

# **RE-FRESCOS**

## **TECNICHE NUCLEARI NON DISTRUTTIVE NEL CAMPO DEI BENI CULTURALI**

# *Qual è il contributo della Fisica Nucleare alla “Scienza per i Beni Culturali”?*

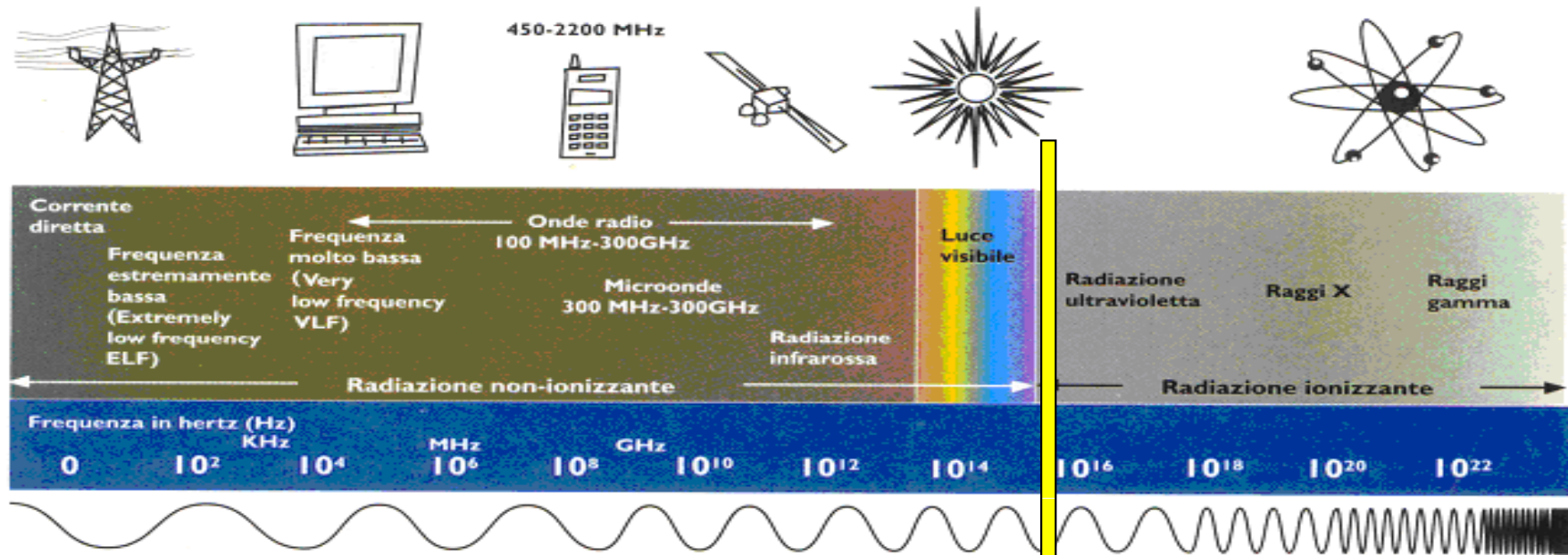
- **Datazione di reperti :  $^{14}\text{C}$**
- **Analisi dei materiali e dei manufatti**
  - Analisi dei costituenti
  - Analisi radiografica

## *Analisi di composizione di materiali: per sapere cosa?*

- ✓ informazioni specifiche su singole opere
- ✓ informazioni su tecnologie di produzione, fonti di approvvigionamento, canali di scambio commerciali nel passato.
- ✓ conoscenza dello stato di degrado
- ✓ conoscenza dei materiali originali per scegliere la tecnica e i materiali dell'intervento conservativo

# DUE CLASSI DI RADIAZIONE

In base all'energia della radiazione si può avere:



***RADIAZIONE  
NON - IONIZZANTE***



Queste radiazioni **non sono in grado di rompere direttamente i legami molecolari** perché non possiedono energia sufficiente e producono principalmente **effetti termici**.

***RADIAZIONE  
IONIZZANTE***

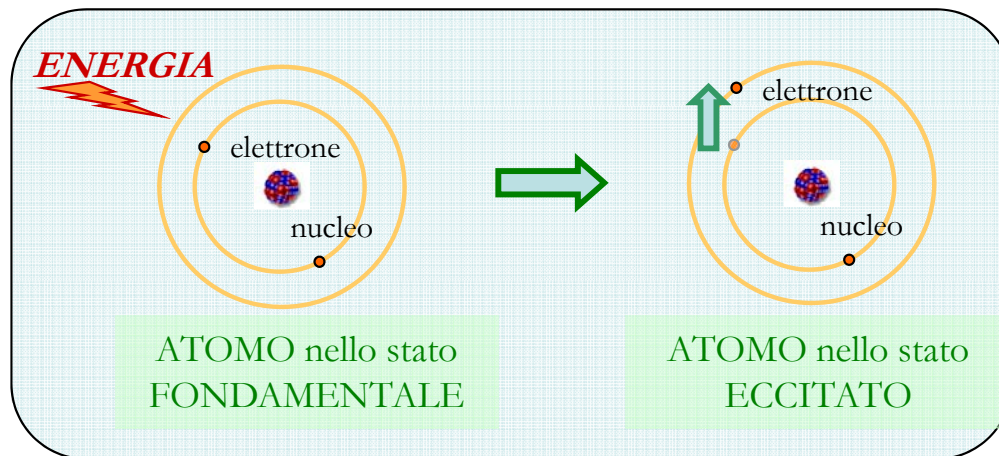


# LE RADIAZIONI IONIZZANTI

Interazione con la materia  cessione di energia agli elettroni atomici del materiale attraversato.

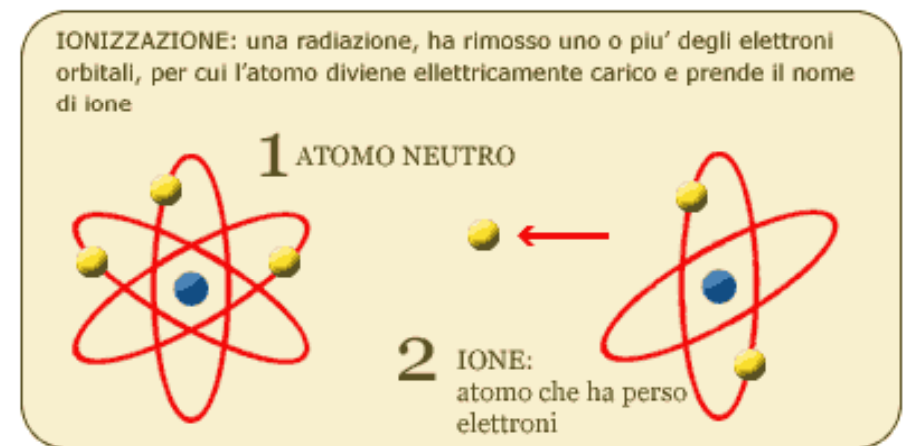
## Eccitazione dell'atomo

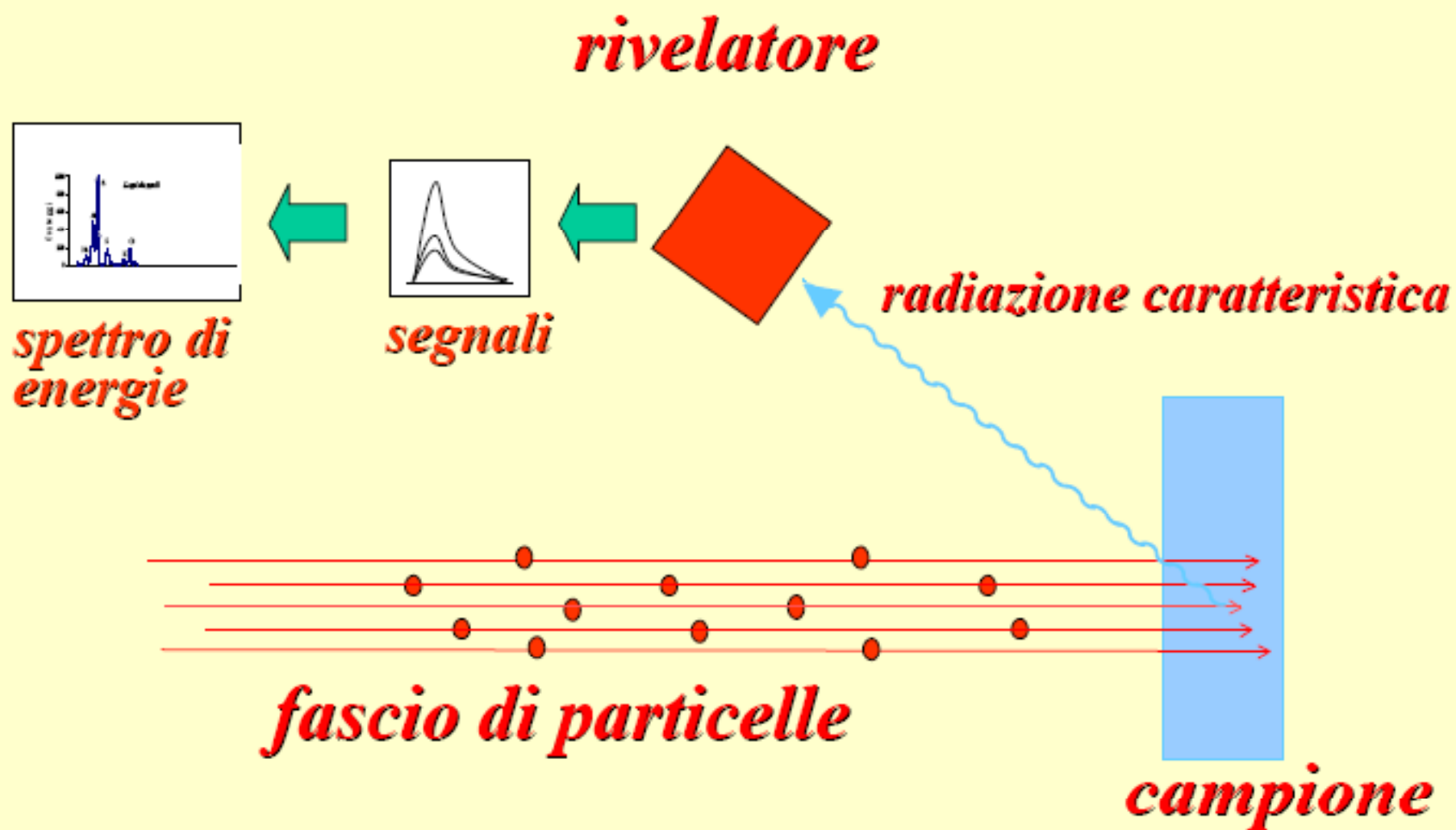
passaggio dallo stato fondamentale a uno stato eccitato in cui l'elettrone è ancora legato



## Ionizzazione

rimozione di uno o più elettroni il cui legame con il nucleo atomico è spezzato nell'urto a spese dell'energia della particella ionizzante



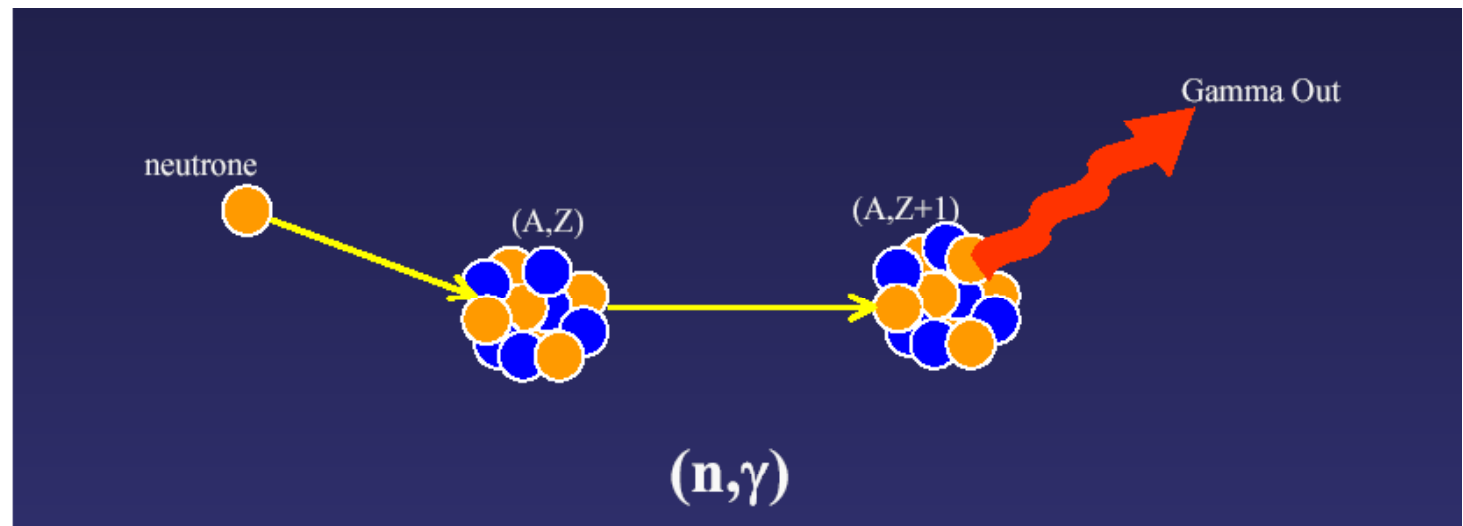


# NAA Neutron Activation Analysis

- Il processo dell'attivazione neutronica consiste nella **produzione di un isotopo instabile** attraverso l'assorbimento di neutroni da parte dei nuclei preesistenti in un dato materiale.
- Il fotone emesso a seguito della reazione  $(n,\gamma)$  ha in genere un'energia tipica di legame del neutrone catturato.
- Il nucleo formatosi contiene un neutrone in più e **le particelle del decadimento non vengono emessi istantaneamente**, ma con la solita legge temporale che è legata alla **costante di decadimento  $\lambda$**  del nucleo formatosi.

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

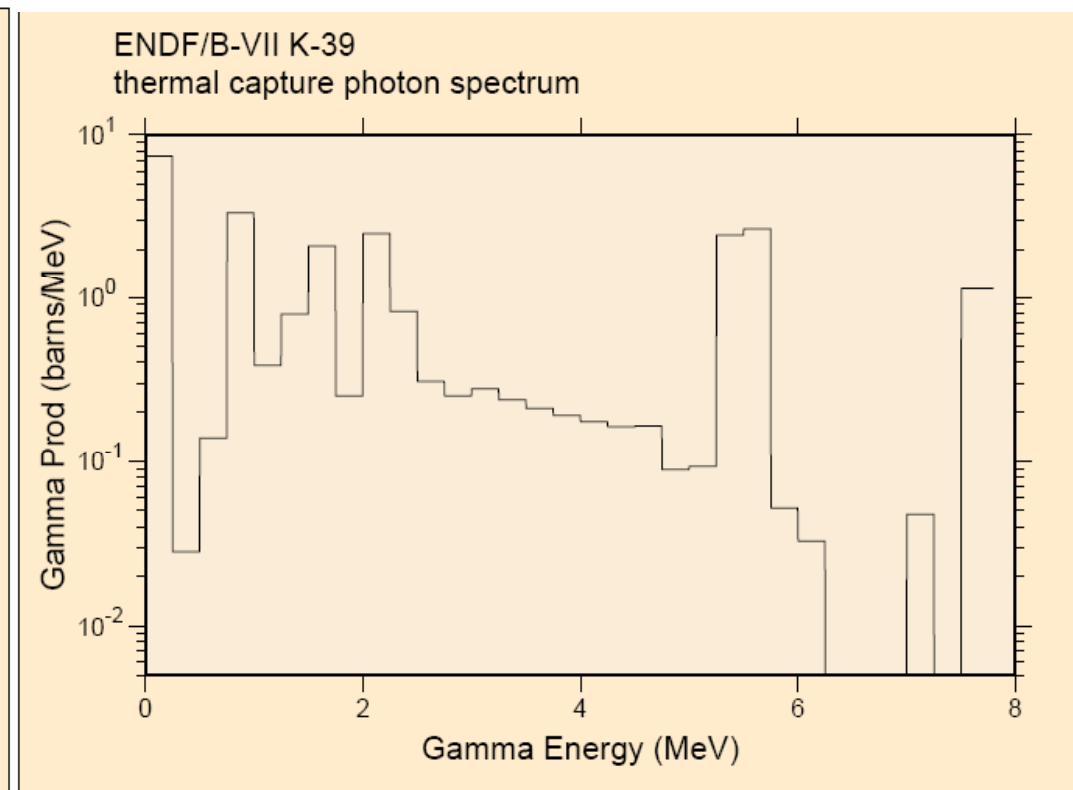
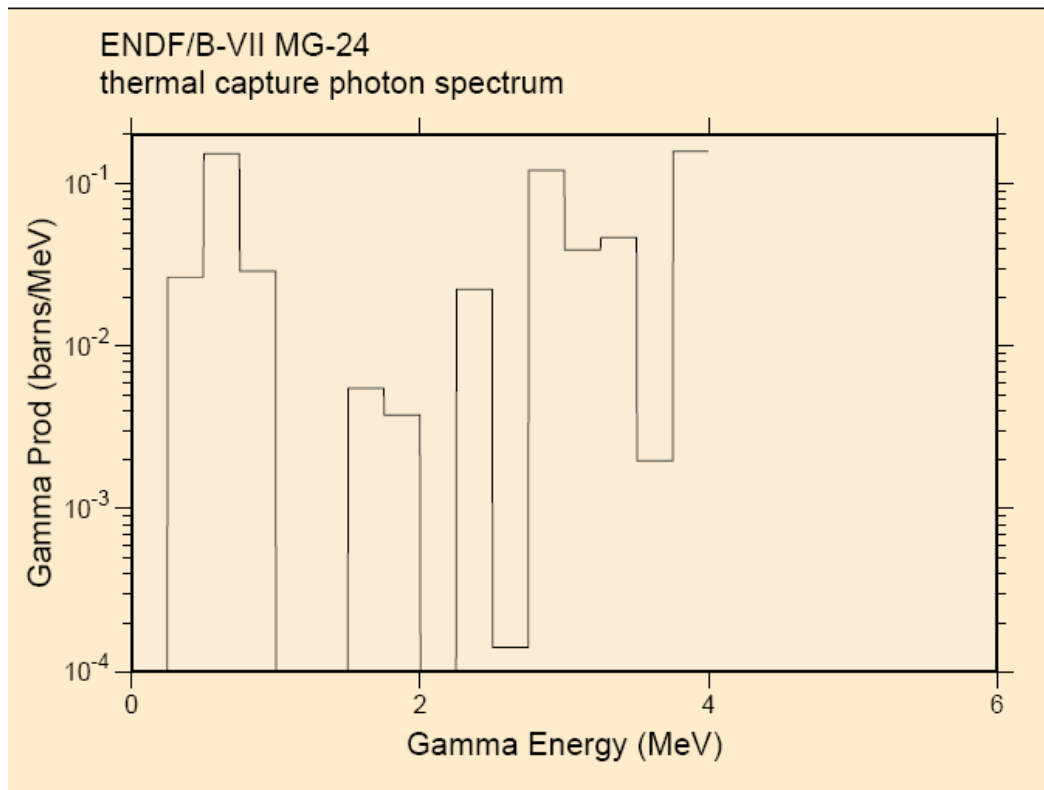
$$\lambda = T_{1/2} / 0.693$$



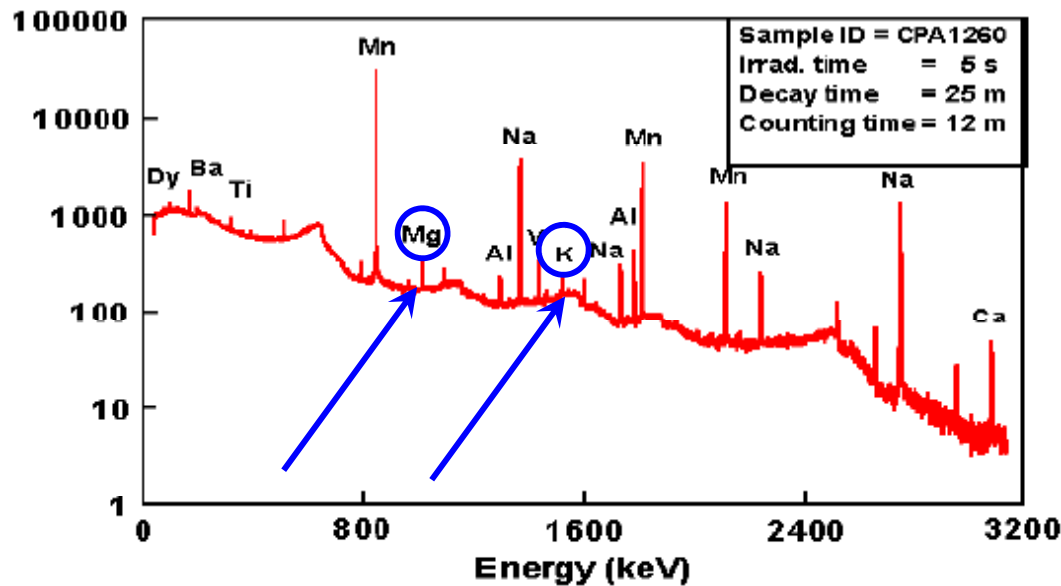
# La NAA applicata al progetto RE-FRESCOS

## ➤ Problema della presenza di Sali di Magnesio, Sali di Potassio (o altro ?) negli intonaci.

Quando gli isotopi radioattivi decadono a forma stabile, avviene la misura dei raggi- $\gamma$  emessi, generalmente effettuata utilizzando rivelatori a semiconduttore. I più comuni sono quelli a germanio (hyperpure germanium HPGe).



# La NAA applicata al progetto RE-FRESCOS



Per calcolare la concentrazione incognita del campione generalmente si effettua un confronto con uno standard noto di riferimento:

$$\frac{A_{sam}}{A_{std}} = \frac{m_{sam} \cdot \left( e^{-\lambda T_d} \right)_{sam}}{m_{std} \cdot \left( e^{-\lambda T_d} \right)_{std}}$$

Sensitivity (picograms)	Elements
1	Dy, Eu
1 - 10	In, Lu, Mn
10 - 100	Au, Ho, Ir, Re, Sm, W
100 - 10 <sup>3</sup>	Ag, Ar, As, Br, Cl, Co, Cs, Cu, Er, Ga, Hf, I, La, Sb, Sc, Se, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, Yb
10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>	Al, Ba, Cd, Ce, Cr, Hg, Kr, Gd, Ge, Mo, Na, Nd, Ni, Os, Pd, Rb, Rh, Ru, Sr, Te, Zn, Zr
10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>	Bi, Ca, K, Mg, P, Pt, Si, Sn, Ti, Tl, Xe, Y
10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>	F, Fe, Nb, Ne
10 <sup>7</sup>	Pb, S

**Il principale vantaggio dell'analisi con metodi NAA è l'elevata sensibilità per numerosi elementi (fino a 100 volte superiore rispetto ad altre tecniche)**



# Radiografia e tomografia di neutroni

- La radiografia e la tomografia sono applicazioni “illustrative” che permettono di vedere la struttura interna di un oggetto. Neutroni e raggi X forniscono informazioni diverse ma complementari;
- Una radiografia consiste semplicemente in un irraggiamento di un oggetto riprendendo la proiezione;
- Una tomografia consiste in una ripresa di tante immagini in diverse direzioni;
- I raggi X interagiscono con le nuvole elettroniche degli atomi dando luogo a diffusione ed assorbimento. Più elettroni un elemento possiede, più forte è l'attenuazione dei raggi X;
- **I neutroni interagiscono con il nucleo degli atomi e l'interazione dipende fortemente dalla struttura interna dei nuclei atomici.** Questo significa che è possibile distinguere tra diversi isotopi dello stesso elemento, perché causano diversi livelli di contrasto nella proiezione.

# PROFONDITÀ DI PENETRAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

La distribuzione dell'energia ceduta dalla particella lungo la sua traiettoria all'interno della materia, e quindi la profondità di penetrazione, dipende dal tipo e dall'energia iniziale delle particelle ionizzanti, oltre che dalle caratteristiche del mezzo attraversato.



# Radiografia Neutronica



Simulazione di rivelazione di una bomba



immagine ripresa con una sorgente portatile di raggi X



immagine ripresa con una sorgente gamma di cobalto-60



**La radiografia neutronica rivela la struttura interna della bomba.**

## Un esempio

Le potenzialità della tomografia neutronica sono illustrate dalla recente analisi di una statua bronzea del secolo XVII. La rielaborazione al computer dell'analisi tomografica neutronica, ottenuta combinando l'informazione di decine di migliaia di radiografie neutroniche, consente di ricostruire l'immagine tridimensionale della statua fin nei minimi particolari. L'interno della statua appare cavo e contiene quello che resta dei supporti utilizzati nella sua realizzazione. Sono inoltre visibili le saldature tra parti della statua fuse in tempi diversi. L'analisi di questi e altri particolari fornisce informazioni preziose per comprendere la tecnica di fusione della statua e per valutare eventuali interventi di conservazione.



Radiografia del *Nobile che cammina* (*Striding nobleman*), statua bronzea Rijksmuseum di Amsterdam (n. inventario BK16083; curatore F.Schober)

**C.Andreani,**  
*Università degli  
Studi di Roma Tor  
Vergata*

**G.Gorini**  
*Università degli  
Studi di Milano –  
Bicocca*



Elaborazioni al computer della tomografia neutronica del *Nobile che cammina* eseguita di recente presso il centro di ricerca PSI in Svizzera (a cura di R.van Langh, D.Visser, E. Lehmann, P. Vontobel, M. Estermann)

# Vantaggi e limitazioni

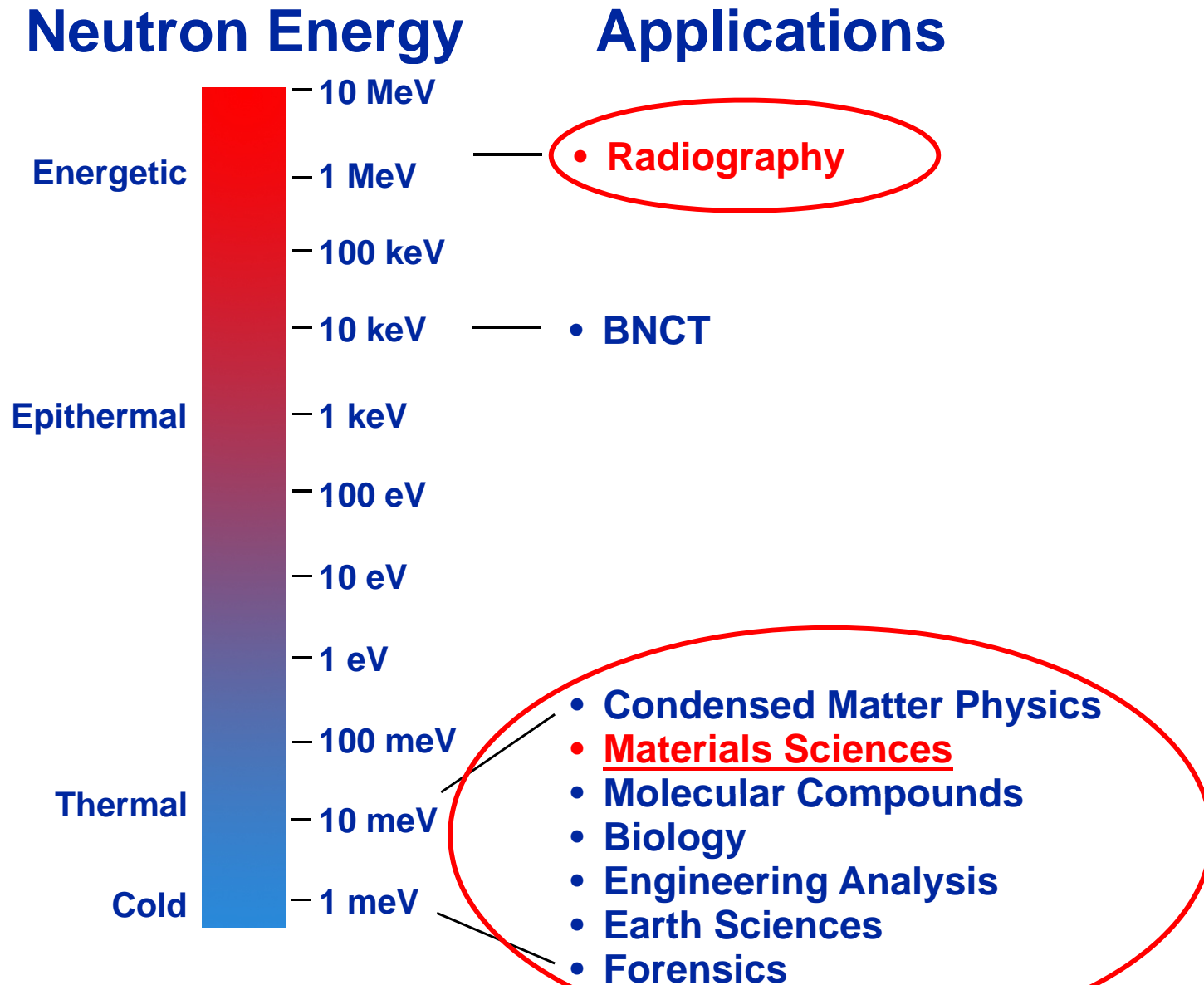
I vantaggi dell'analisi mediante attivazione neutronica rispetto ad altre tecniche sono:

- ✓ misura simultanea di diversi elementi
- ✓ selettività: permette la misura di parametri indipendenti dall'energia dei gamma emessi e dalla vita media del radionuclide
- ✓ vasta applicabilità (non è utilizzabile solo se la vita media del radionuclide è molto bassa (secondi) o molto lunga (anni))
- ✓ alta sensibilità (fino a 100 – 1000 volte superiore ad altre tecniche)

## Gli svantaggi:

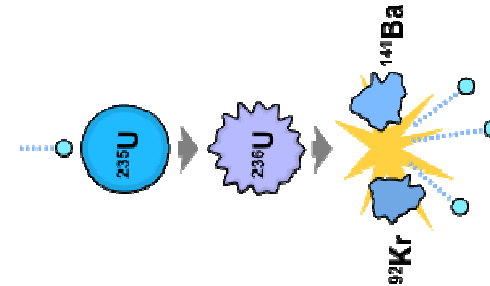
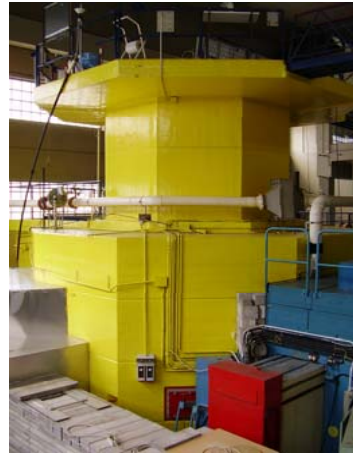
- ✓ necessità di una sorgente di neutroni (costi, rischio,...)
- ✓ nessuna possibilità di discriminazione chimica (stati di valenza, legami)
- ✓ non è applicabile su puri emettitori beta ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ), cioè nel caso in cui il decadimento radioattivo non produca l'emissione di raggi  $\gamma$

# Neutrons for Pure and Applied Science



# Le sorgenti di neutroni (1/2)

- Reattori nucleari



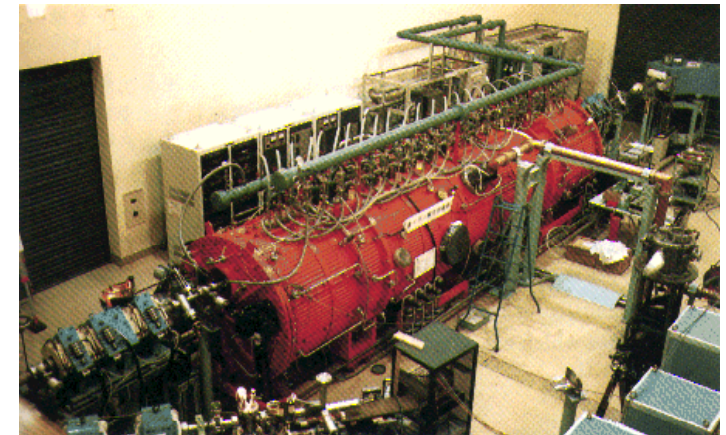
- Sorgenti compatte a fusione (D-D, D-T)



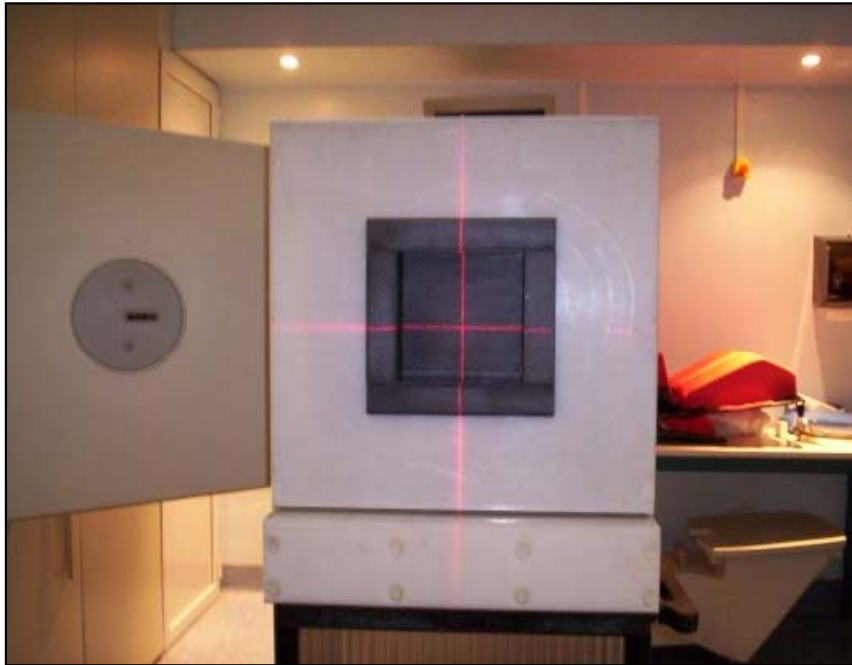
- Sorgenti naturali (Cf-252)



- Sorgenti ( $\alpha$ ,n), (p,n)

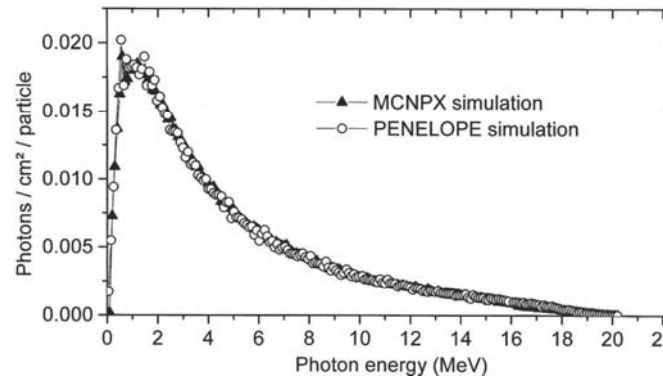
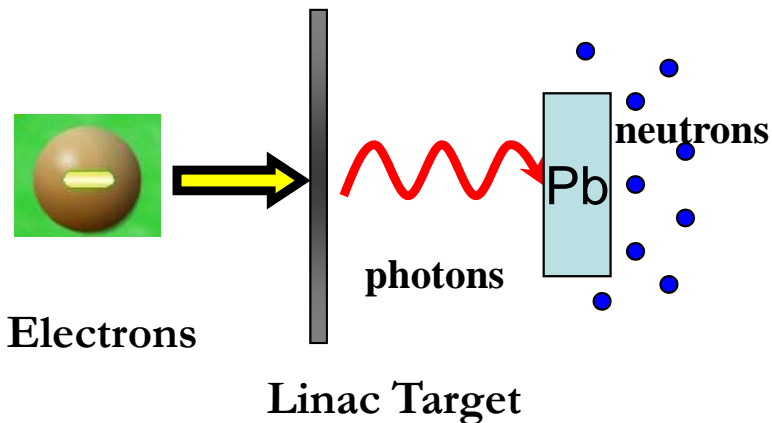


# Le sorgenti di neutroni (2/2)

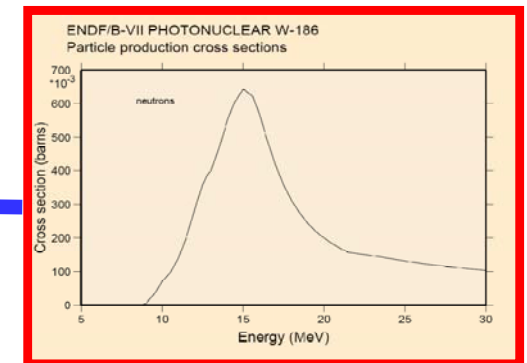


Sorgenti ( $\gamma, n$ )  
Il fotoconvertitore PhoNeS  
(PhotoNeutronSource)  
(brevetto n°MI2004A001301)

INFN Torino e Trieste



X-ray emission  
by Bremsstrahlung

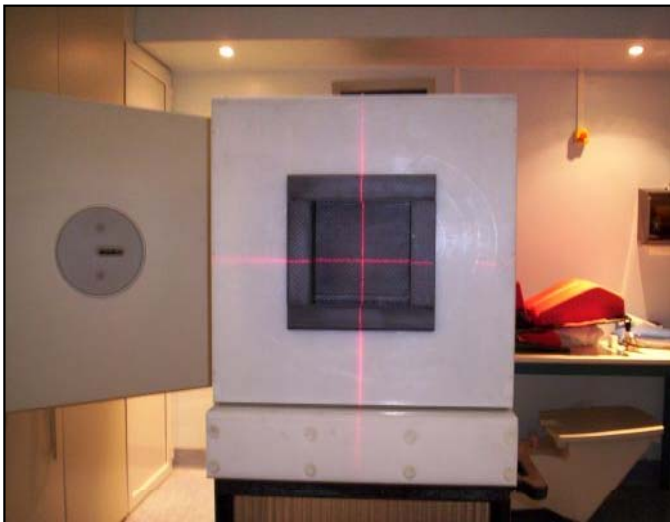
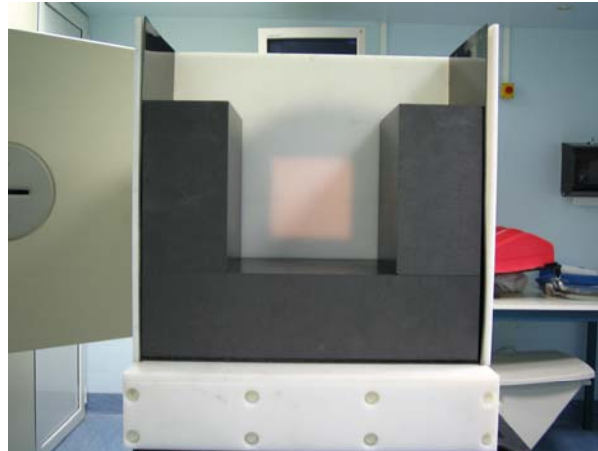
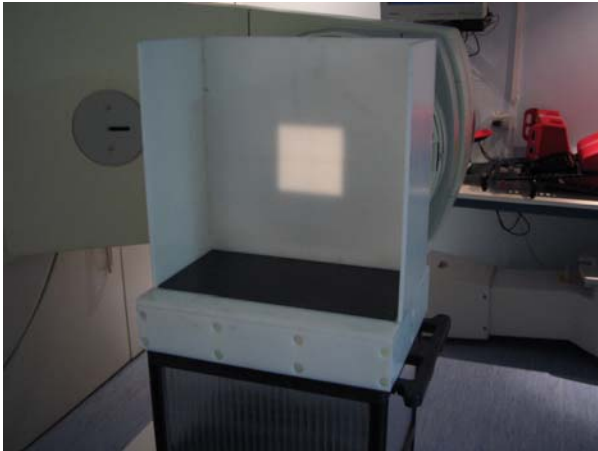


GDR  
Giant Dipole Resonance  
on High Z material

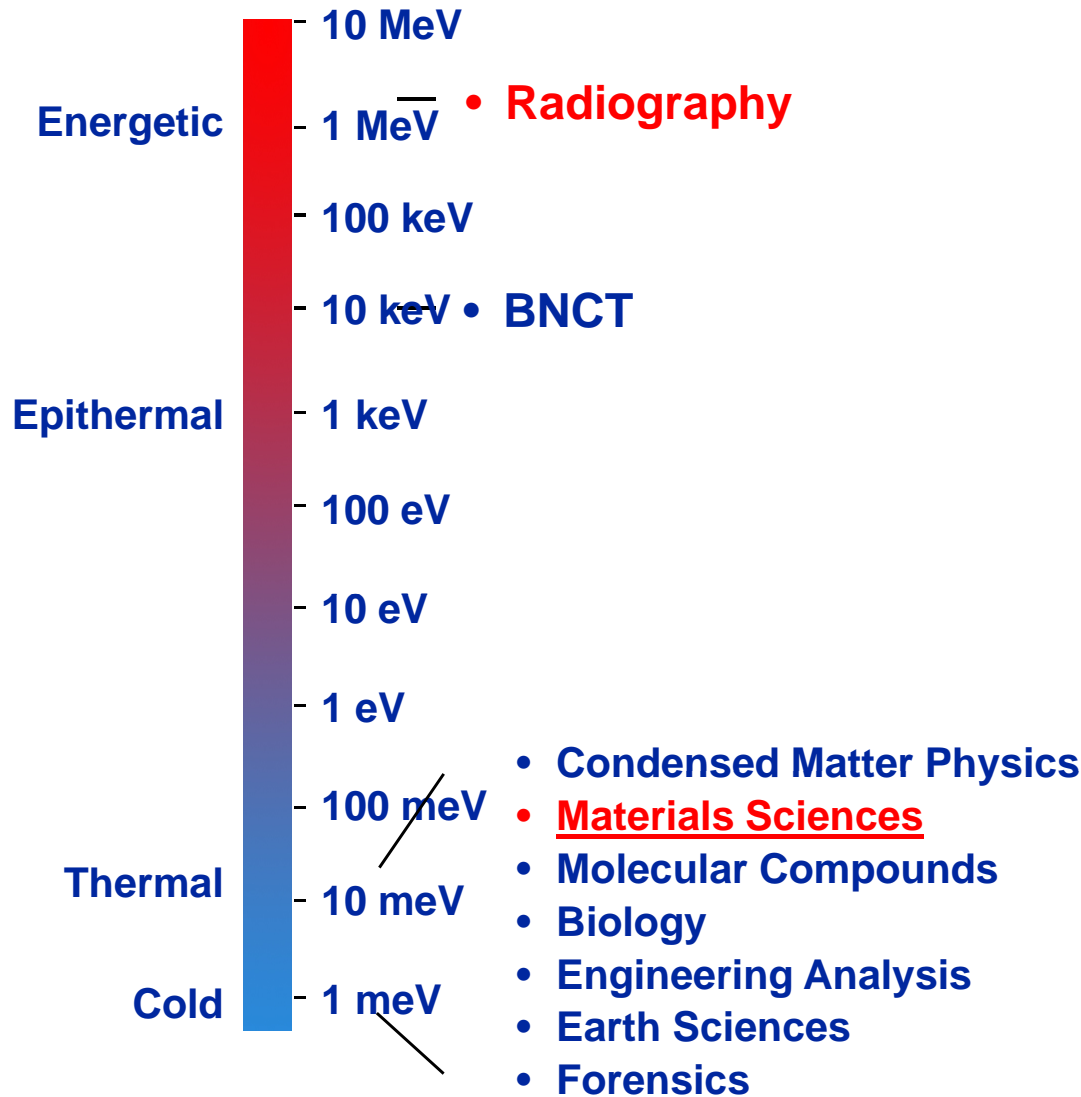


# Le sorgenti di neutroni (2/2)

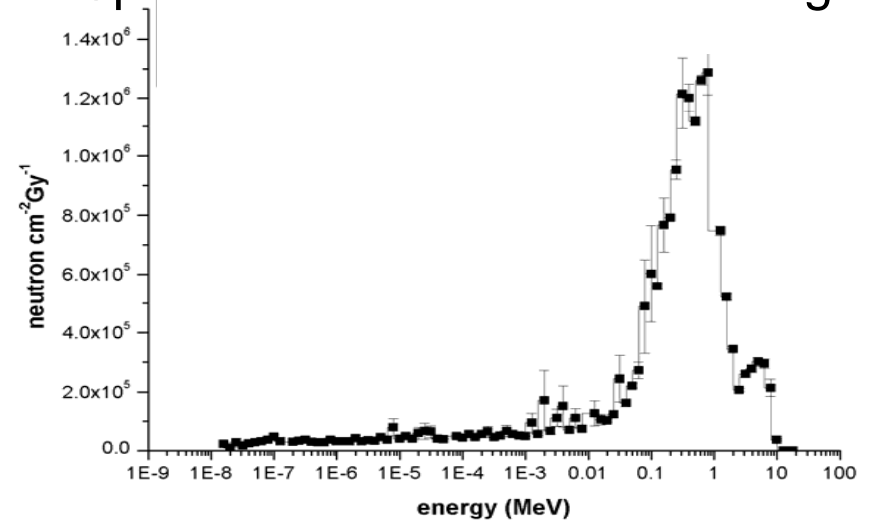
- Il fotoconvertitore PhoNeS (**PhotoNeutronSource**)



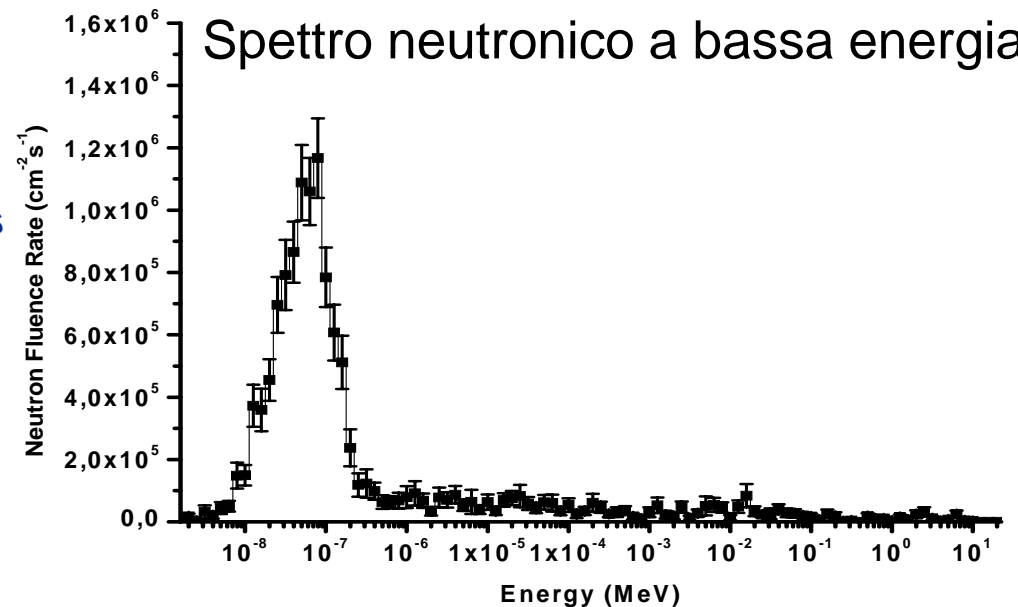
# Il fotoconvertitore PhoNeS



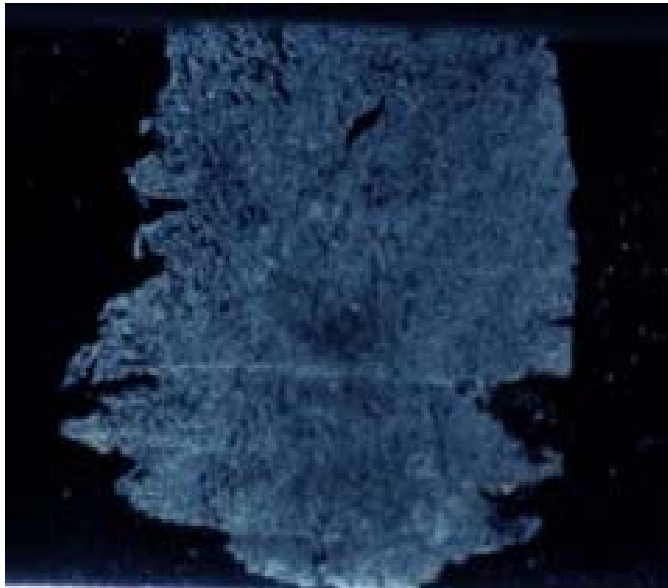
Spettro neutronico ad alta energia



Spettro neutronico a bassa energia



# Il fotoconvertitore PhoNeS: applicazioni



Campione da analizzare  
(tessuto polmonare umano)

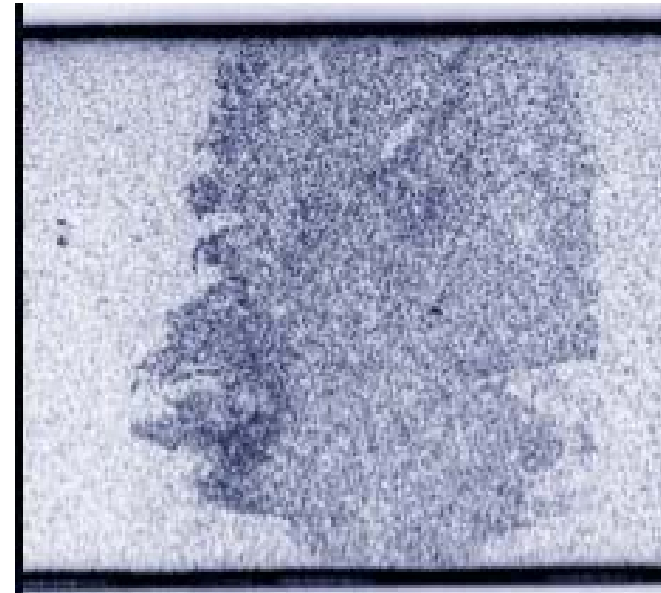
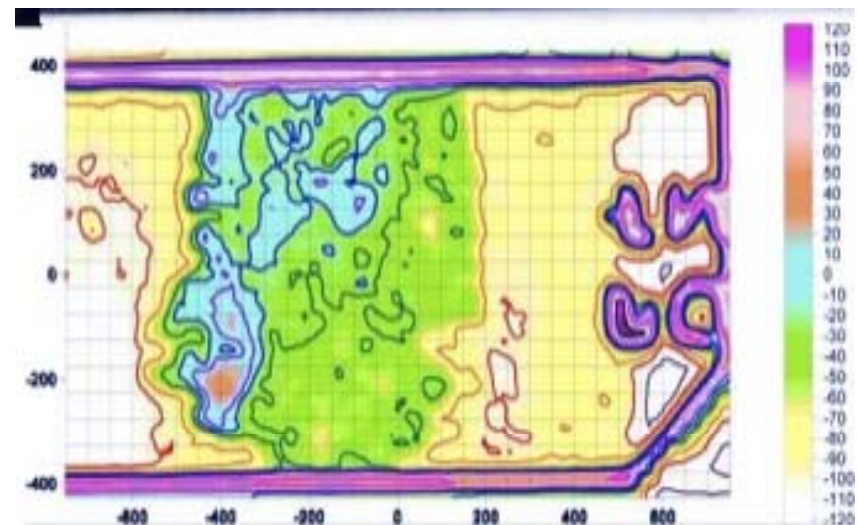


Immagine del campione su rivelatore plastico  
dopo irraggiamento neutronico

Distribuzione del radiofarmaco  
all'interno del campione



# LE RADIAZIONI IONIZZANTI

## DIRETTAMENTE ionizzanti

Le perdite di energia avvengono principalmente per eccitazioni e ionizzazione degli atomi e delle molecole del mezzo attraversato dovute alla radiazione primaria.

## INDIRETTAMENTE

### ionizzanti

*Raggi X*  
*e gamma*

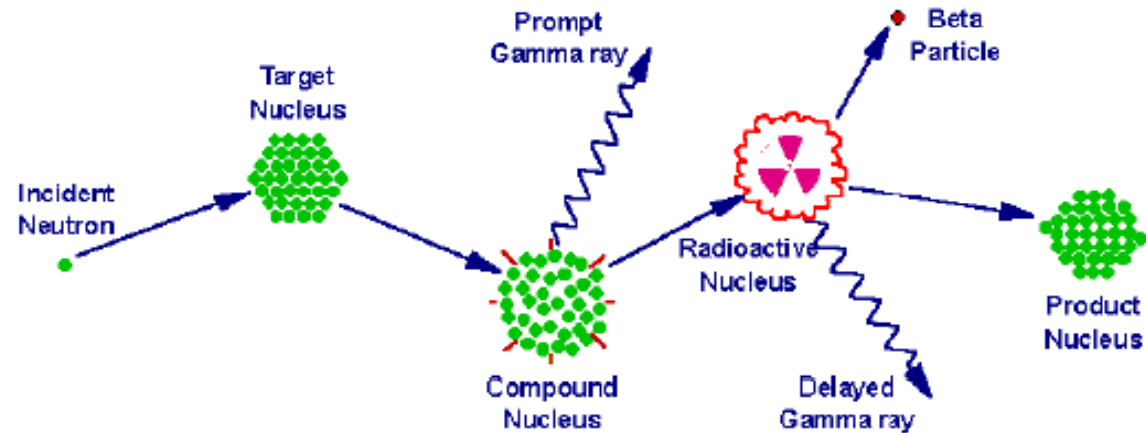
*neutroni*

Gli effetti sono prodotti dai secondari carichi da essi originati

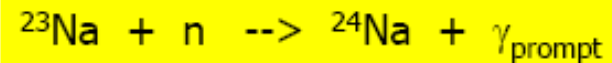
( $e^-$ ,  $e^+$  per X e gamma,  $p$  e  $\alpha$  per neutroni)

## Metodo NAA: cattura neutronica

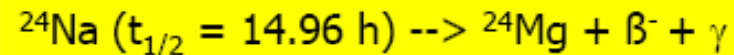
La cattura neutronica è la reazione più importante nei metodi di attivazione: un neutrone viene catturato da nucleo analita a dare un isotopo con stesso numero atomico, ma numero di massa aumentato di un'unità.



Il nuovo nuclide è in uno stato altamente eccitato pertanto rapidamente libera energia mediante emissione di una prima radiazione- $\gamma$  caratteristica (Prompt) e formazione spesso di un nucleo radioattivo.



Il nucleo radioattivo così formato decade con emissione di una o più radiazioni  $\gamma$ . La velocità di emissione è più lenta e dipende dal tempo di dimezzamento caratteristico dell'elemento.



In relazione al tempo di misura, quindi l'NAA può essere di 2 tipi:

- (1) *prompt gamma-ray neutron activation analysis (PGNAA)*; in tal caso le misure vengono fatte durante l'irraggiamento
- (2) *delayed gamma-ray neutron activation analysis (DGNAA)*, in tal caso le misure seguono il tempo di decadimento radioattivo del nucleo. Questa seconda via è quella più comune e circa il 70% degli elementi possono essere determinati con questa tecnica.