione cronologica degli appunti di Galileo sul moto**  
**Confronto della composizione dell'inchiostro negli appunti (non datati) con quella di documenti datati (lettere, etc.)**



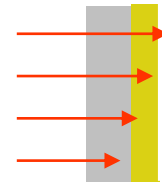


# Leonardo da Vinci Madonna dei fusi

versione ex-Reford  
(*collezione privata*)

Olio su tavola, 50 x 36  
presumibilmente dipinto nel  
1501

**PIXE differenziale per  
distinguere i contributi  
dei differenti strati**



# Datazione con $^{14}\text{C}$ : come sfruttare positivamente il “Bomb Peak”



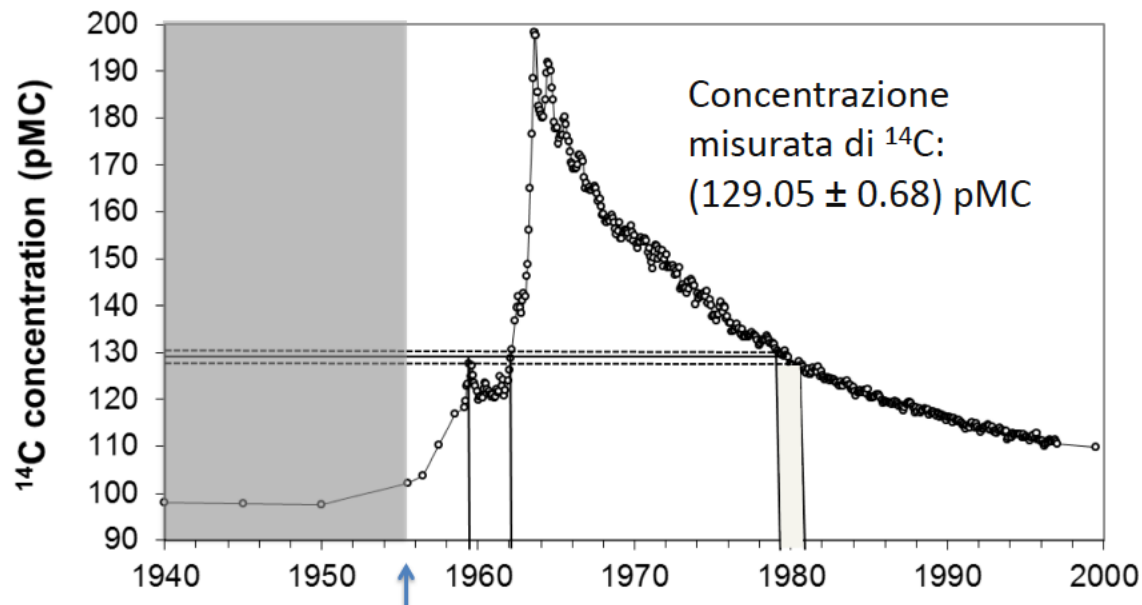
“Contraste de Formes”  
attribuito a F. Léger (1881-1955)  
Olio su tela, 92 x 73 cm

Presunto dipinto nel 1913-1914  
Acquistato da Peggy Guggenheim per la Fondazione di  
Venezia alla fine degli anni '60,

Non fu esposto perché sorsero subito dubbi sulla sua  
autenticità

Passarono molti anni senza poterlo dimostrare...

**Ma la tela è di cotone! Si può provare a datarla  
con il  $^{14}\text{C}$  (proposta del 2006)**



La tela era stata prodotta con piante tagliate nel 1959.

Léger è morto nel 1955 → **il quadro è evidentemente un falso!**

## Altre applicazioni Ion Beam Analysis

Fisica ambientale: analisi  $^{14}\text{C}$  dell'aerosol atmosferico, cioè del particolato, le famose “polveri sottili”)

Se il carbonio di un campione di aerosol deriva esclusivamente da combustione di materiali fossili (petrolio, carbone, etc.) sarà privo di  $^{14}\text{C}$ , mentre se deriva esclusivamente da materiali biologici naturali, o combustione di legna o altri materiali “giovani”, avrà la concentrazione di  $^{14}\text{C}$  atmosferica attuale.

Il valore misurato fornisce quindi un'informazione importante sulla proporzione delle due “categorie”, e quindi sulla sorgente della componente carboniosa dell'aerosol, di grande importanza in questo tipo di studi.

Grazie per  
l'attenzione!



Per qualsiasi domanda sul tema:  
[giuseppe.battistoni@mi.infn.it](mailto:giuseppe.battistoni@mi.infn.it)