

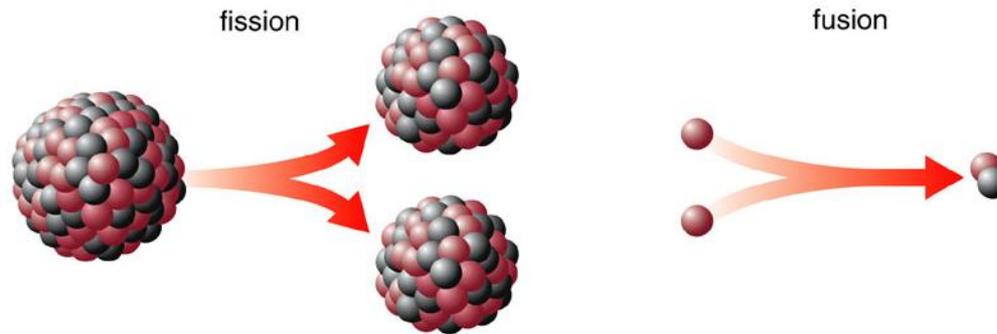
# Applicazioni della Fisica Nucleare

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

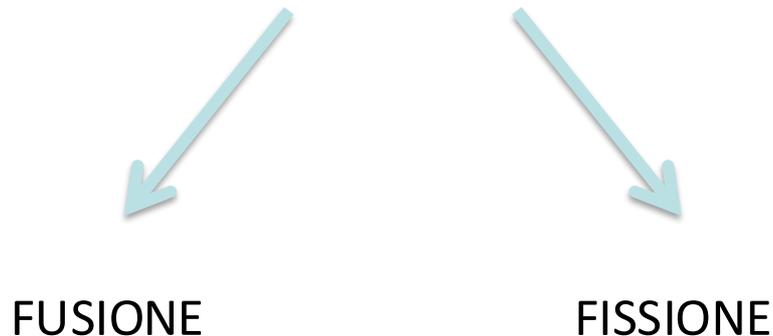


*G. Battistoni*  
*INFN Milano*

# Produrre energia con reazioni nucleari



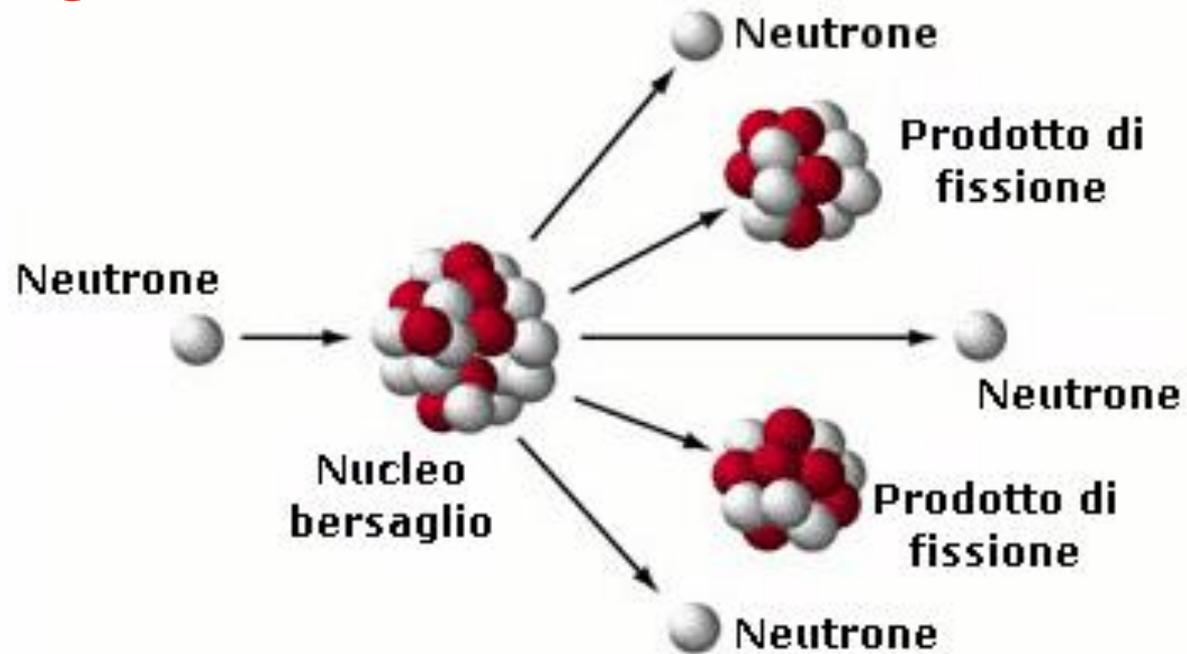
Come abbiamo visto esistono 2 possibili meccanismi per produrre energia utilizzando reazioni nucleari.



Enrico Fermi progettò e guidò la costruzione del primo reattore nucleare a fissione, che produsse la prima reazione nucleare a catena controllata.

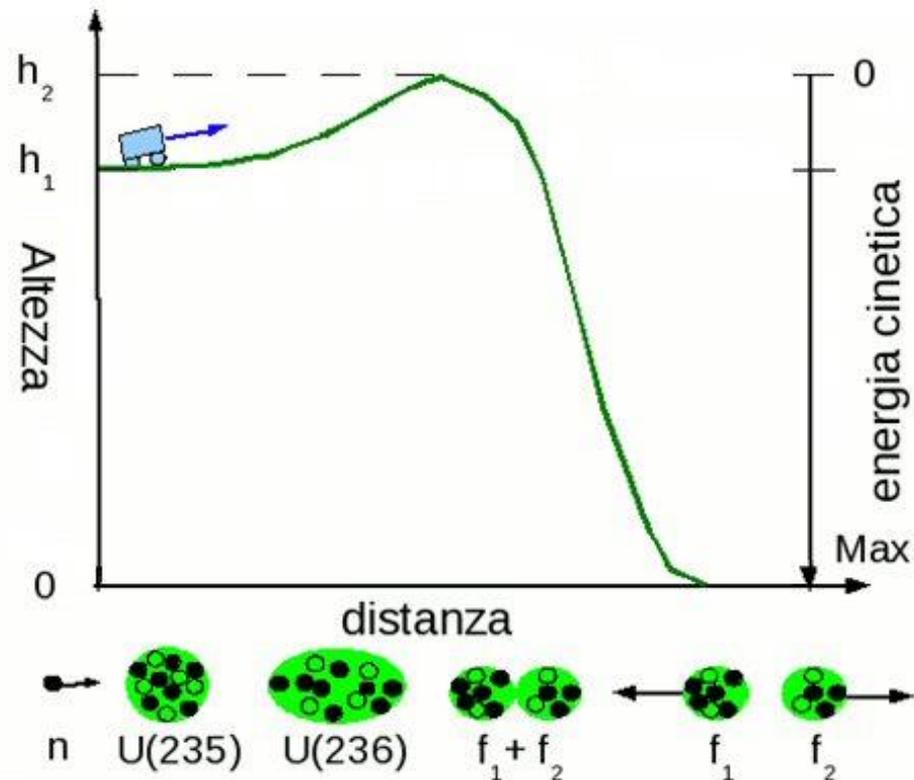
# La Fissione Nucleare

- Schematicamente si intende per **fissione** *la divisione di un nucleo pesante in due nuclei-frammenti piu' leggeri a seguito della cattura di un neutrone.*



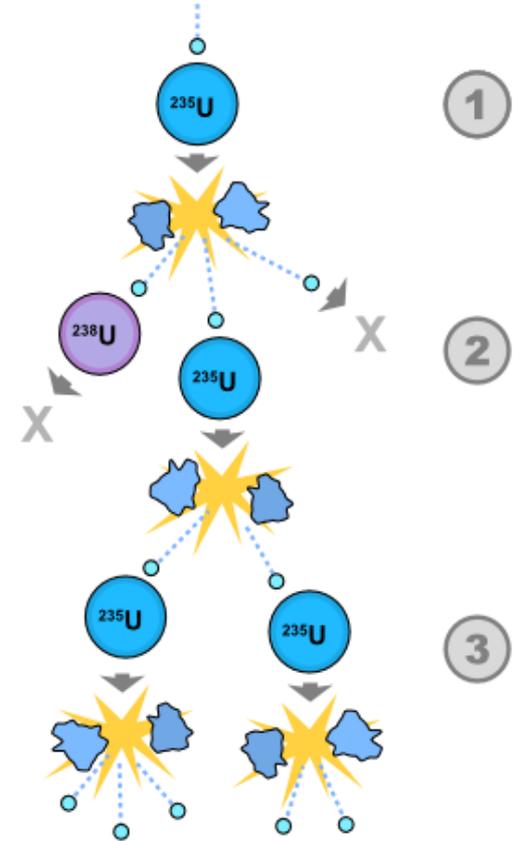
# La Fissione Nucleare

- Nel processo si libera una quantità notevole di energia che si manifesta come energia cinetica (velocità) dei due frammenti.
- In alcuni nuclei ( $U^{233}$ ,  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$ ), detti **fissili**, la cattura del neutrone è tanto più probabile quanto più bassa è la sua velocità



# La Reazione a Catena

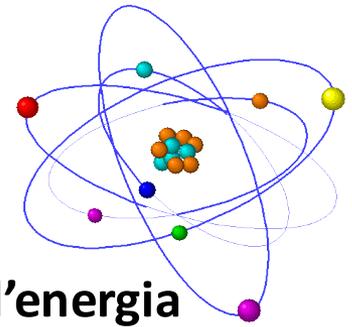
Nella fissione vengono emessi, oltre ai nuclei frammenti, anche due/tre neutroni veloci



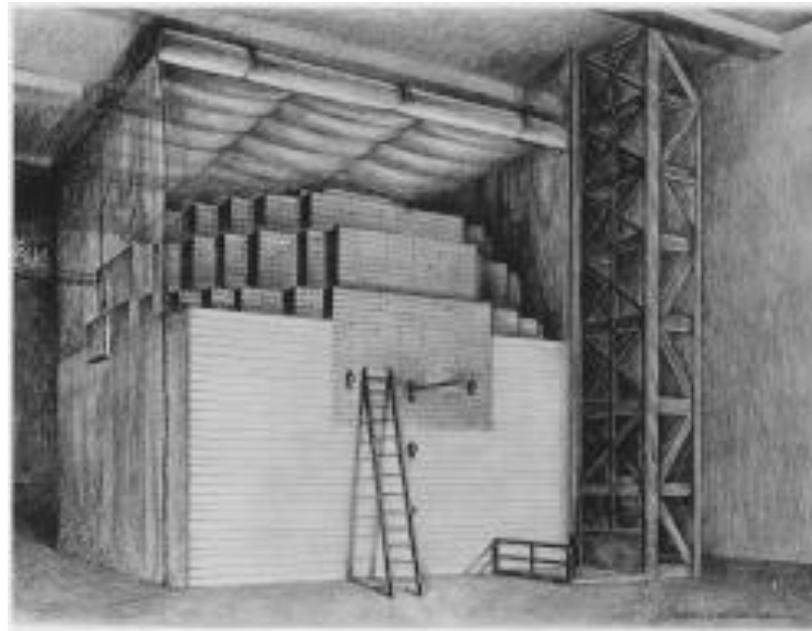
fattore di moltiplicazione = rapporto tra il numero di neutroni in una generazione e quelli della generazione precedente

$$K > \leq 1$$

# Fermi e l'energia Nucleare



Dal punto di vista sperimentale Fermi è sicuramente il padre **dell'energia nucleare**. A lui si devono i primi studi e le prime grosse scoperte sulla fissione dell'Uranio, progettò e guidò la costruzione del primo reattore nucleare a fissione, che produsse la prima reazione nucleare a catena controllata.

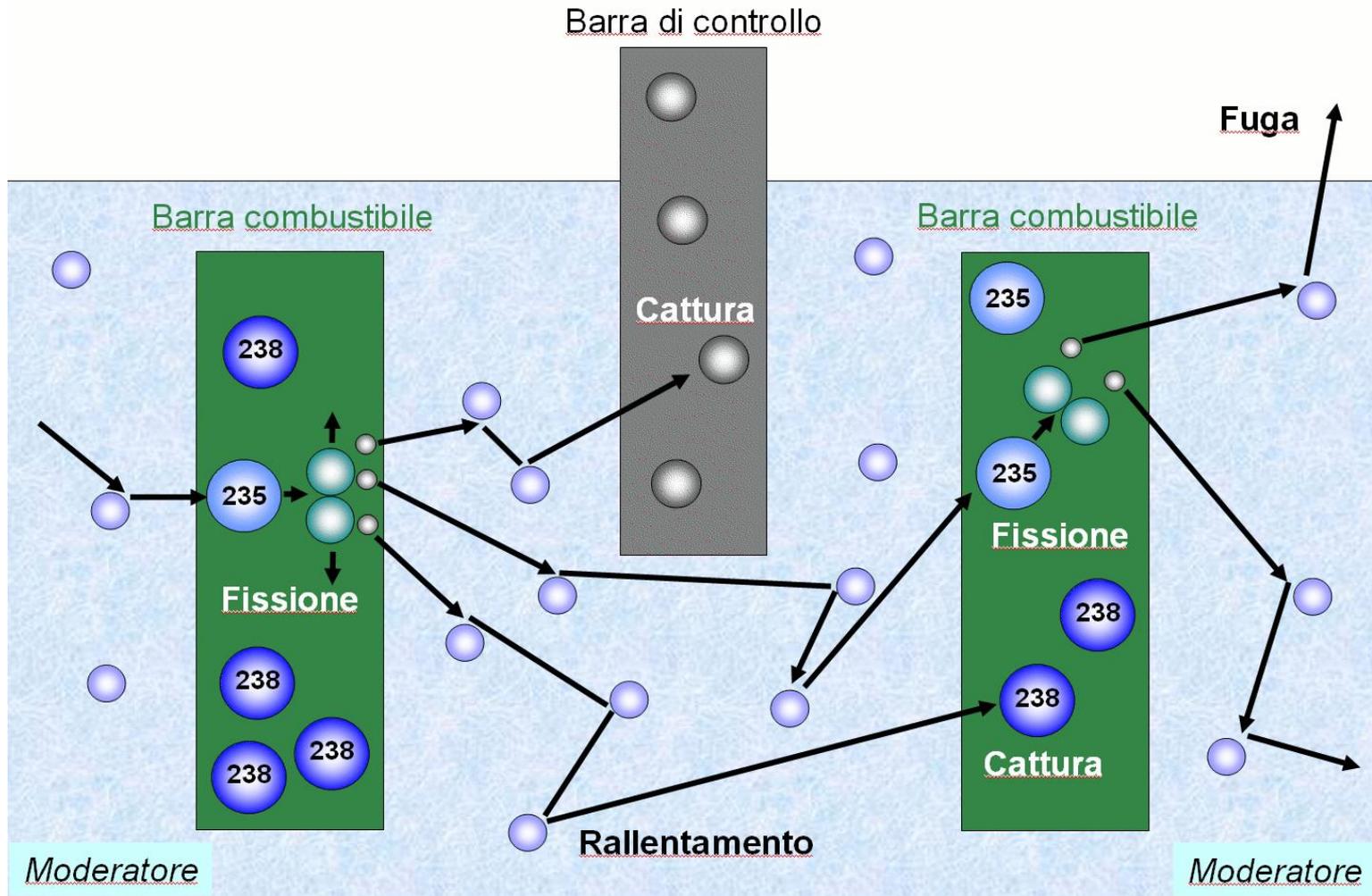


# PARTI COMPONENTI IL NOCCIOLO DEL REATTORE NUCLEARE

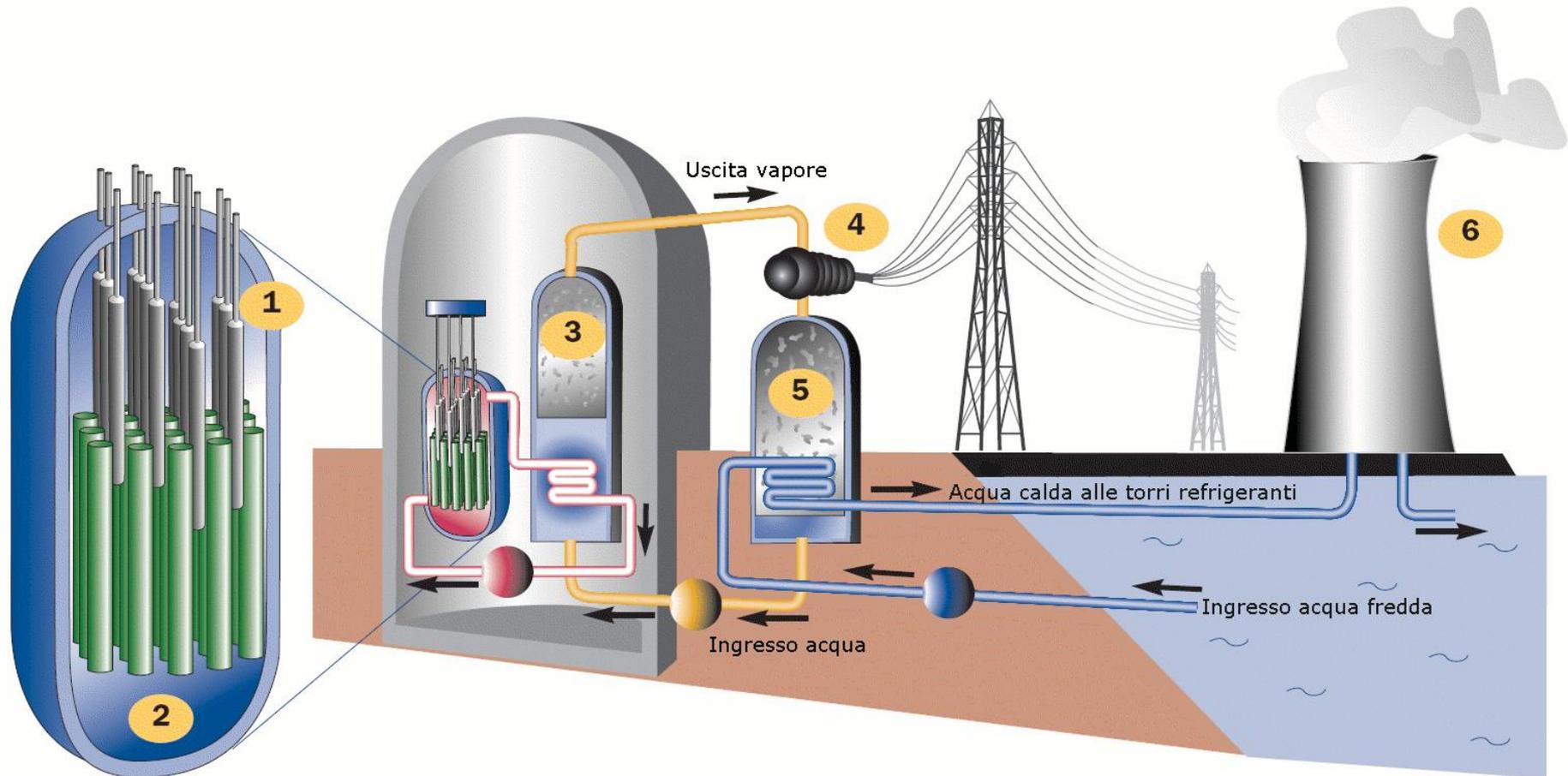
Il **NOCCIOLO** è la zona dove si sviluppa la reazione a catena e si genera il calore. Contiene:

- Il **combustibile**, una miscela di isotopi di Uranio contenente  $U^{238}$  e  $U^{235}$  arricchito a circa 3%, dove avviene la fissione, generalmente sotto forma di ossido di uranio in barre cilindriche.
- Il **moderatore/refrigerante**, generalmente acqua, in cui sono immerse le barre di combustibile e che consente sia di rallentare i neutroni, sia di rimuovere il calore prodotto nel combustibile.
- L'**assorbitore**, una sostanza in grado di assorbire i neutroni senza fissionare: variando la quantità di assorbitore si può cambiare la quantità di neutroni disponibili e quindi il fattore di moltiplicazione. In forma di barre mobili che possono essere inserite o estratte

# LA REAZIONE A CATENA NEL REATTORE



# L'IMPIANTO DEL REATTORE



Fonte: New Scientist

1 COMBUSTIBILE E BARRE DI CONTROLLO; 2 MODERATORE; 3 SCAMBIATORE DI CALORE; 4 TURBINE 5 CONDENSATORE; 6 TORRI REFRIGERANTI

# Fusione nucleare

Per innescare una reazione di fusione nucleare bisogna ricreare condizioni simili a quelle che si trovano nel nucleo delle stelle.

Nel Sole 15 milioni di gradi e qualche centinaio di miliardi di atmosfere.

Non c'è modo di contenere una simile pressione perciò nei tentativi in corso si preferiscono una bassa pressione (poche decina di atmosfere) e un sovrappiù di temperatura oltre cento milioni di gradi.

Nei “reattori” a fusione (**tokamak**) si usano campi magnetici per contenere i plasmi che dovrebbero fondersi. Un'altra tecnica, detta inerziale, utilizza potenti raggi laser per “confinare” il combustibile da fondere.

## Vantaggi:

- Enorme densità di energia
- Combustibile praticamente inesauribile (isotopi dell'idrogeno)
- Impatto ambientale ridotto (ma non 0...)
- Sicurezza

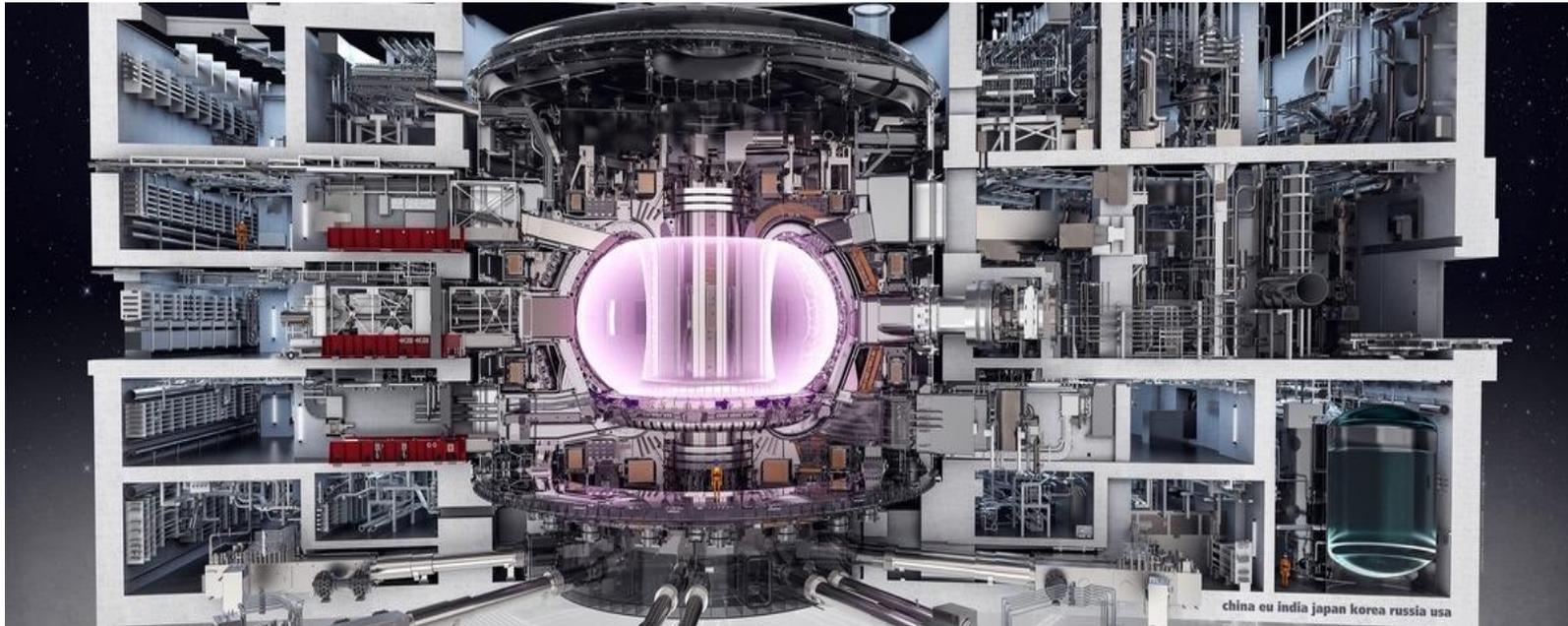
# Tokamak: il Progetto ITER

Scientific and technological feasibility of fusion

$Q = 10$ : first *burning* plasma

$P_{\text{fusion}} = 500\text{MW}$  for  $\sim 500\text{s}$

Under construction in the south of France



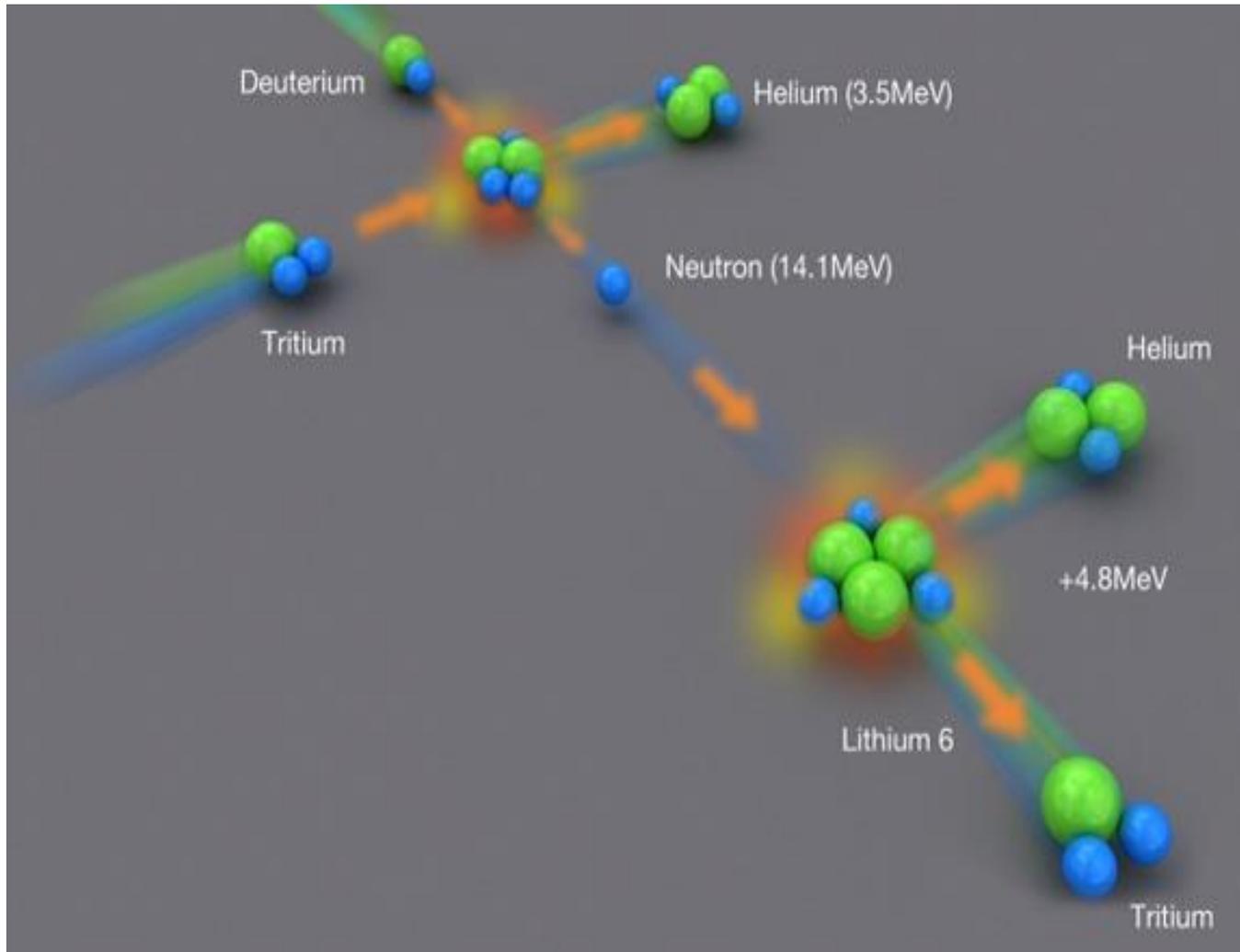
Una miscela gassosa di **deuterio-trizio** che forma il plasma viene iniettata molto velocemente nella camera a vuoto tramite un sistema di pompaggio con portata media di  $200 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  e quindi trasformata in un plasma tramite ionizzazione indotta da un sistema elettrico.

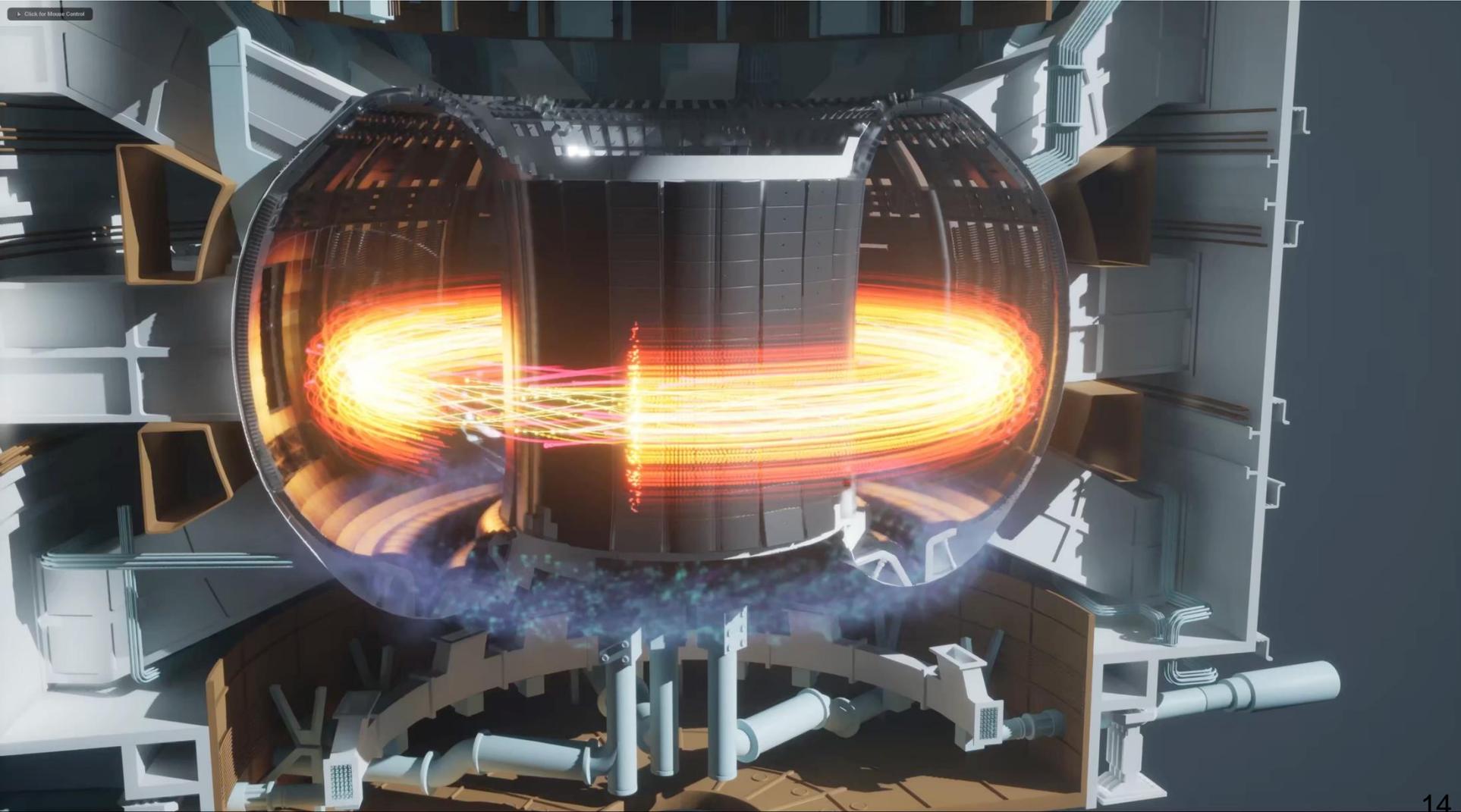
Il campo magnetico all'interno del tokamak sarà prodotto da un solenoide centrale e da ventiquattro bobine superconduttrici disposte perpendicolarmente all'anello del toroide

un circuito di raffreddamento ad elio liquido mantiene gli avvolgimenti alla temperatura di 4 K

Il plasma all'interno del tokamak è riscaldato fino alla temperatura di fusione tramite l'iniezione nella camera a vuoto di atomi di idrogeno ad alta velocità che, tramite collisioni, trasferiranno la loro energia ai componenti del plasma. Due sistemi aggiuntivi a radiofrequenza sono inoltre utilizzati per riscaldare gli ioni e gli elettroni del plasma

# La reazione deuterio-trizio

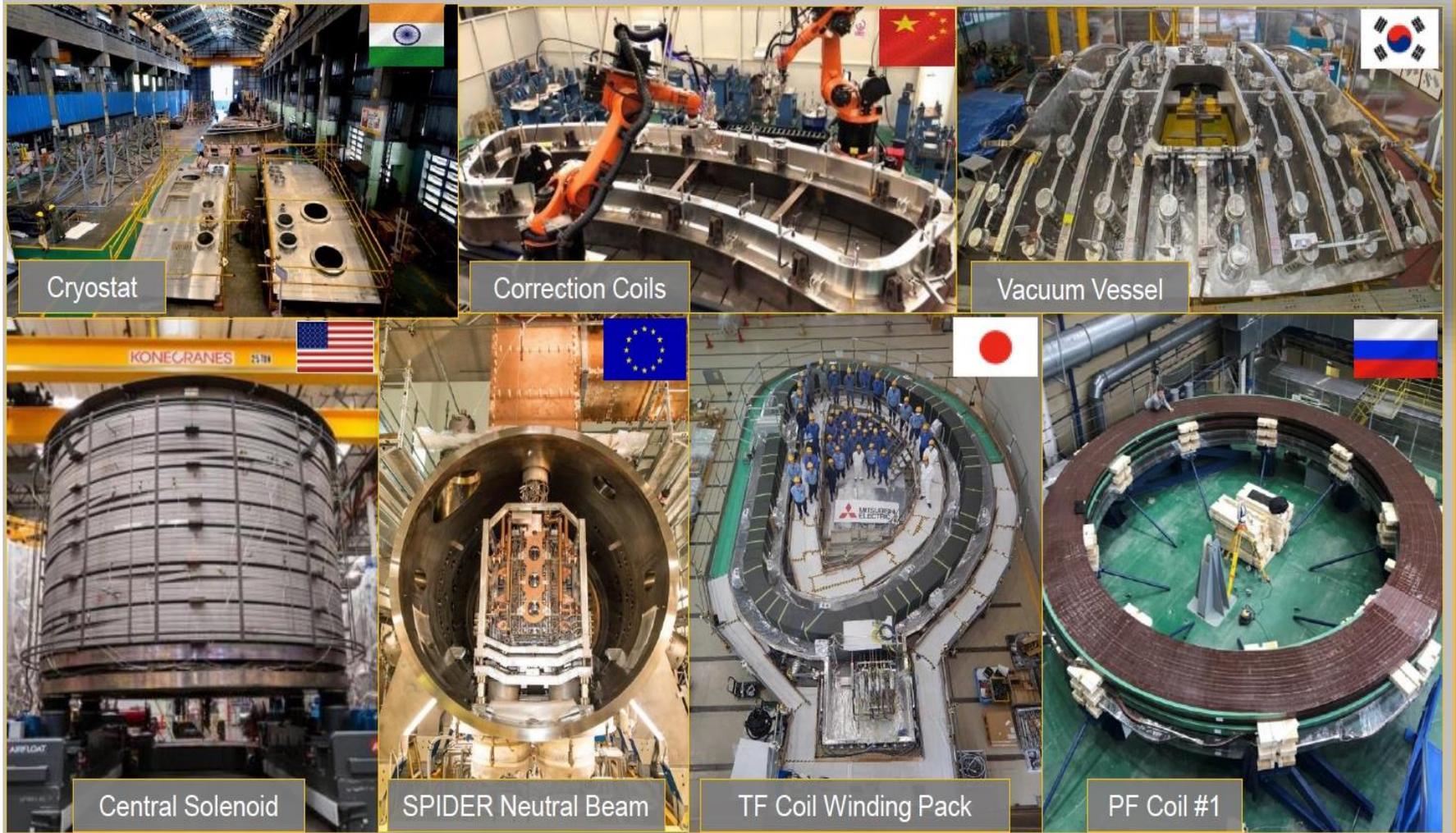




# Sito di ITER



# Componenti di ITER



# Gli ultimi record della fusione

**EUROfusion**, ottenuto nell'impianto Jet di Oxford:

3 Ottobre 2023

Quantità di D-T: 0.2 mg

Energia da fusione: 69 MegaJoules in 5 secondi

**Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL)**, negli Stati Uniti:

Campagna sperimentale gennaio-aprile 2024:

Plasma mantenuto per 6 minuti

**ITER:**

l'inizio delle operazioni scientifiche è previsto per il 2034 e la data per la produzione di reazioni di fusione si stima ~ al 2039

# Ci sono problemi ancora da risolvere completamente per le centrali a fusione

- Tecnologia per il trizio
- Ottimizzazione della scelta dei materiali per i vari componenti critici
- Estrazione e scarico della potenza
- Smaltimento rifiuti e gestione sicurezze
- Controllo remoto e manutenzione
- ...

# Isotopi radioattivi per la medicina: la “Medicina Nucleare”

Nel periodo post-bellico, fine anni 40, inizio anni '50, c'è  
abbondante disponibilità di isotopi radioattivi  
 (“radionuclidi”)

*prodotti per lo più in reattori nucleari*

Nasce l'idea dell'applicazione alla medicina.

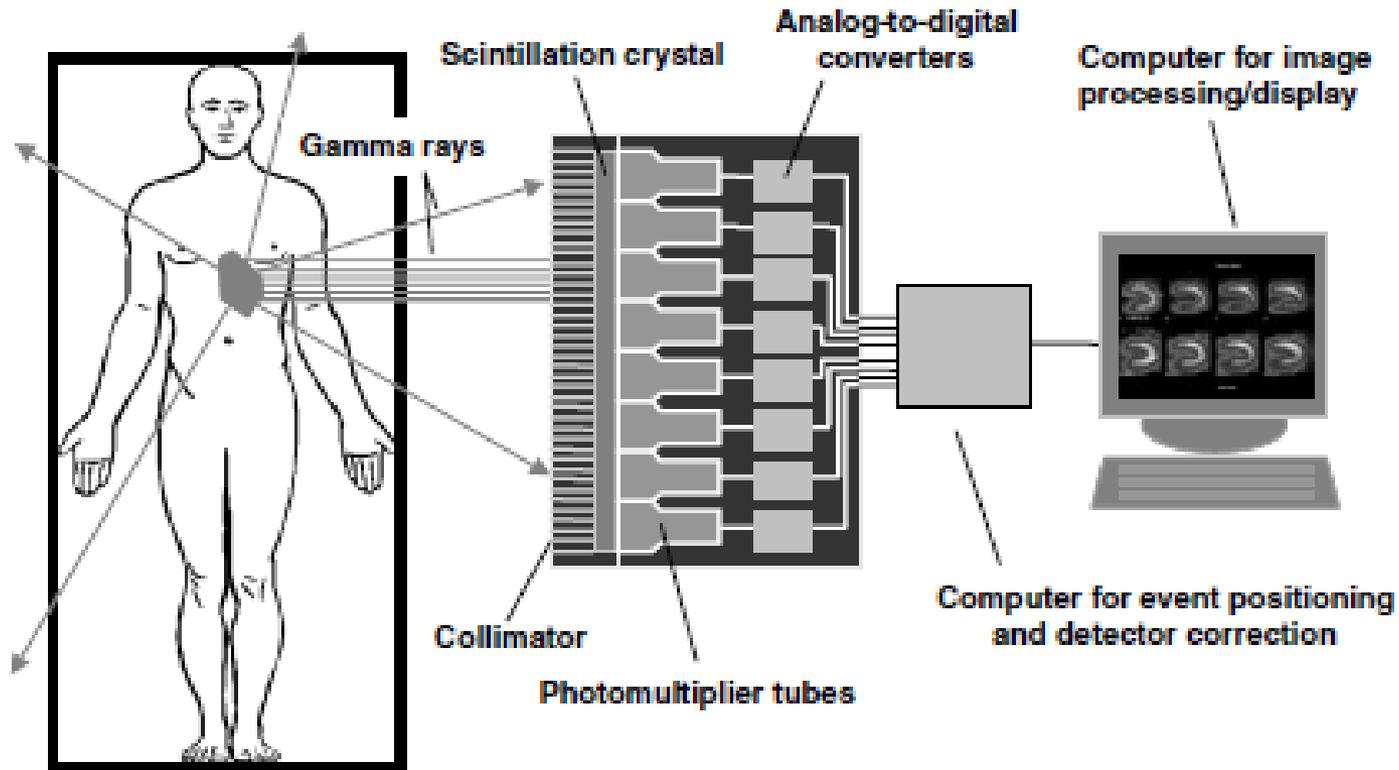
# Il radionuclide principe della medicina nucleare: il $^{99m}\text{Tc}$

Scoperto da Emilio Segre

1. Emette solo  $\gamma$  (140 keV): può essere usato per imaging senza danneggiare tessuti sani
2. Vita media di sole 6 ore: in poco tempo non c'è più radioattività, non inquina l'ambiente
3. Il tecnezio ha proprietà chimiche uniche e particolari: si può usare per “marcare” molecole capaci di fissarsi in molte parti diverse del corpo umano.

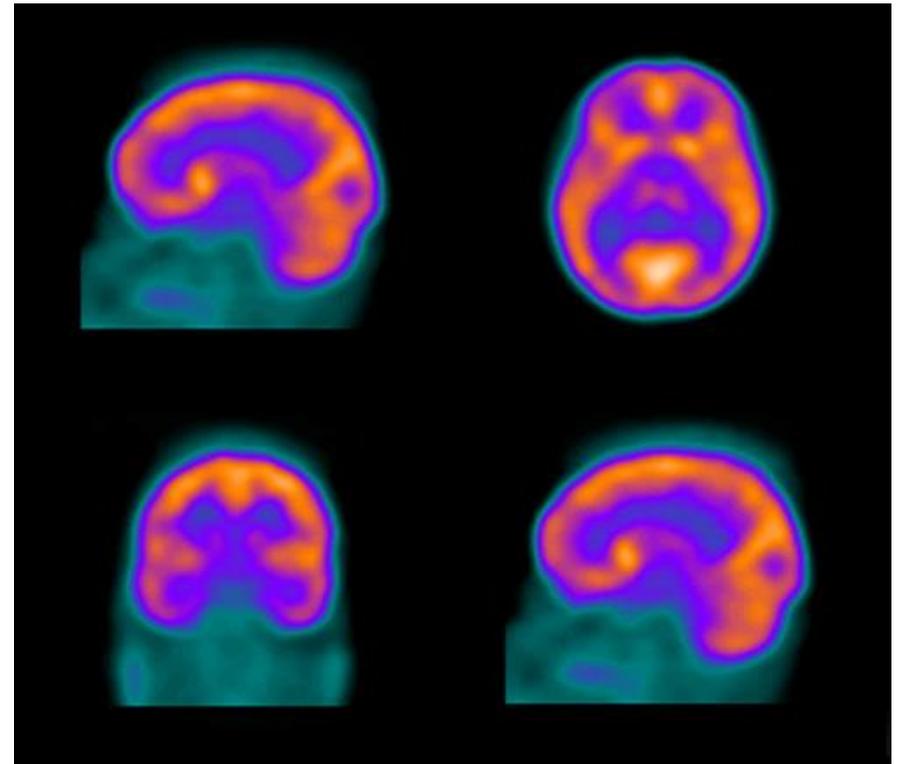
Si produce in reattori nucleari che usano uranio altamente arricchito

# La rivelazione dei $\gamma$ : la scintigrafia

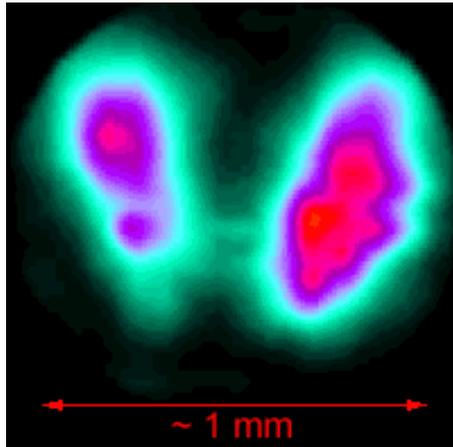


**Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)**

# SPECT



# Ricerca di altri radionuclidi utili



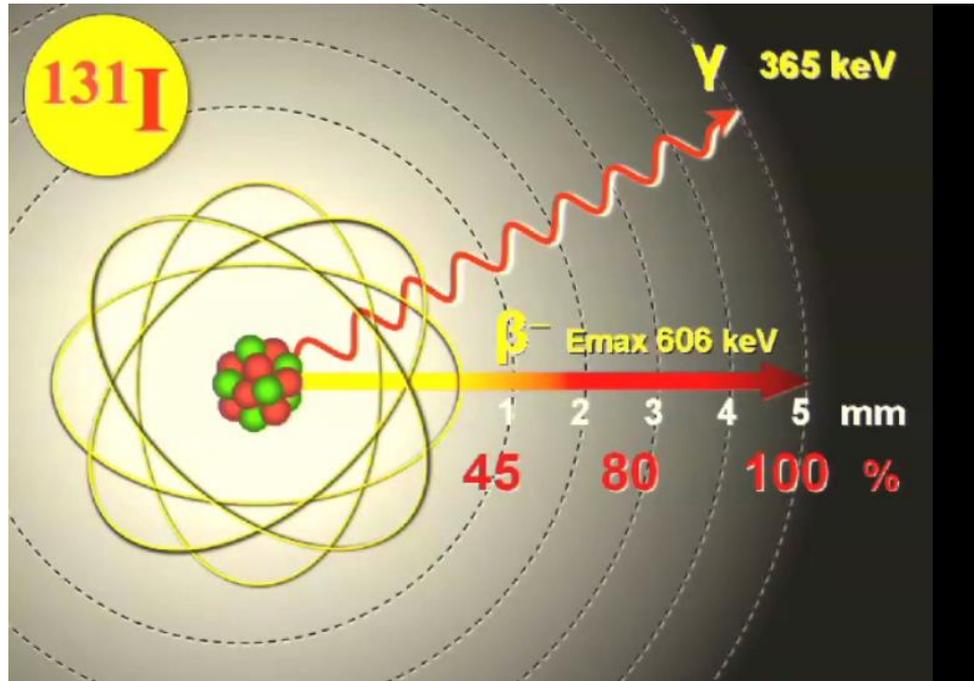
**Obiettivo: cercare un nucleo di un atomo che possa essere usato in modo da localizzarsi nella parte del corpo che interessa: **lo iodio nella tiroide!!****

**I-131: isotopo radioattivo dello Iodio che emette un  $\gamma$  da 365 keV: puo' uscire ed essere "visto".**

**Creazione di un immagine funzionale!!**

Viene in genere prodotto dalla fissione di Uranio e Torio, oppure utilizzando una reazione nucleare indotta da neutroni come quelli emessi da reattore nucleare

# Non solo “Imaging” (diagnostica), ma anche “Terapia”



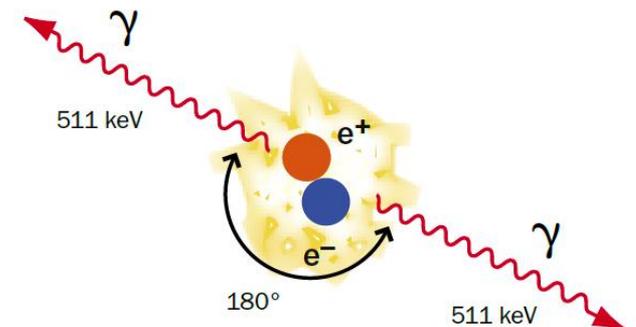
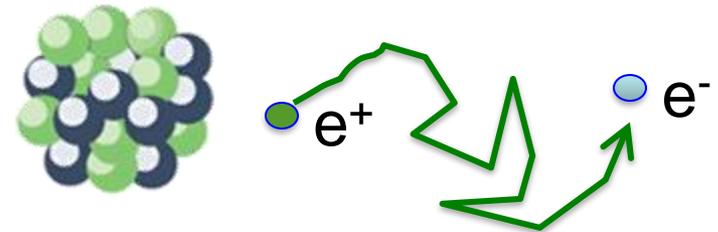
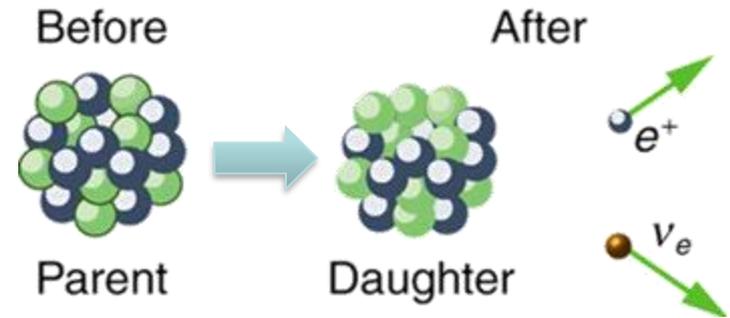
il nucleo di  $^{131}\text{I}$  non ha solo emissione  $\gamma$ , ma anche emissione  $\beta^-$  (cioè elettroni). In questo caso da 606 keV. Un elettrone di questo tipo “ionizza” gli atomi vicini, depositando la sua energia, entro qualche mm

Puo' essere usato per distruggere cellule malate!!

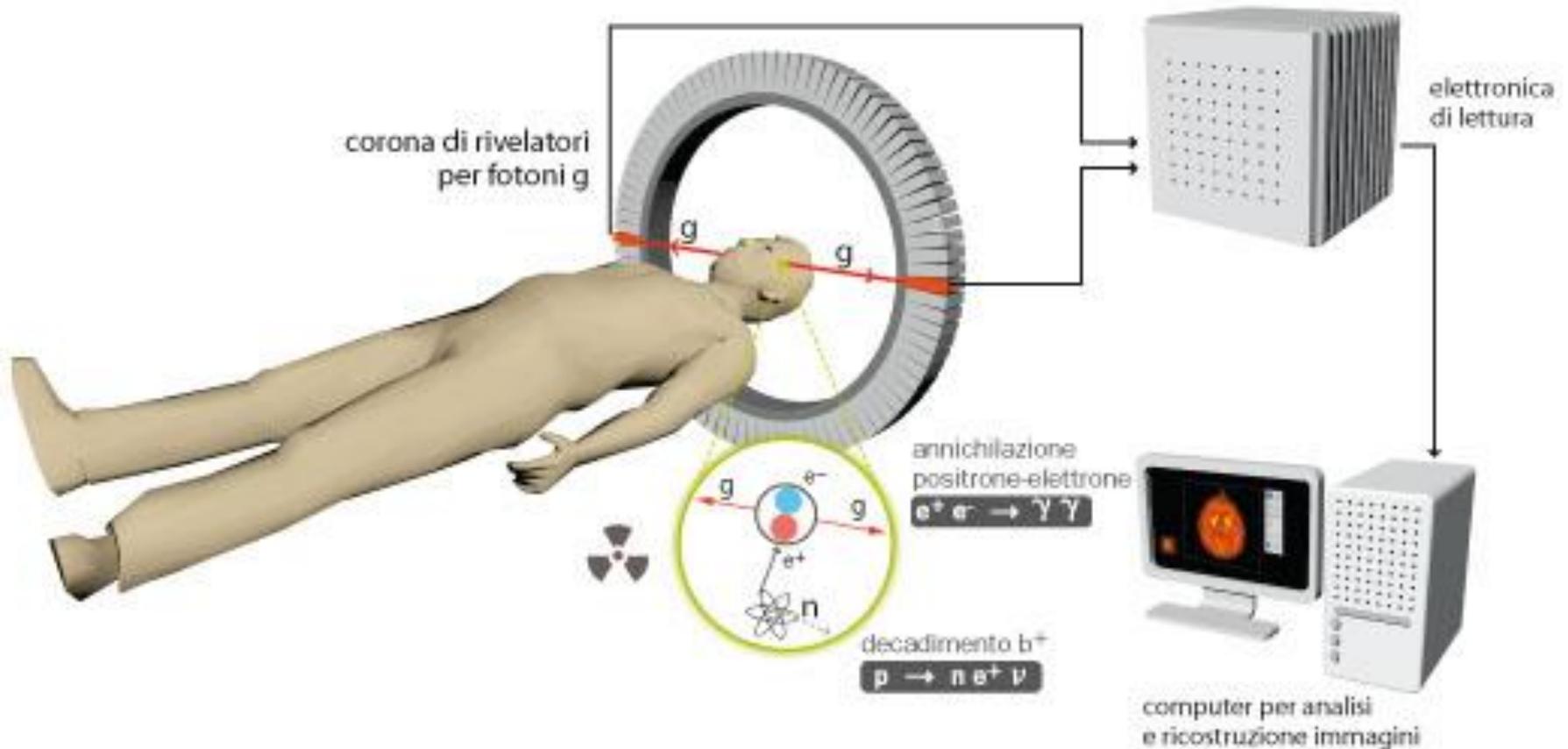
# L'uso dell'Antimateria in medicina

## Decadimento $\beta^+$

- Abbiamo visto che alcuni nuclei decadono  $\beta^+$  emettendo un positrone: l'antiparticella dell'elettrone.
- Il positrone perde energia nel tessuto del paziente: se emesso con poca energia si ferma vicino al nucleo che l'ha emesso
- Da fermo il positrone si annulla ("annichila") con uno degli elettroni del paziente.
- Vengono emessi due fotoni, che partono in direzione opposta, ciascuno con energia pari alla massa dell'elettrone/positrone

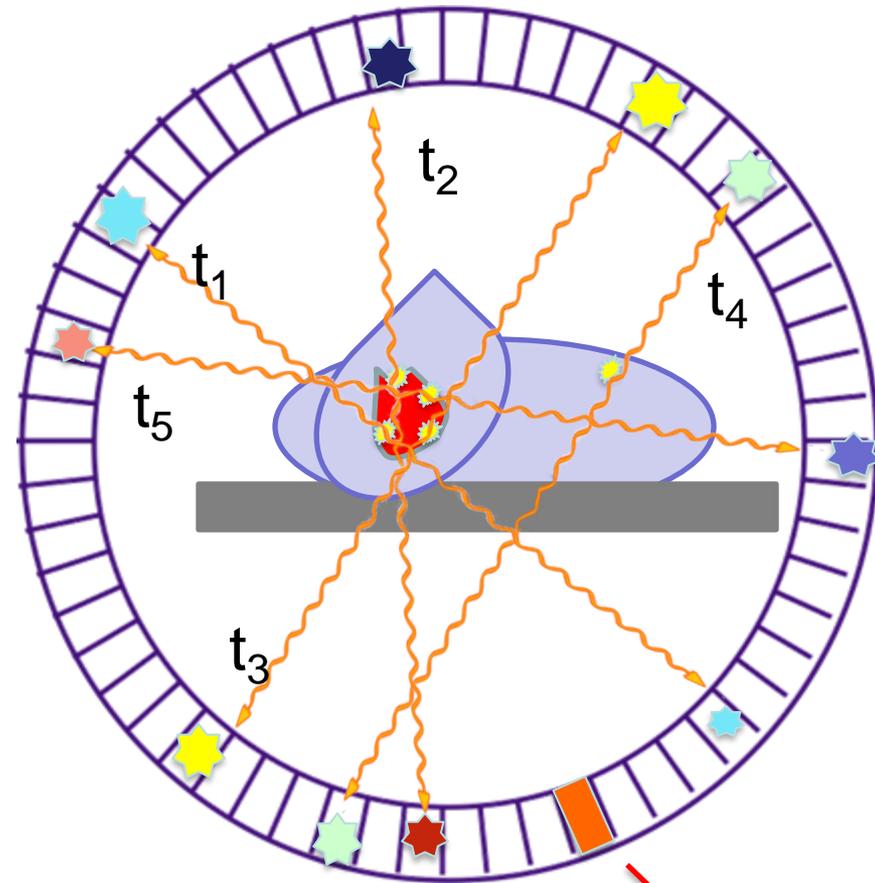


# Le Positron Emission Tomography (PET)

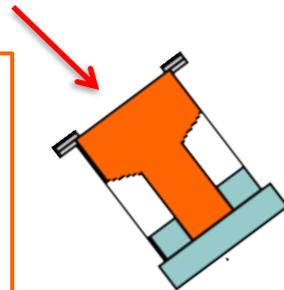


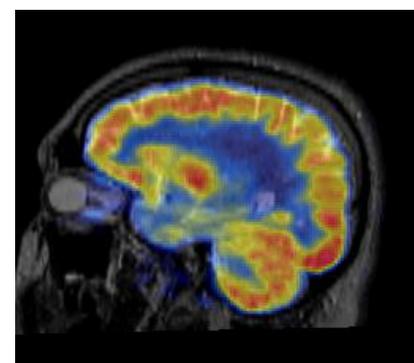
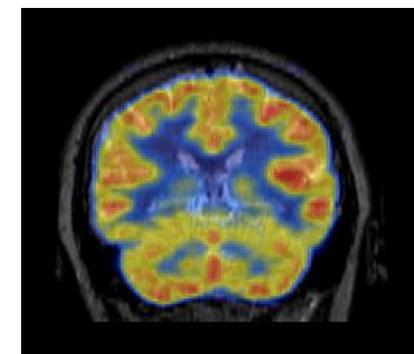
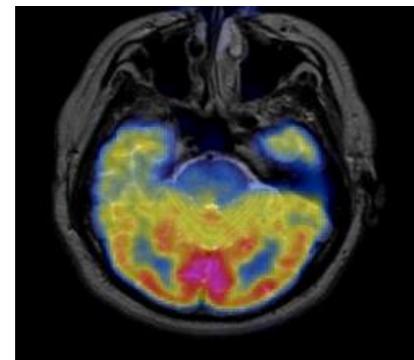
# Positron Emission Tomography

- I due  $\gamma$  **simultanei** rivelati definiscono una retta che passa a pochi mm dal punto di decadimento del tracciante
- Molte rette ricostruite grazie ai  $\gamma$  passano dalla zona dove si accumula il radiofarmaco
- Un complesso algoritmo e una notevole potenza di calcolo trasformano le linee in un'immagine diagnostica

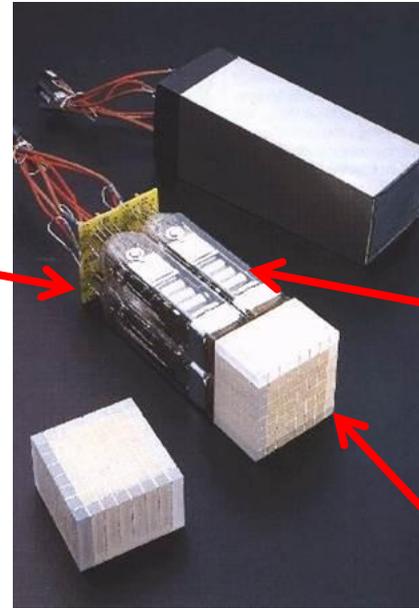
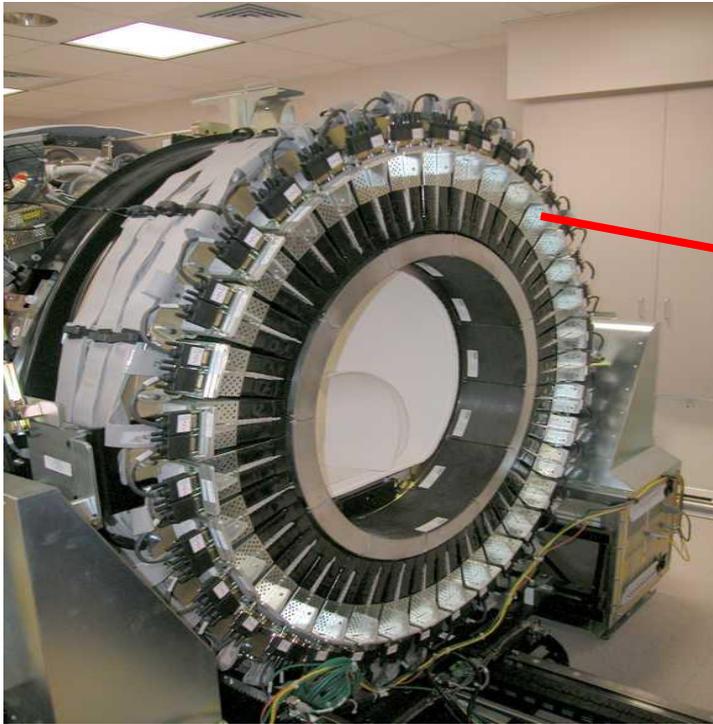


PET scanner: corona di rivelatori di gamma





# La rivelazione dei fotoni di annichilazione negli scanner medicali

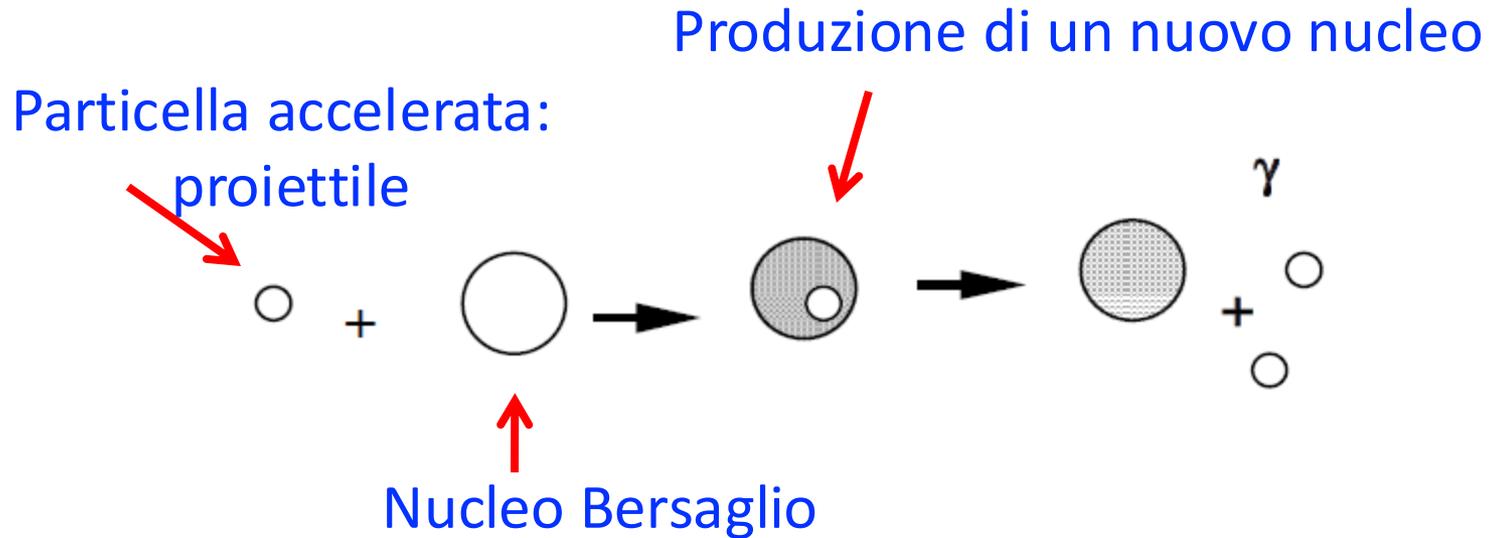


"Fotomoltiplicatori"

Cristallo "scintillante"

I gamma da annichilazione vengono assorbiti dal cristallo, che genera dei fotoni di luce ultravioletta

# Come si producono gli isotopi per la PET?

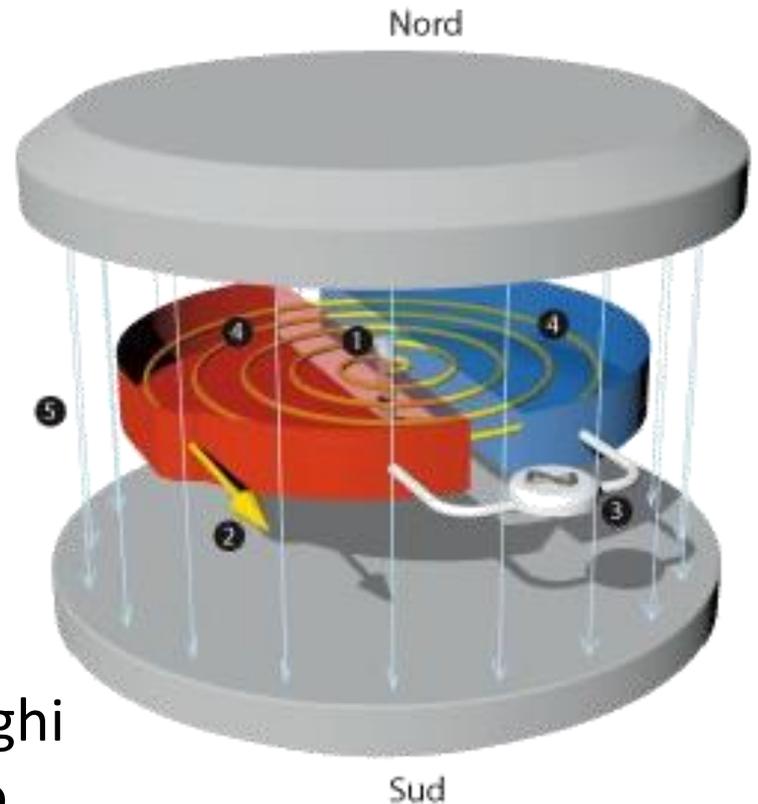


Segue poi:

- un procedimento chimico ("radiochimico") per separare il nucleo prodotto che interessa
- Un procedimento farmacologico per realizzare la molecola, il farmaco, marcato con il radionuclide selezionato

# I ciclotroni: acceleratori di particelle molto usati per la medicina

Inventati per la ricerca in fisica nucleare nel 1929, oggi il 30% di queste macchine è impiegato per scopi medicali



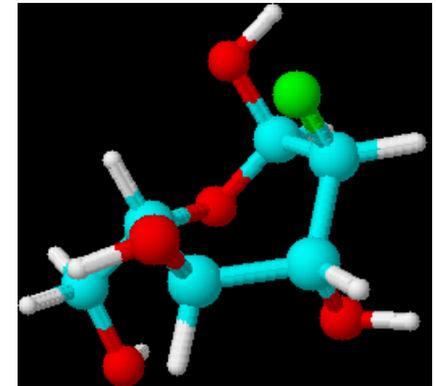
Per la produzione di  $^{18}\text{F}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{11}\text{C}$  o analoghi radionuclidi, molti ospedali gestiscono ciclotroni.

Per la PET il più diffuso isotopo radioattivo di questo tipo è il  $^{18}\text{F}$  (Fluoro 18)

Con il  $^{18}\text{F}$  si può marcare una molecola, un “radiofarmaco”, l' FDG, che è capace di fissarsi nelle zone ad alta attività metabolica



Cellule tumorali



Produzione di  $^{18}\text{F}$ :

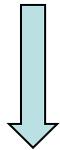
si “sparano protoni su un bersaglio d’acqua arricchita con  $^{18}\text{O}$ .”

Si ottiene, con una certa probabilità:  $^{18}\text{F} + 1$  neutrone

Isotopo $\beta^+$	$T_{1/2}$ (min)	Range (mm)
$^{18}\text{F}$	110	0.6
$^{11}\text{C}$	20	1.1
$^{68}\text{Ga}$	68	2.9

# Fisica nucleare per i beni culturali e l'archeometria

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



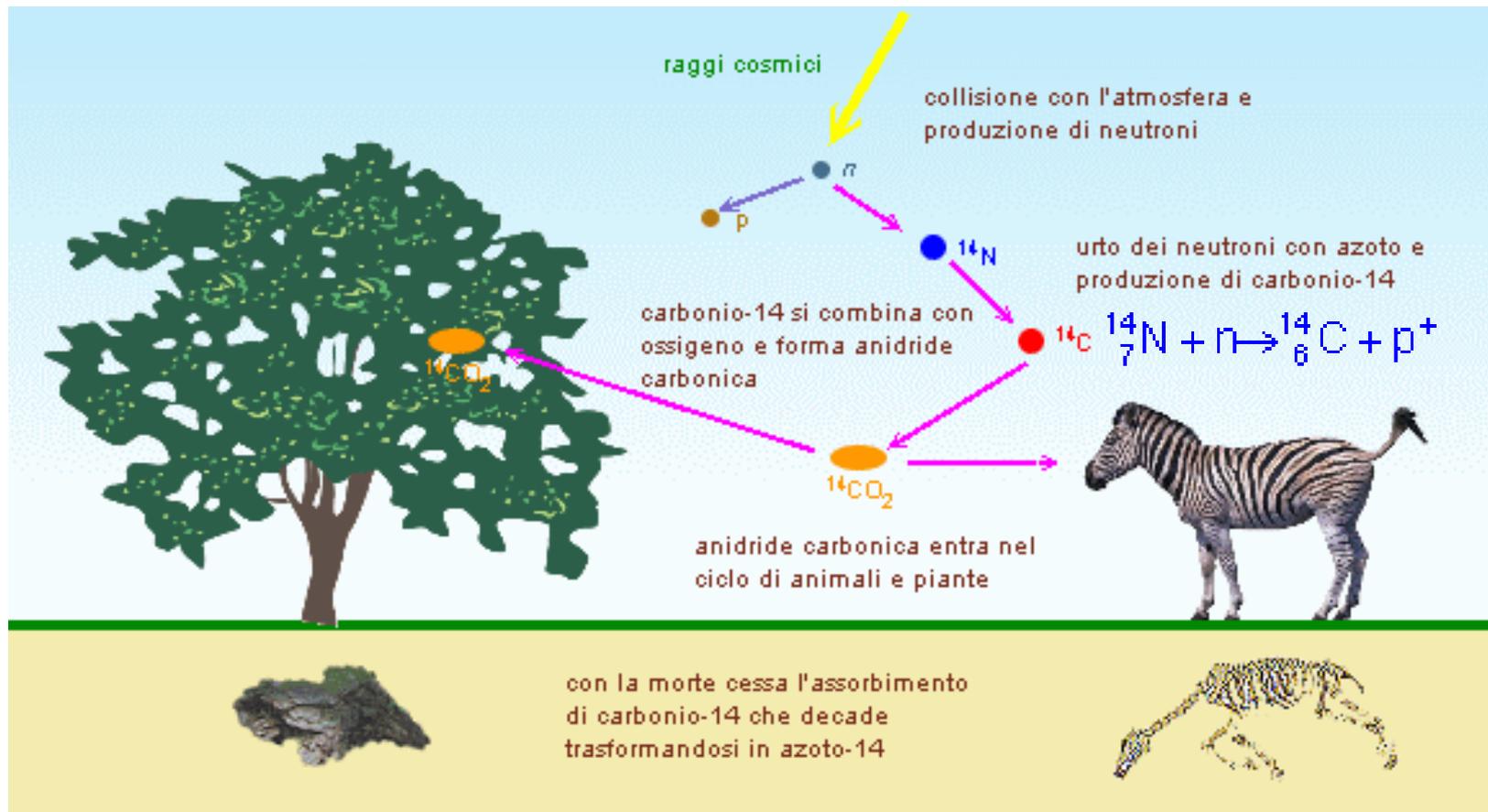
Per esempio:

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*

# 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 $^{14}\text{C}$

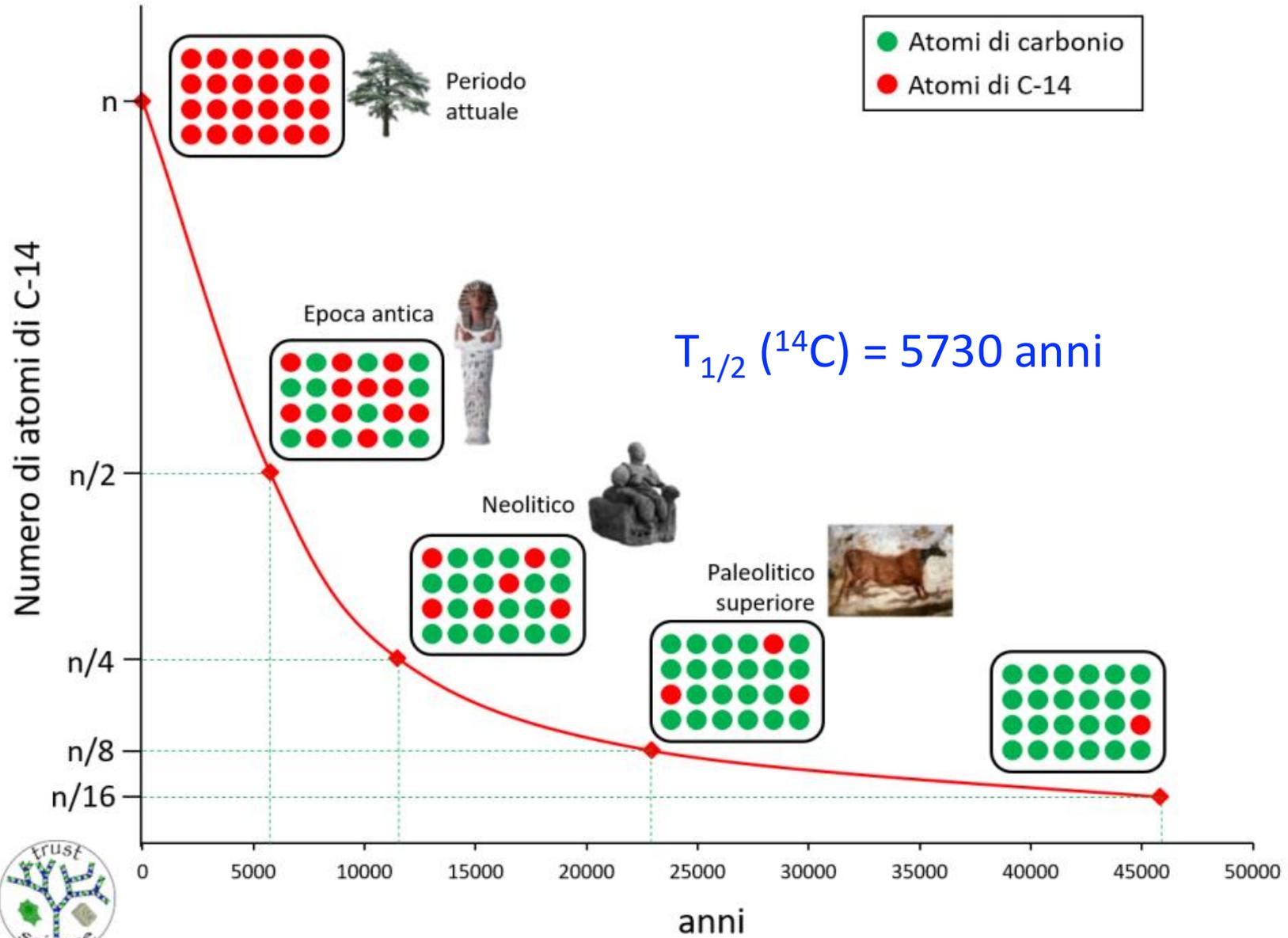
- Dopo la morte, però, la diminuzione di  $^{14}\text{C}$  nelle molecole organiche dei resti dovuta ai decadimenti radioattivi non è più compensata da riassunzione per vie metaboliche.
- Dal momento della morte, il rapporto tra  $^{14}\text{C}$  e carbonio totale progressivamente diminuisce seguendo 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.

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

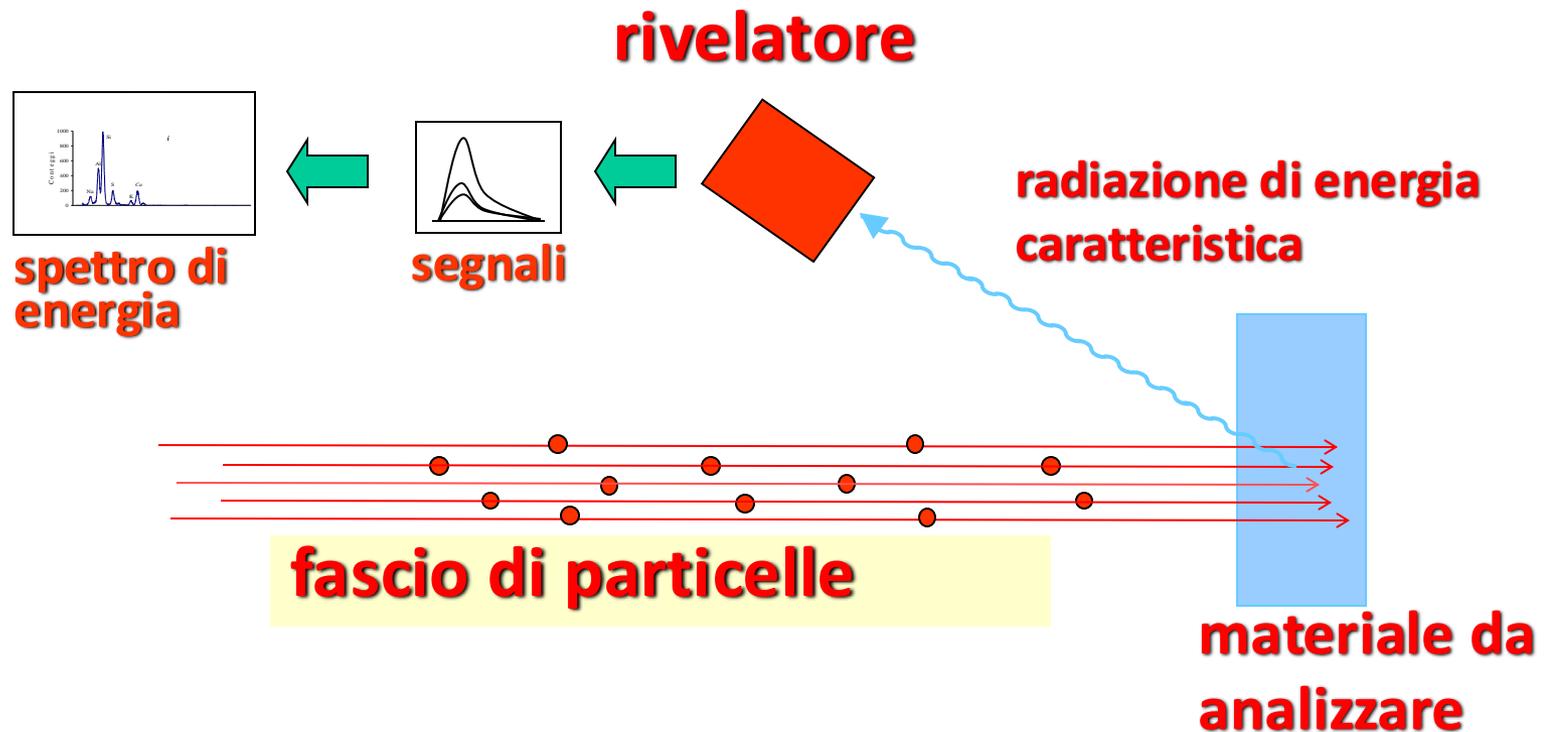
Per materiali non organici, altri isotopi radioattivi possono essere usati per la datazione:

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

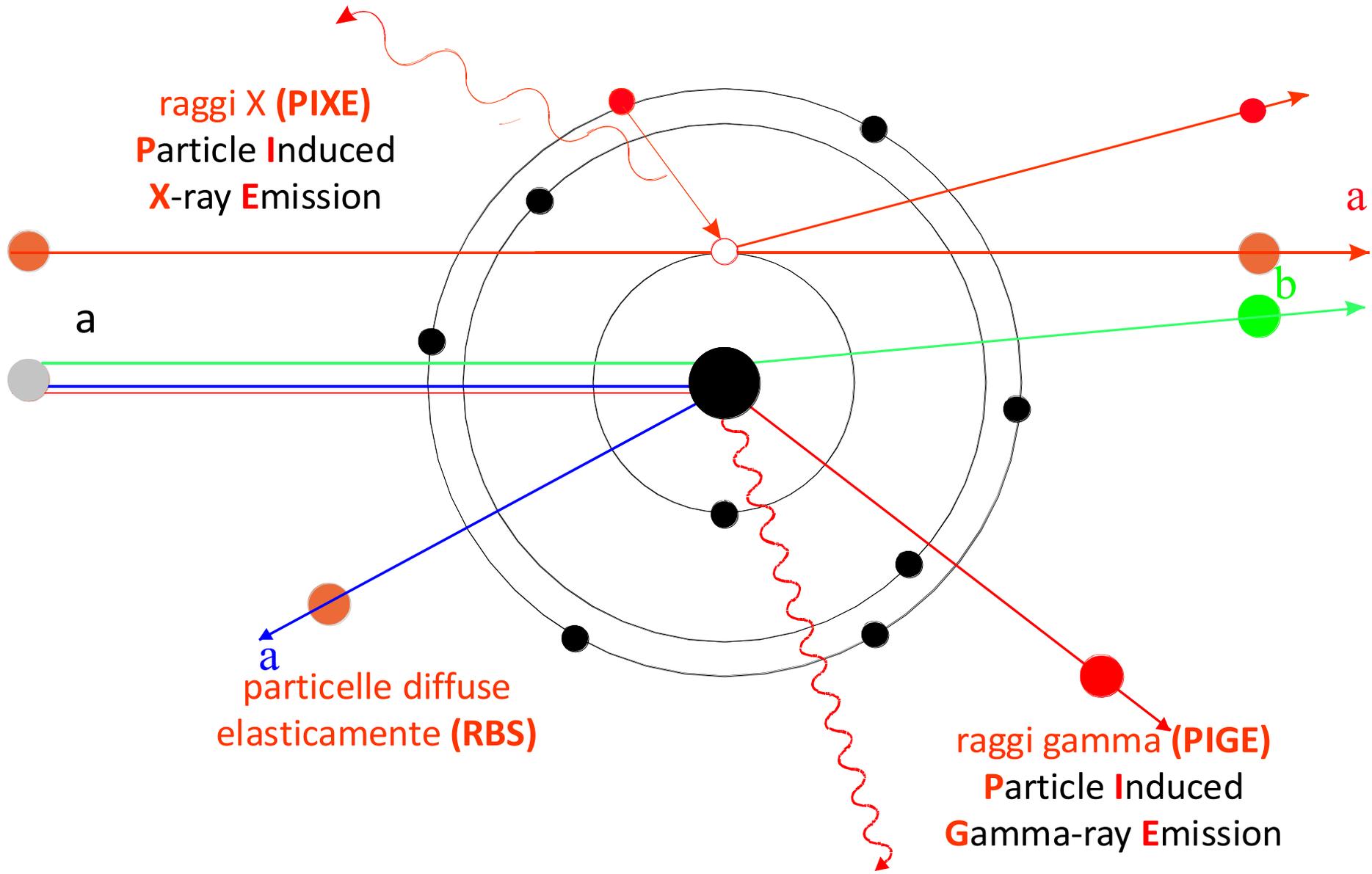
# Diminuzione dei livelli di C-14 negli organismi con il passare del tempo



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



# Ion Beam Analysis (IBA)



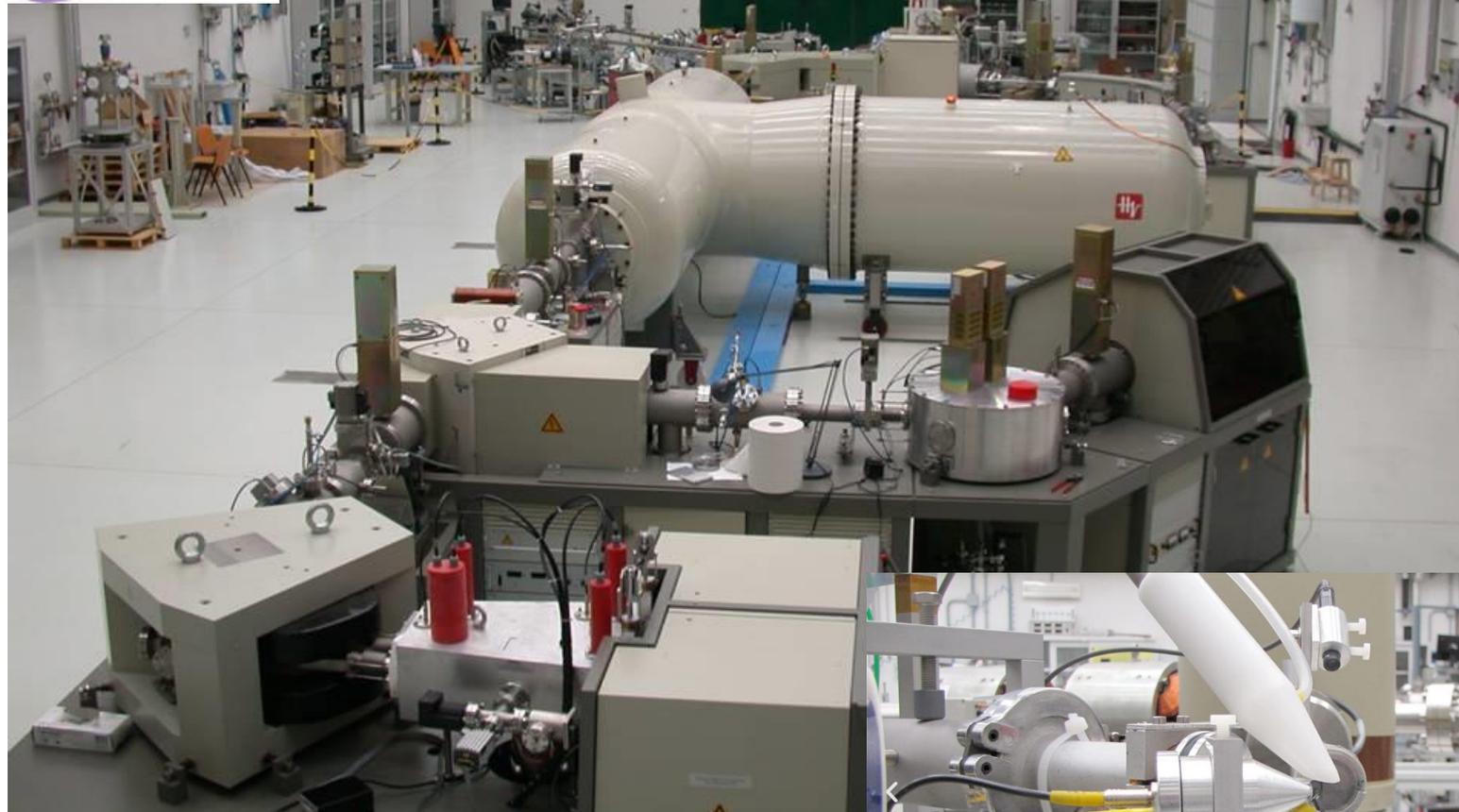


**Laboratorio di Tecniche Nucleari  
per i Beni Culturali - Firenze**

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

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

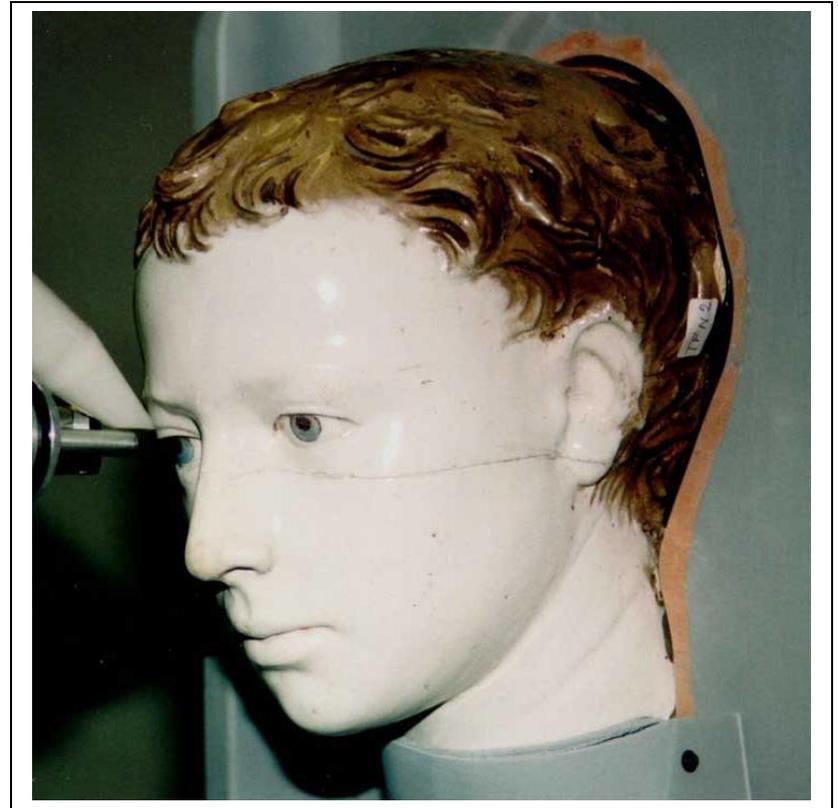
# acceleratore elettrostatico tandem da 3 MV



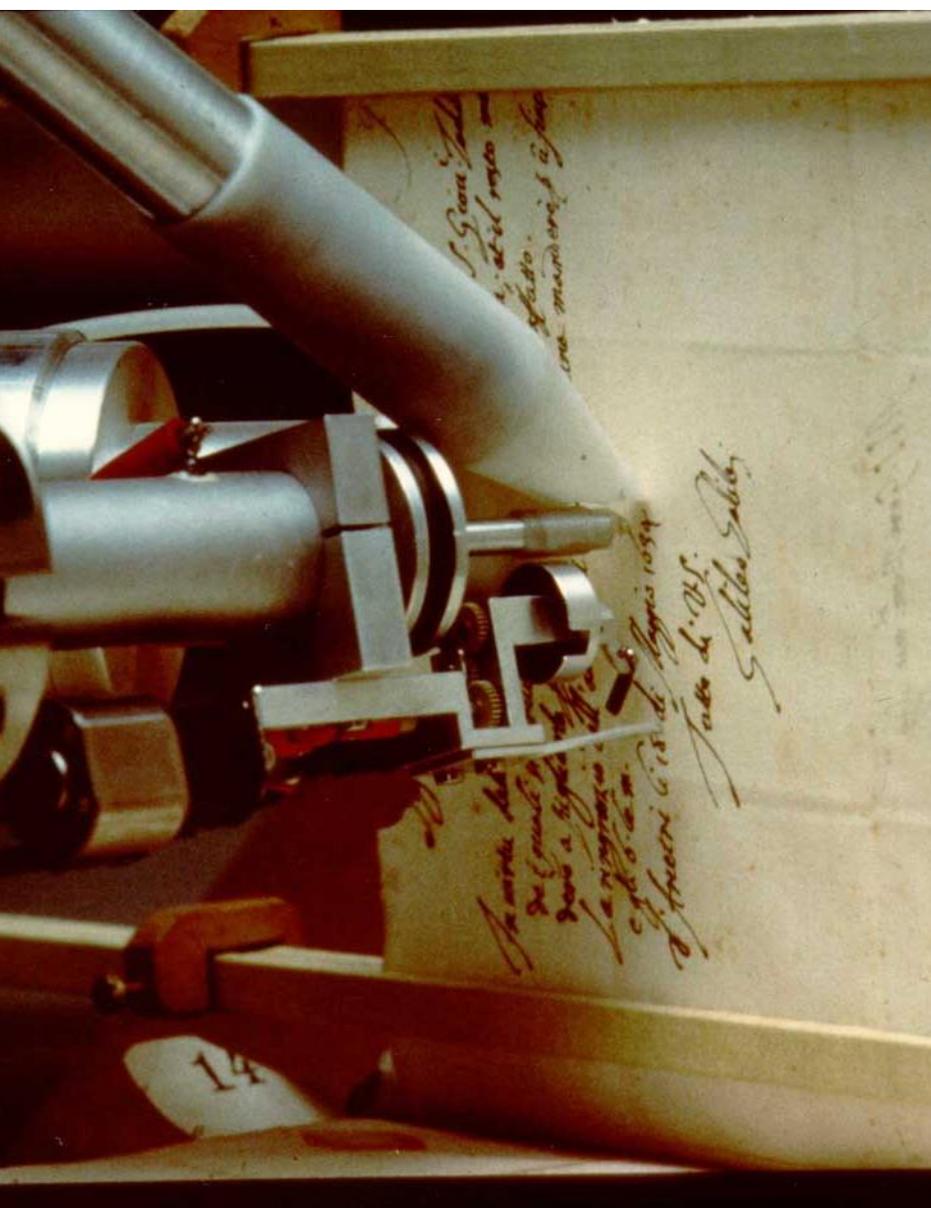
# Analisi di manoscritti antichi,



Analisi PIXE con fascio esterno del  
frontespizio del Pl.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



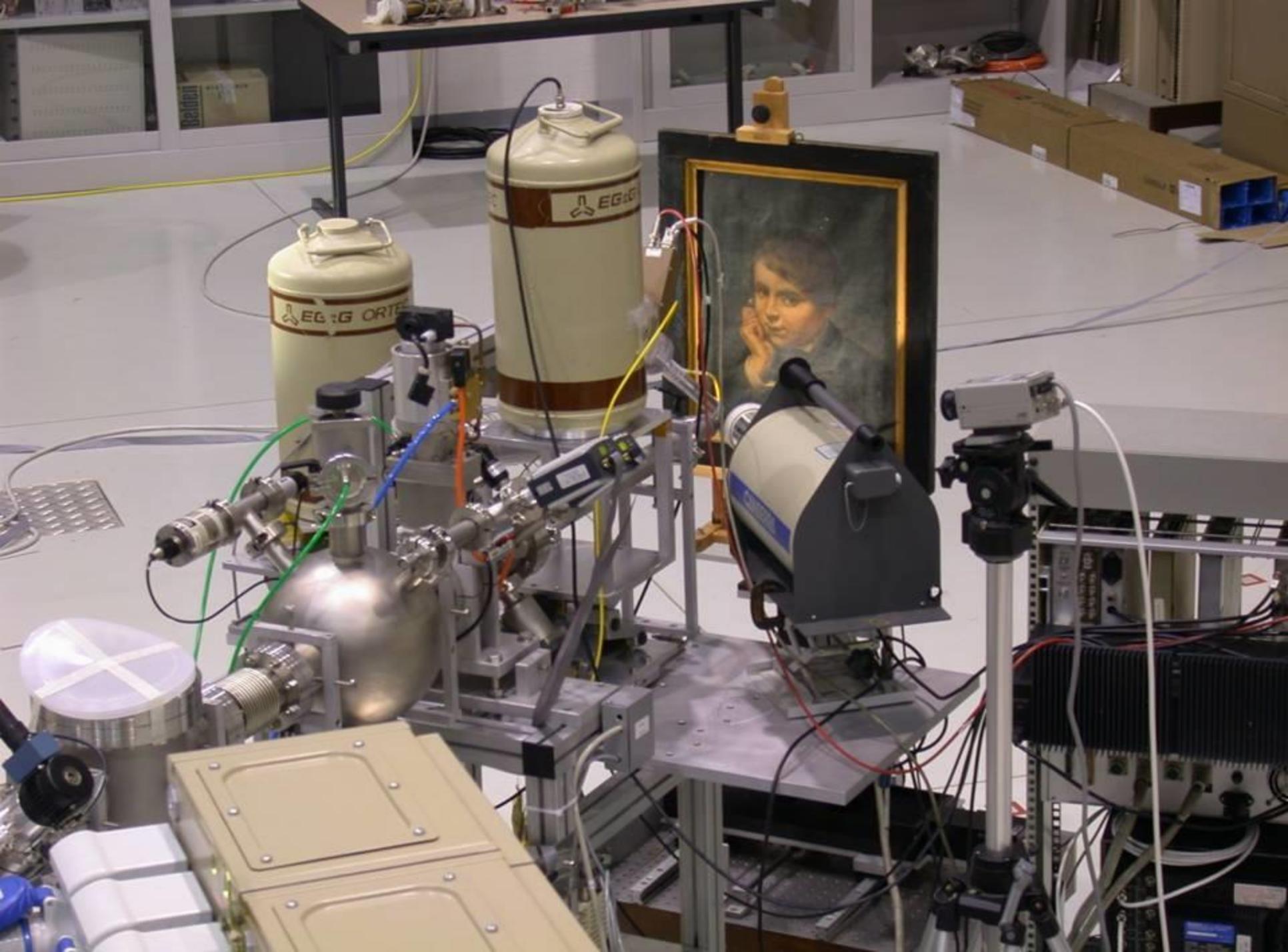
Una lettera di Galileo durante l'analisi PIXE

## 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.)**



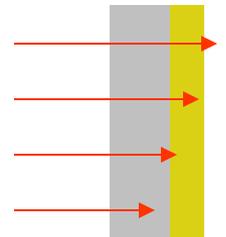


# Leonardo da Vinci Madonna dei fusi

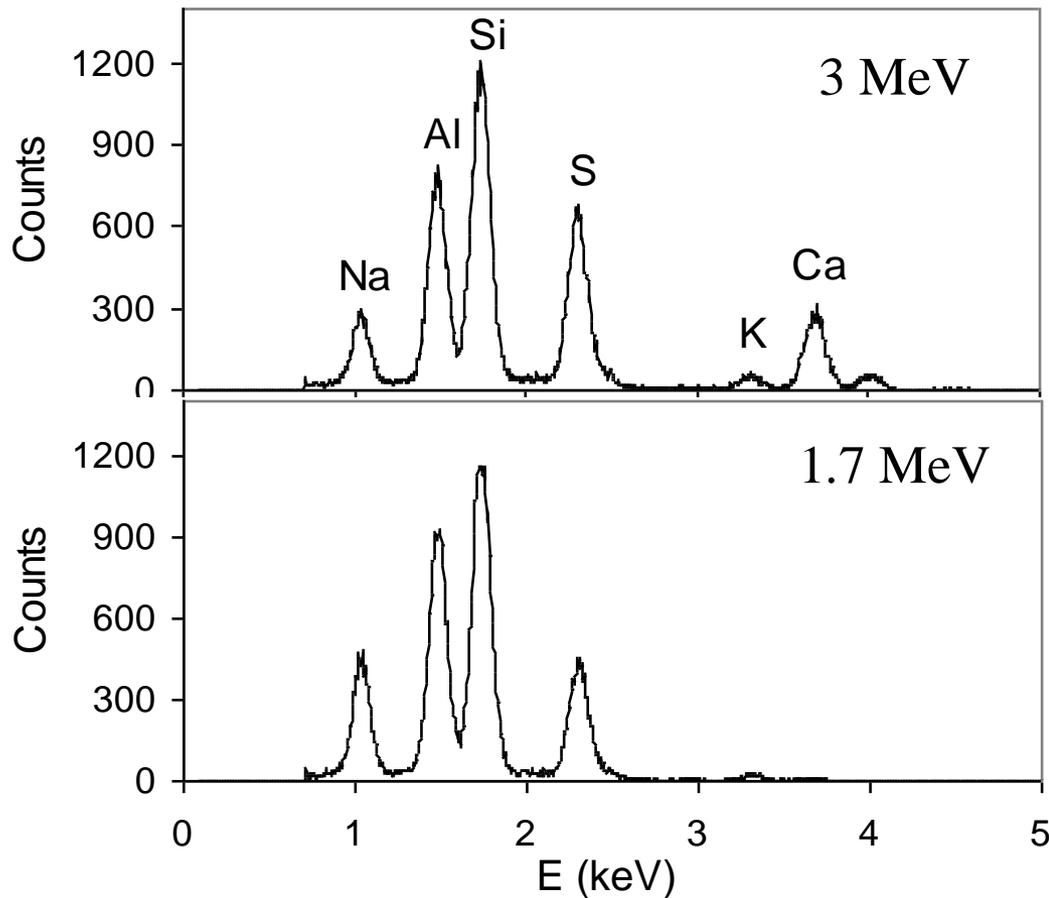
versione ex-Reford  
(collezione privata)

Olio su tavola, 50 x 36  
presumibilmente dipinto nel 1501

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



# Spettri PIXE ottenuti ad energie differenti



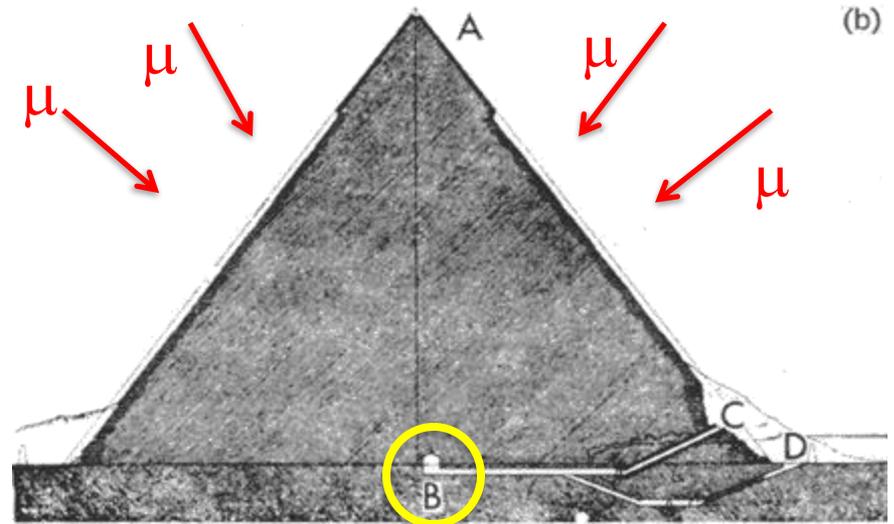
Strato pittorico di  
azzurro (lapislazzuli)  
steso su  
preparazione di  
solfato di calcio

# Radiografie 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”.

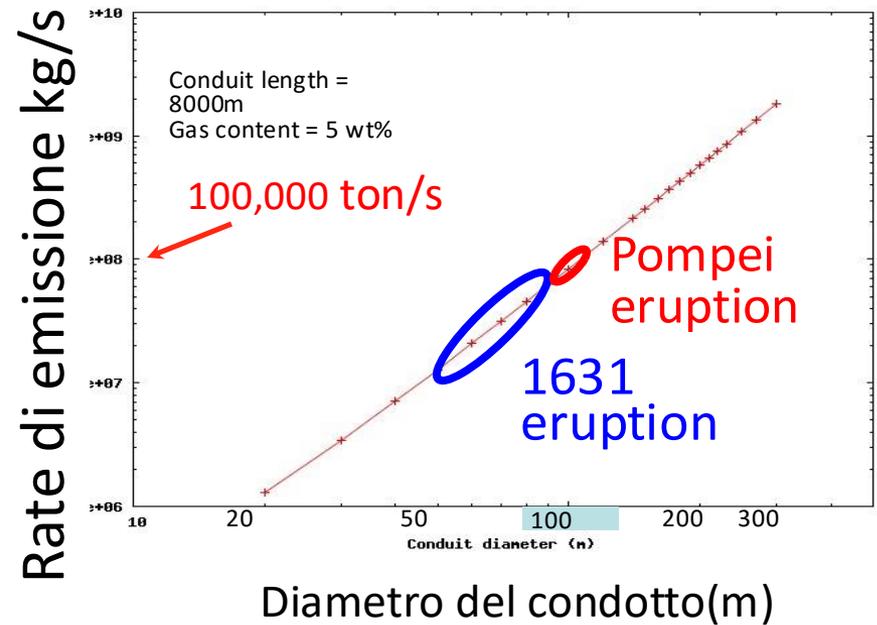
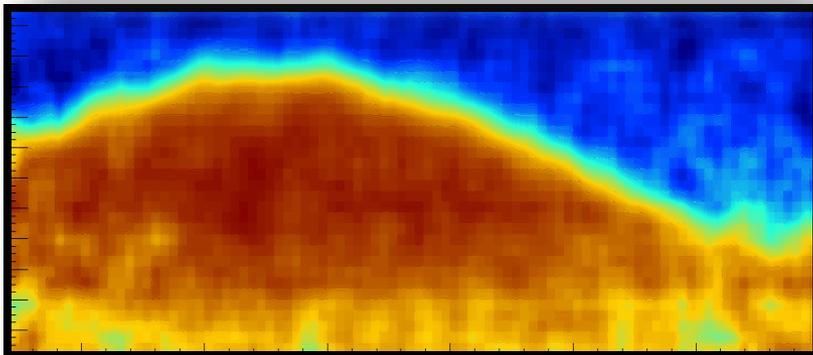


Per inciso..non si osservo' nessun'anomalia nella distribuzione dei muoni!

# Sempre più grande: $\mu$ -radiography di un vulcano

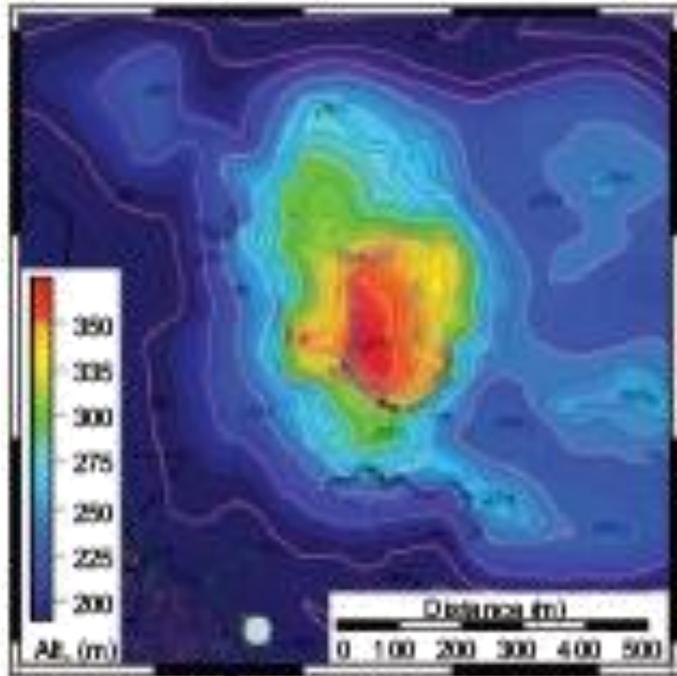
In vulcanologia è interessante sapere la dimensione del condotto di lava di un vulcano, perché la violenza di un'eventuale eruzione dipende anche da questo parametro.

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

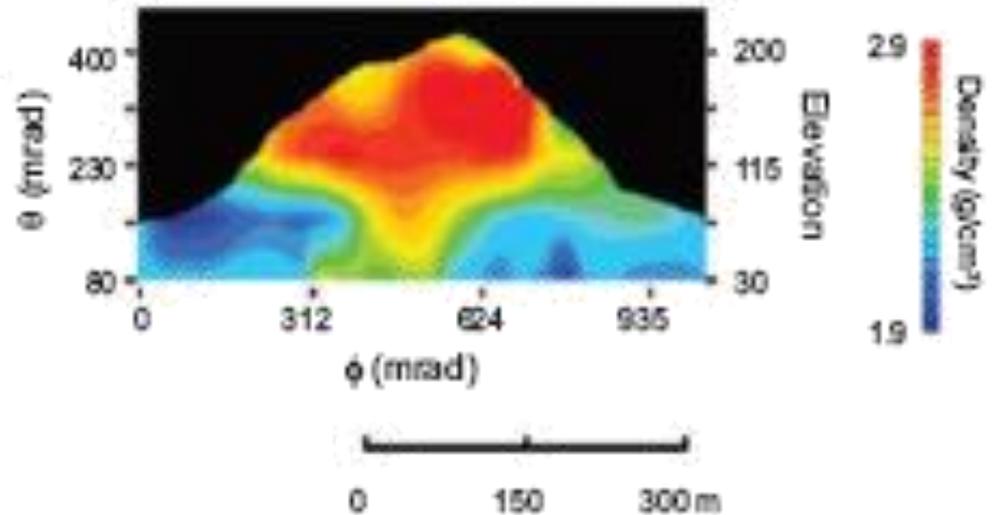


Radiografia della montagna con i  $\mu$

# Radiografia di un vulcano



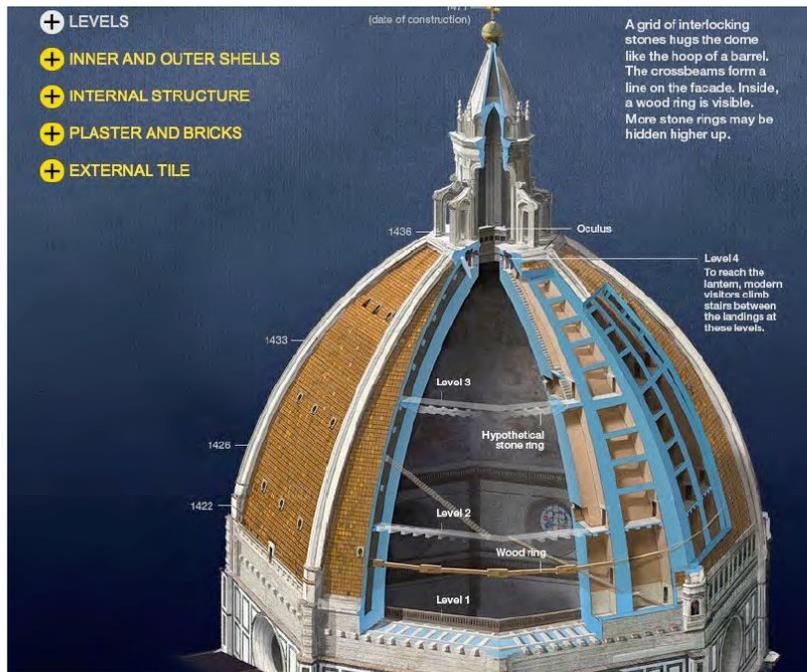
Muon Detector



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

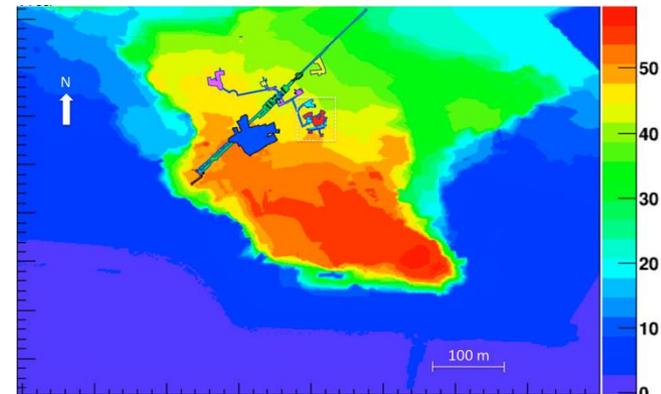
# Applicazioni simili

## 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



Grazie per  
l'attenzione!



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

Piazza Morettini (Centro Sportivo)  
Tel 339 7091963  
[www.utlcaravaggio.org](http://www.utlcaravaggio.org)  
[utlcaravaggio@gmail.com](mailto:utlcaravaggio@gmail.com)

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