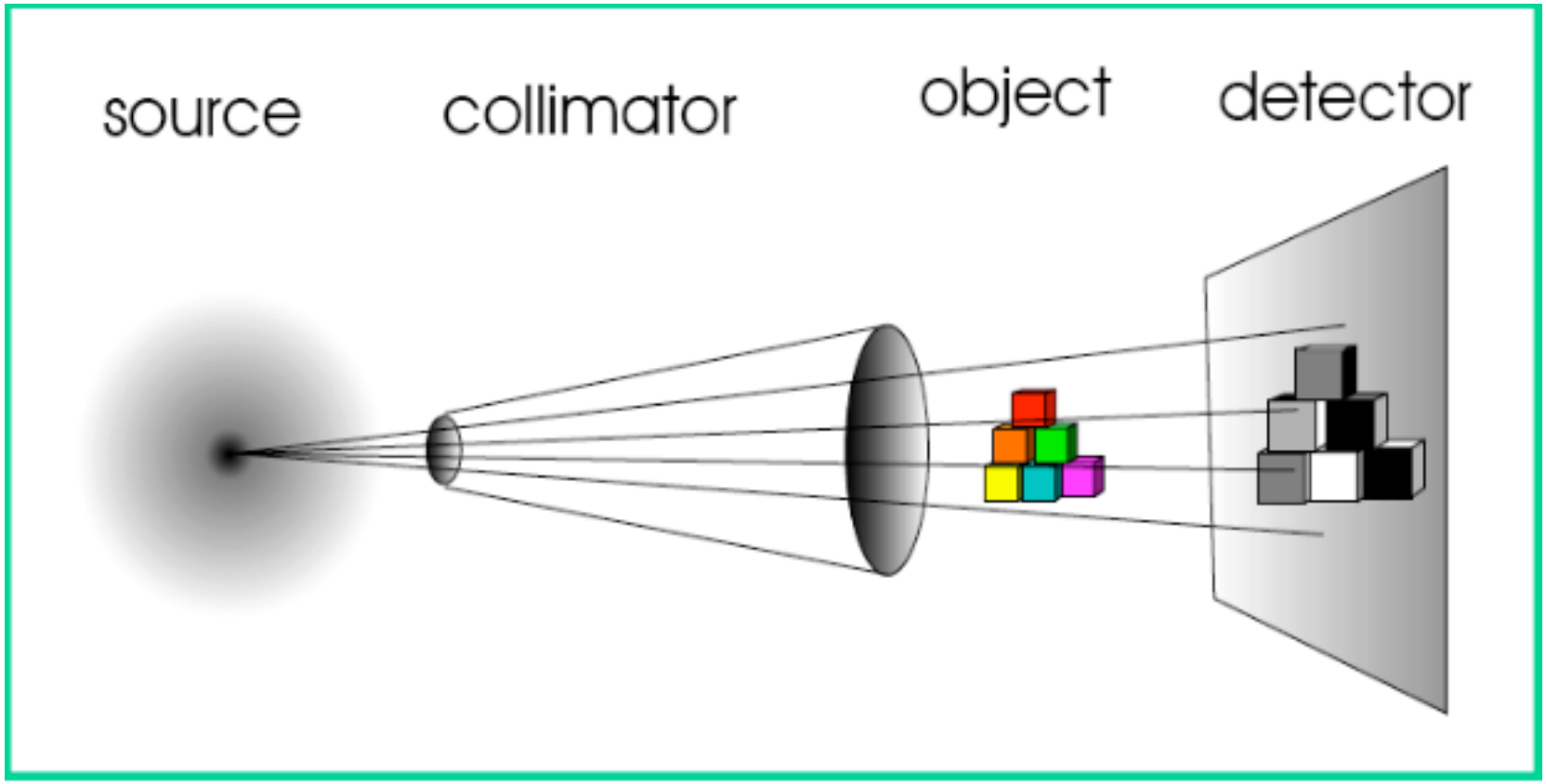
Neutron Imaging

Tecniche nucleari per analizzare strutture superficiali o interne di materiali hanno un impiego esteso. Tra le moderne tecniche una delle piu' diffuse e' quella basata sulla radiografia/radioscopia neutronica.

Il principio

Schema semplificato per la radiografia neutronica



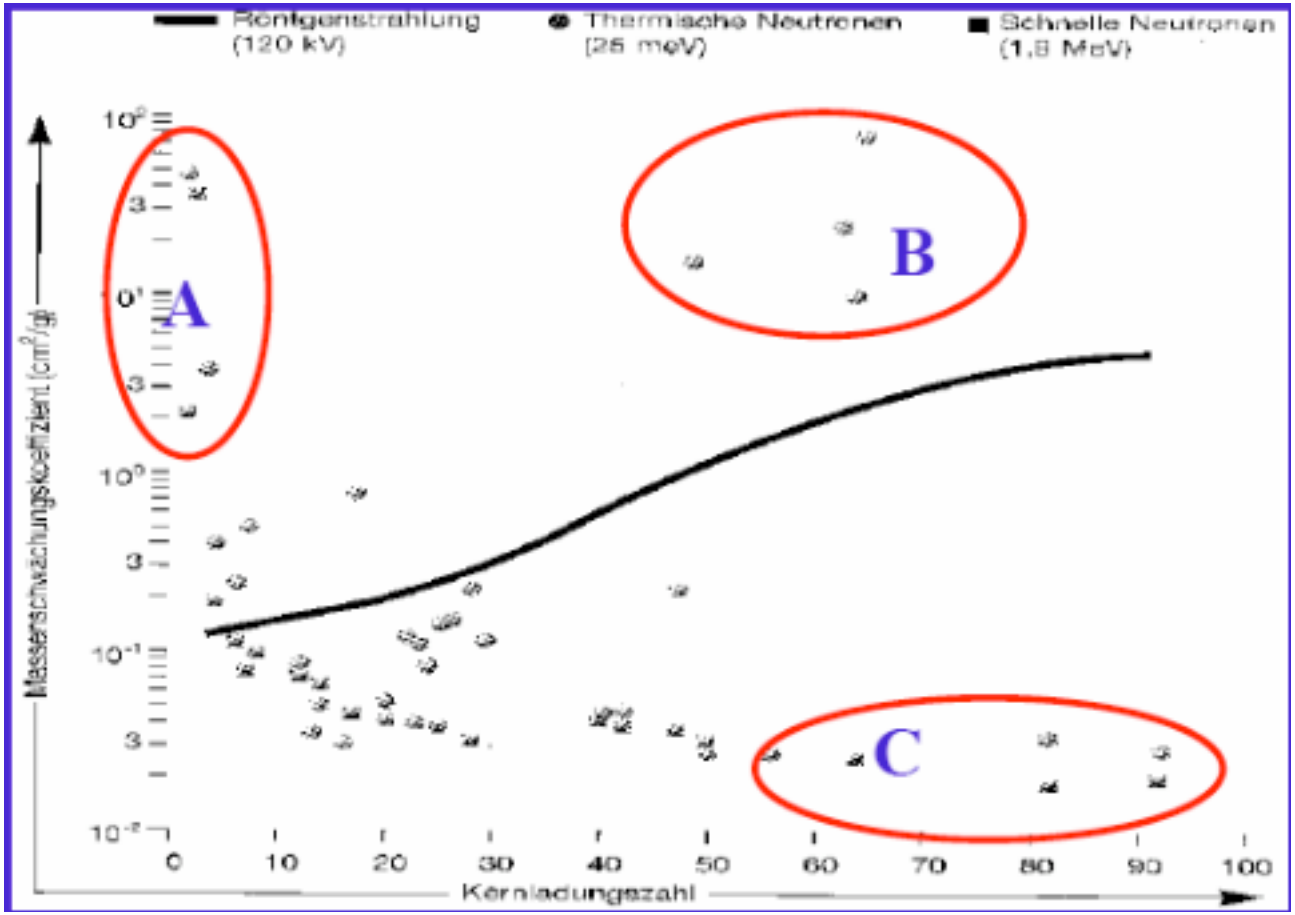
perche i neutroni?

I neutroni sono capaci di rilevare strati sottili di campioni di materiali. Contrasto considerevole e' ottenuto da meteriali idrogenati.
La radiografia neutronica fonisce informazioni complementari ai metodi convenzionali con i raggi X

Tipiche applicazioni sono nei campi:
- archeologia
- adesivi
-costruzioni
-industria motoristica
-tecnologia nucleare
- botanica
- Fisica terrestre

Radiografia neutronica: le immagini risultanti dall'attenuazione del fascio di neutroni sono registrate su film fotografici.
Radioscopia neutronica: consiste nmella visualizzazione continua dell'attenuazione del fascio di neutroni usando rivelatori "real time", tipo scintillatori e video camera.

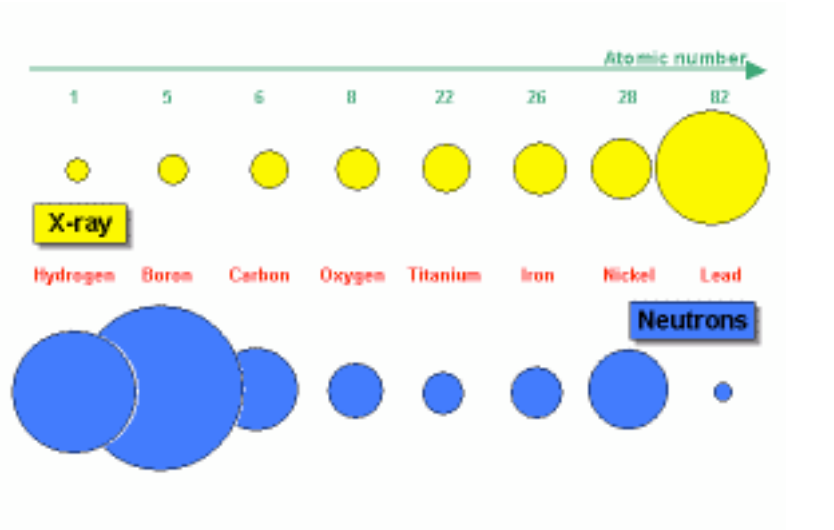
Confronto tra le probabilita' di interazione tra neutroni termici e raggi X



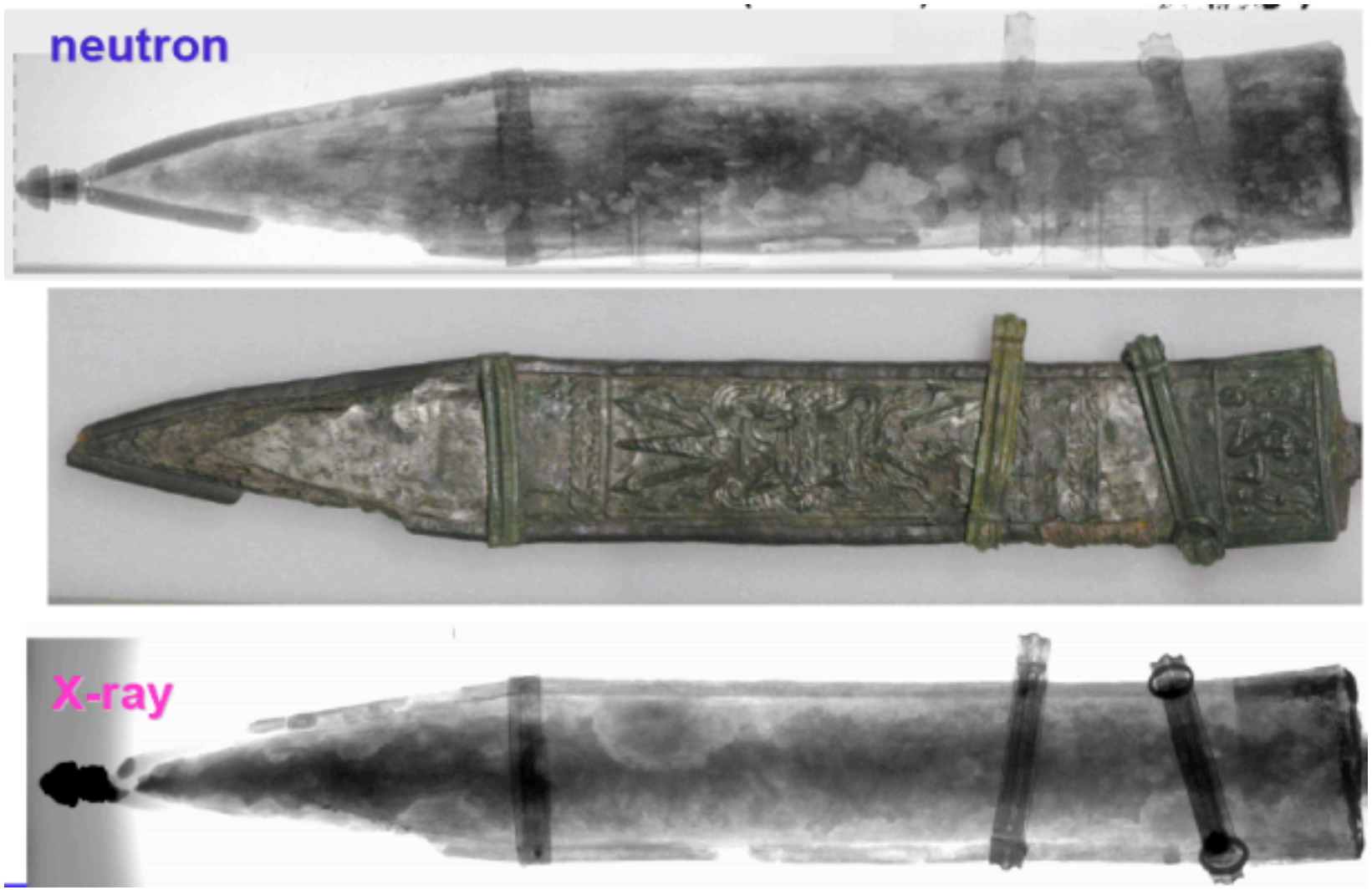
The deviations in the cross-sections are especially high for:
A: light materials like hydrogen
B: especially strong neutron absorbers Gd, Cd, Dy, In
C: heavy materials like Pb, Bi, U , Th

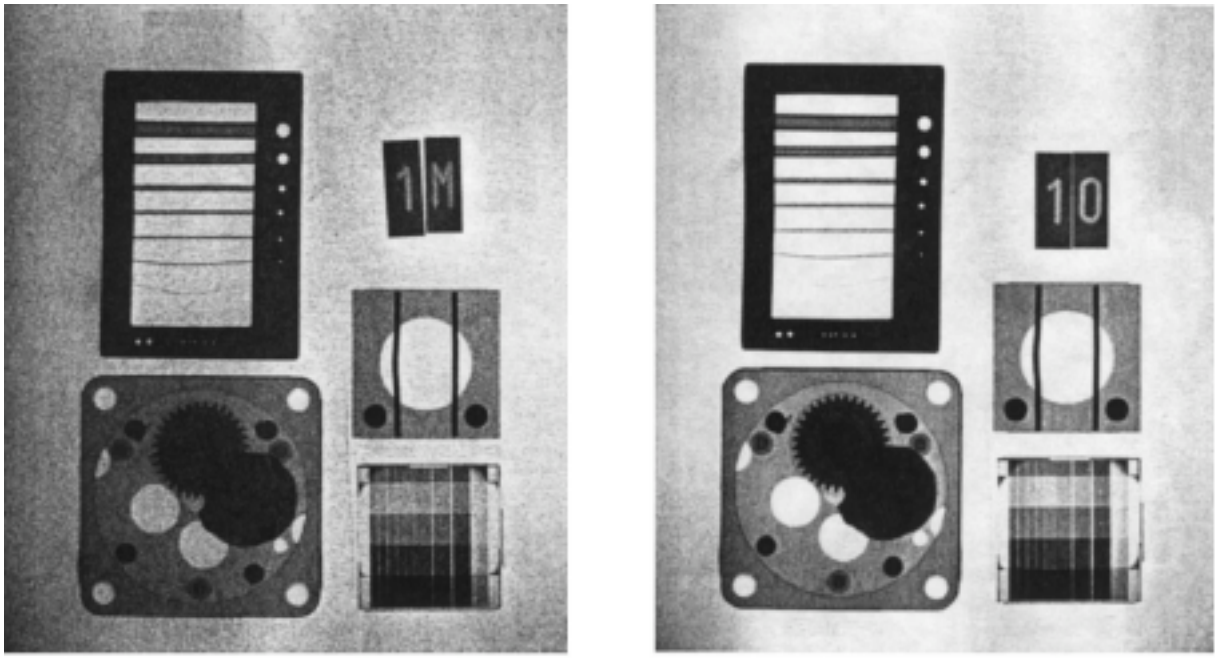
Interazione dei neutroni con la materia

I neutroni interagendo con il nucleo degli atomi, al contrario dei raggi X che interagiscono con gli elettroni delle shell atomiche, hanno una xsect relativamente grande per piccoli valori di A mentre hanno una relativamente piu' bassa xsect per i metalli permettendo cosi' una penetrazione piu' profonda.



Confronto tra radiografia X e neutronica





(1) (2)

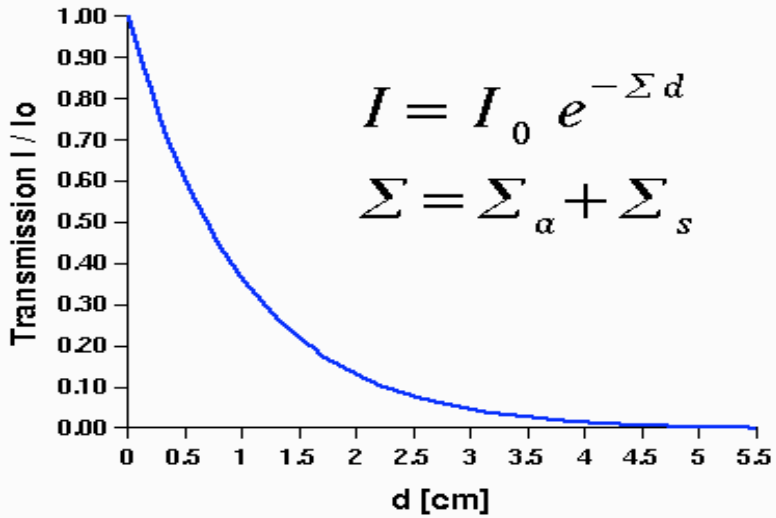
Fig. 2. The images taken with the neutron fluence of (1) 2.0×10^7 and (2) 2.0×10^6 n cm^{-2}.

Trasmissione dei neutroni

La trasmissione di un fascio di neutroni monoenergetici collimato e' descritta dalle legge di attenuazione della radiazione nella materia.

trasmissione $T=I/I_0$

Exponential Attenuation Law



$$I = I_0 \, e^{-\Sigma d}$$

$$\Sigma = \Sigma_a + \Sigma_s$$

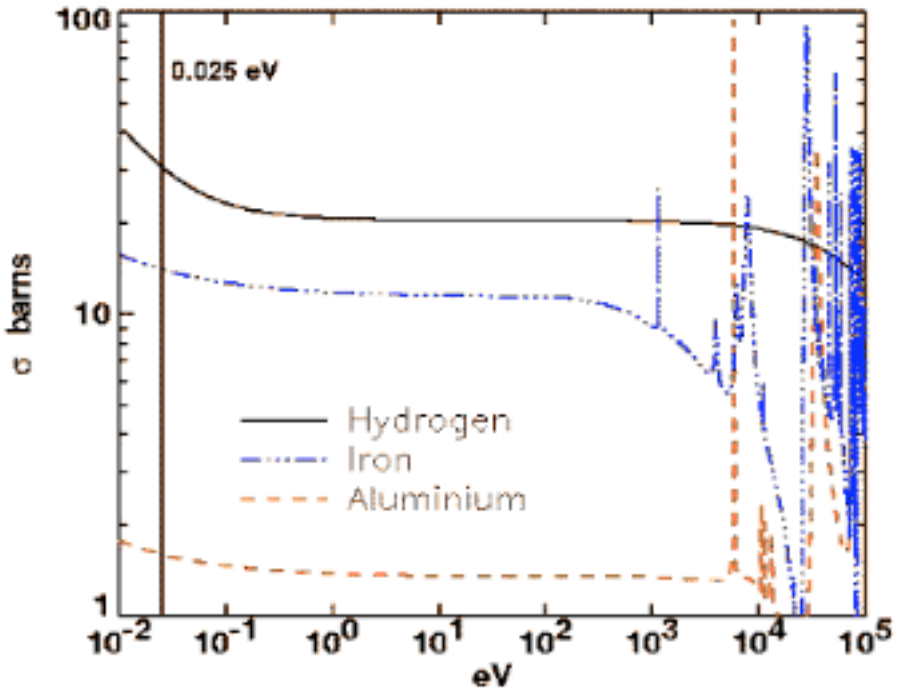
Macroscopic Cross Section Σ

$$\Sigma = N \sigma \qquad [cm^{-1}]$$

$$N = \frac{\rho}{A} N_A \qquad [cm^{-3}]$$

N := number density $[cm^{-3}]$
ρ := material density $[g\, cm^{-3}]$
A := atomic weight $[g\, mol^{-1}]$
N_A := Avogadro number $6.022\, 10^{23} [mol^{-1}]$

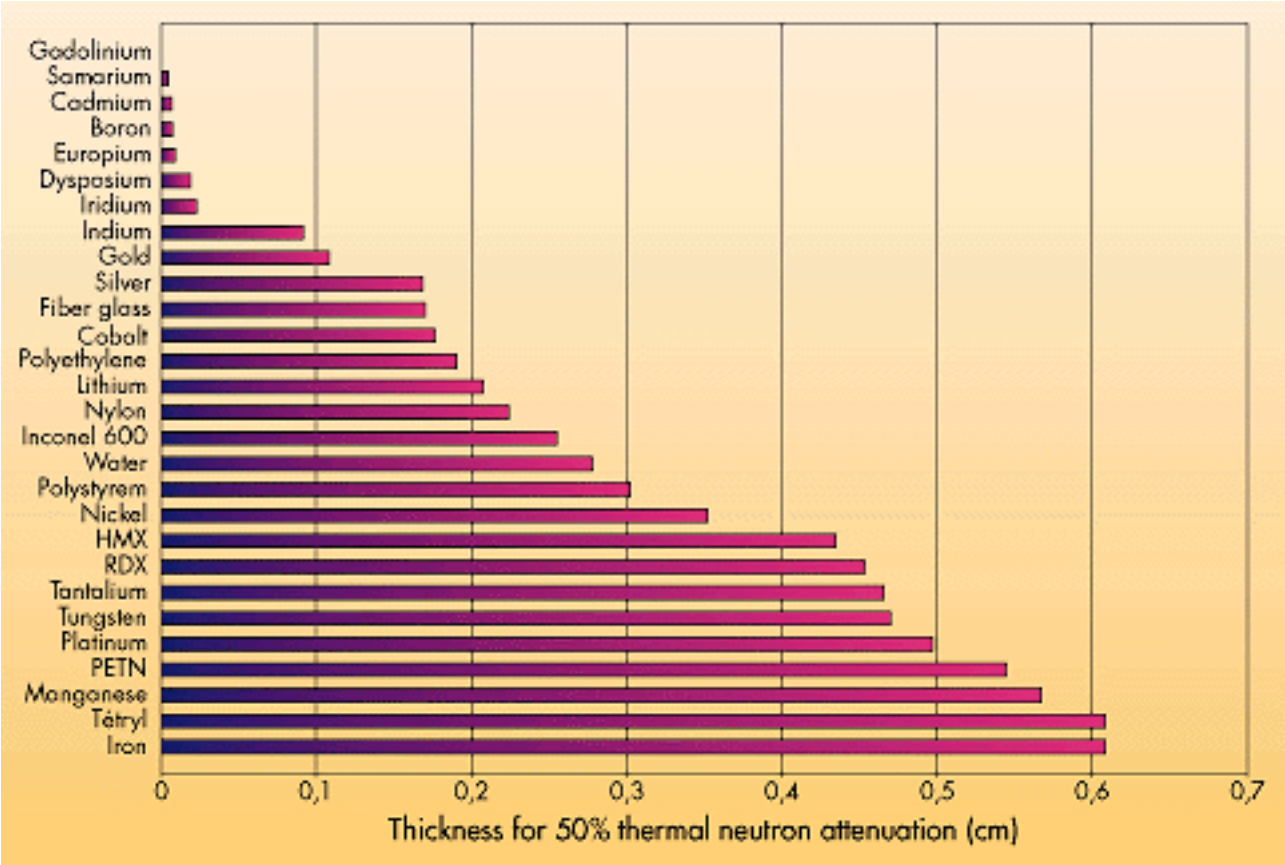
Neutron Cross Sections



La semplice legge esponenziale di attenuazione non sempre e' applicabile, sopratutto nei casi campioni spessi o grandi xsect di scattering (es. idrogeno) o materiali con grandi xsect di assorbimento (es. materiali con boron, gadolinio,..).
Infatti bisognera' tener conto, ad es.di effetti di scattering multiplo.

Thermal Neutron Cross Sections at 0.025eV

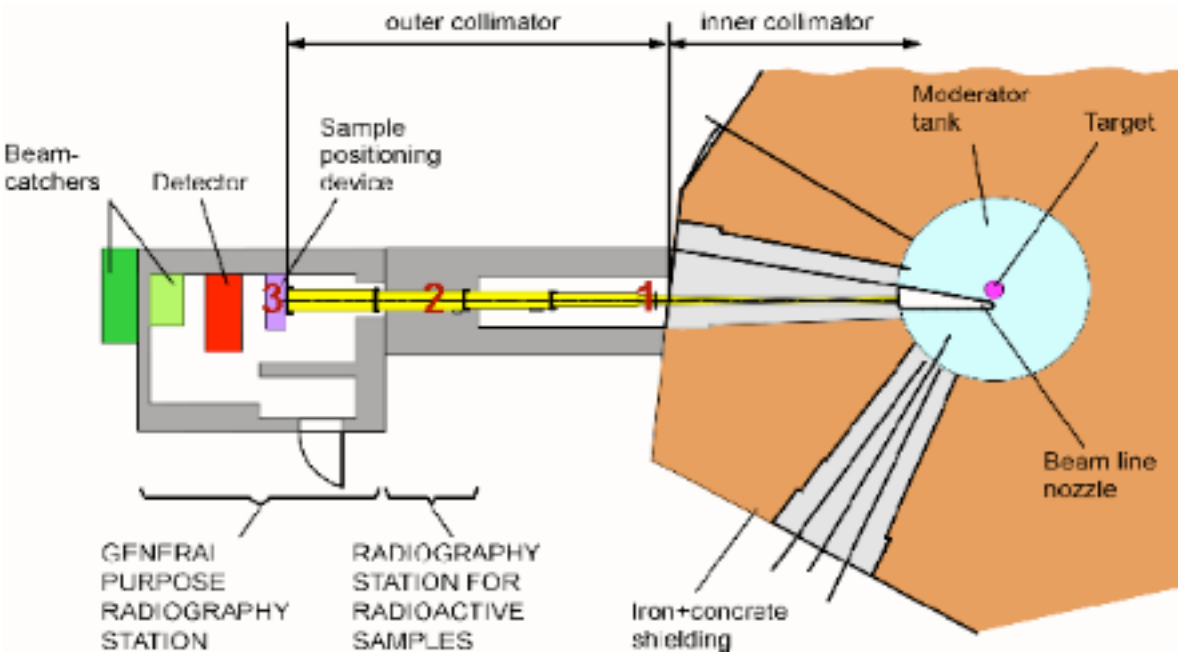
Material	ρ	σ	Σ
Water	1	103	3.45
Iron	7.9	14	1.18
Aluminium	2.7	1.7	0.1


Godolinium
Samarium
Cadmium
Boron
Europium
Dysposium
Iridium
Indium
Gold
Silver
Fiber glass
Cobalt
Polyethylene
Lithium
Nylon
Inconel 600
Water
Polystyrem
Nickel
HMX
RDX
Tantalium
Tungsten
Platinum
PETN
Manganese
Tétryl
Iron
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
Thickness for 50% thermal neutron attenuation (cm)

Radiografia neutronica

La radiografia neutronica sfrutta la differenza di trasmissione negli oggetti, che e' causata da differenze o mancanza di materiale (es. pori, cracks,...).
La differenza di trasmissione di questi difetti dipende dalla loro dimensione e dalla composizione isotopica.

Inoltre la differenza e' determinata dalle caratteristiche della **sorgente** di neutroni insieme con la **sensitivita'** del rivelatore.

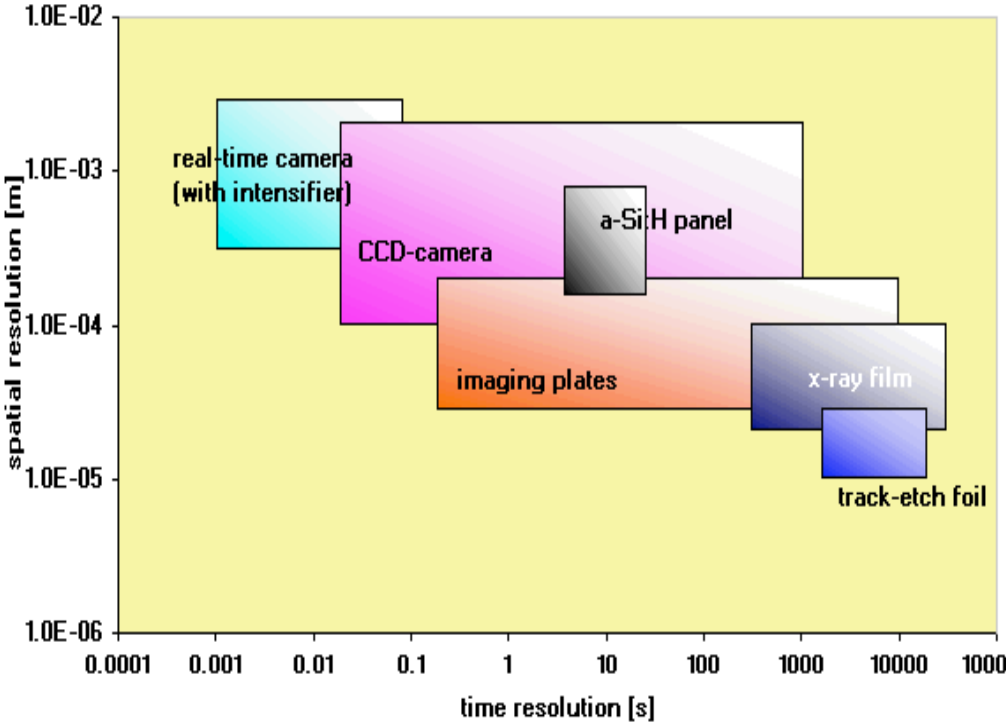


Linea di trasmissione per neutroni da spallazione per neutron radiography (NEUTRA al PSI).

Rivelatori per neutron radiography

I rivelatori in uso per la radiografia neutronica debbono registrare il campo dei neutroni in 2D perpendicolarmente al fascio.

L'area del rivelatore deve essere ≥ alla xsect del fascio ed e' importamte la risoluzione spaziale e temporale.



The most important detection reactions are (for thermal and cold neutrons):

$^{3}He + 1n \rightarrow {}^{3}H + 1p + 0.77$ MeV

$^{6}Li + 1n \rightarrow {}^{3}H + {}^{4}He + 4.79$ MeV

$1^{0}B + 1n \rightarrow$(07%) $^{7}Li + {}^{4}He + 2.78$ MeV

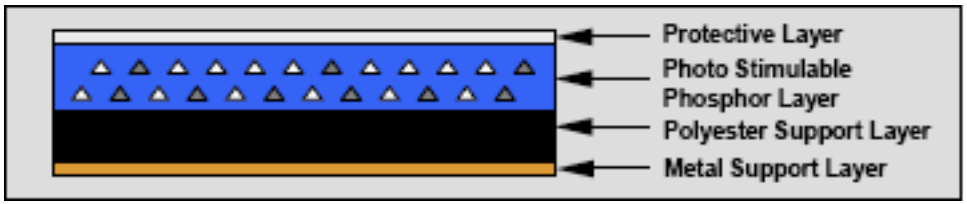
$^{10}B + 1n \rightarrow$ (93%) $^{7}Li^{*} + {}^{4}He + 2.30$ MeV $\rightarrow {}^{7}Li + {}^{4}He + g$ (0.48 MeV)

$^{155}Gd + 1n \rightarrow {}^{156}Gd + g$ + conversion electrons (7.9 MeV)

$^{157}Gd + 1n$ ®$\rightarrow {}^{158}Gd + g$ + conversion electrons (8.5 MeV)

Neutron Imaging Plate

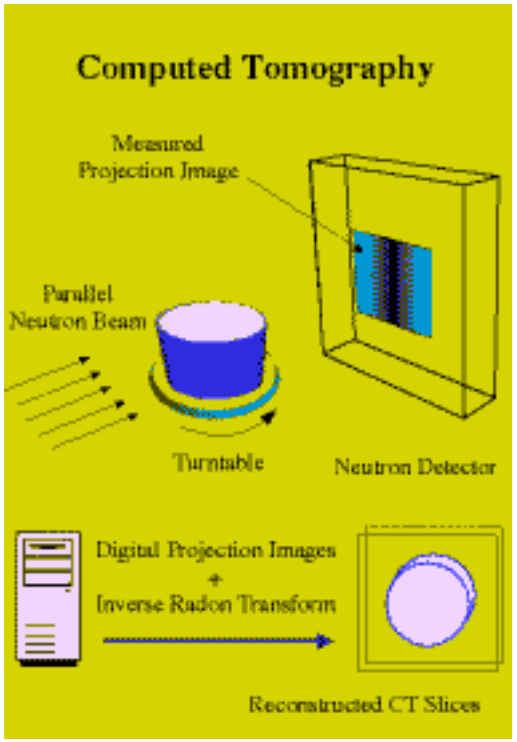
The NIP consists of a neutron converter material (Gd or ^{6}Li) which captures neutrons and emits secondary charged particles, and a photostimulated luminescence (PSL) material ($BaFBr:Eu^{2+}$) which creates a color center in the NIP and subsequently emits PSL light by the irradiation of a He–Ne laser. We can easily estimate from the following simple consideration that there must be an optimum set of conditions (mole fraction of PSL materials and thickness) of the NIP in which both the highest neutron detection and PSL light emission are realized. There are two critical parameters. The first is the mole fraction of the neutron converter (Gd or ^{6}Li) to the PSL material ($BaFBr:Eu^{2+}$). A high fraction (i.e., more neutron converter) would cause neutron capture to be more efficient, but at the expense of the PSL light emission which would correspondingly become less intense. Similarly, the second important parameter, the thickness of the NIP, behaves in an analogous way: the thicker it is, the more efficient the neutron capture efficiency becomes, but the PSL light emission would be less intense because light from a deeply embedded PSL particle could be self-absorbed.

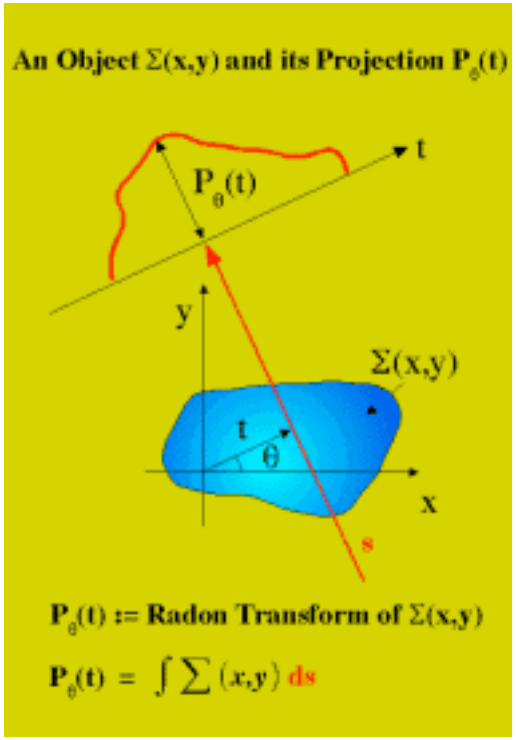


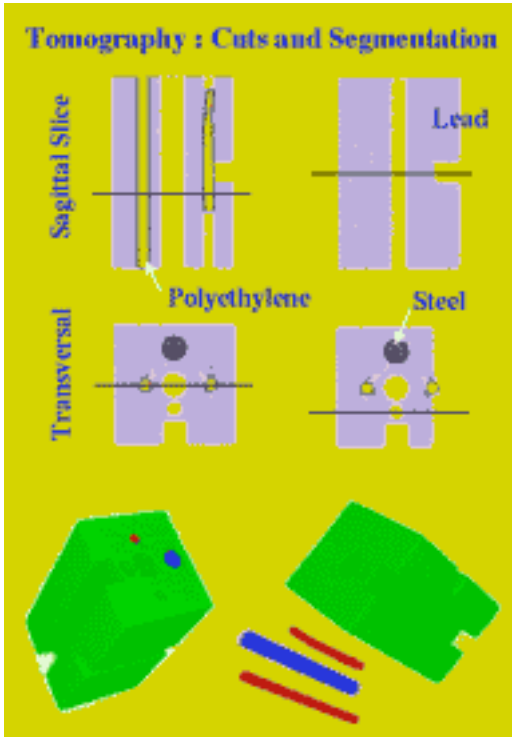
Neutron Tomography

La Tomografia e' un metodo che fornisce immagini di sezioni di un oggetto ricavate da dati della attenuazione misurata irradiando l'oggetto da diverse direzioni.

Tomographic Imaging in senso matematico tratta la ricostruzione di un'immagine dalle sue proiezioni. La proiezione ad un dato angolo rappresenta l'integrale dell'immagine nella direzione specificata dall'angolo.







L'analisi non distruttiva di un oggetto mediante radiografia neutronica e' fatta principalnmente prendendo una o piu' proiezioni 2D parallele. In alcuni casi le proprieta' di attenuazione dell'oggetto sono registrate da diversi angoli, ad esempio, ruotando l'oggetto per piccoli step di 180º e calcolando le slice (fette) usando la trasformata inversa di Radon.
Con fasci ben collimati si possono cosi' ottenere dati 3D di attenuazione volumica da una serie di proiezioni parallele 2D di un oggetto.

CCD-Camera

Tomography setup

Rotating table

The 150-300 times repeated turning of the object and acquiring a neutron transmission image is implemented in an automatic procedure connecting a camera with the rotating table and a neutron beam monitor. We use a nitrogen cooled CCD camera system , which can be run in looping mode and allows for an external trigger signal. Depending on the object size (maximum weight/dimension 20kg/25cm), and the camera lens in use, it provides 512x512 pixel 16bit images with a resolution of 0.2 - 0.5 mm. Exposure times in the range from 5 - 60 seconds are imposed by the neutron flux level and the objects neutron transmission given by its thickness and isotopic composition. Objects consisting mainly of strongly neutron absorbing isotopes and with a large length/thickness ratio are not suitable for neutron tomography.

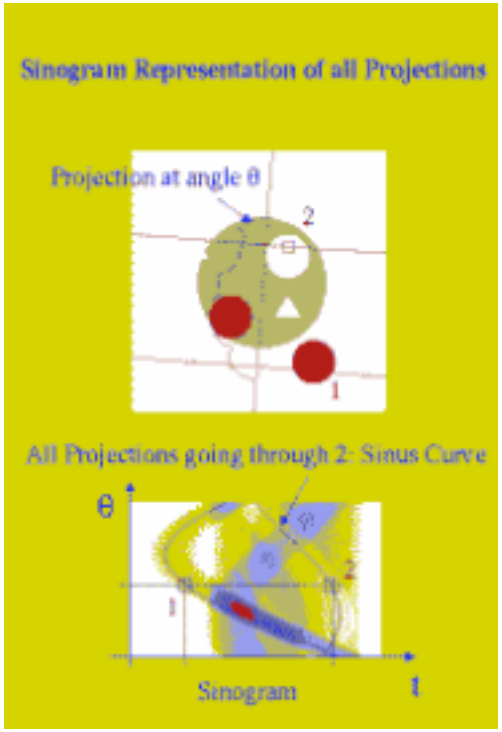
Ricostruzione della Computer Tomography

I dati raccolti dal rivelatore, per ogni angolo di ciascuna slice, debbono essere preelaborati prima di essere utilizzati per la ricostruzione 2D e/o 3D.

L'immagine deve essere normalizzata ad un valore uguale di esposizione e corretta per variazioni spaziali del fascio di neutroni e shermo dello scintillatore (flatfield correction).
La correzione si effettua dividendo una immagine della proiezione del campione (object image) con una immagine senza campione (flatfield image) per tutti gli angoli

flatfield correction = object image/flatfield image

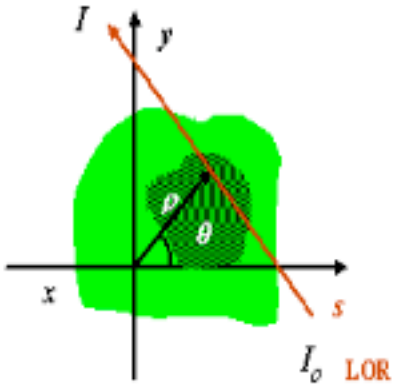
I dati "corretti" sono poi immesi nel data set del sinogramma
(dimensione = nx X ny pixel X n.angoli)



A questo punto le singole slice (fette perpendicolari all'asse di rotazione) sono ricostruite applicando un algoritmo di filtered- backpropagation alla trasformata inversa di Radon.

Le slice 2D ricostruite sono poi organizzate in un image stack rappresentante i dati 3D della distribuzione spaziale delle proprieta' di attenuazione dell'oggetto.
Questo sara' poi visualizzato con un 3D rendering software.
In questo modo parti dell'oggetto con caratteristiche di attenuazione differenti possono essere separate o slice a particolari angoli rese visibili all'interno dell'oggetto.

Neutron Tomography: Inverse Radon Transform



Attenuation along "Line Of Response"

$$I(\rho,\theta) = I_o e^{-\int_{-\infty}^{+\infty}\Sigma(x,y)ds}$$

Projection = Radon Transform of $\Sigma(x,y)$

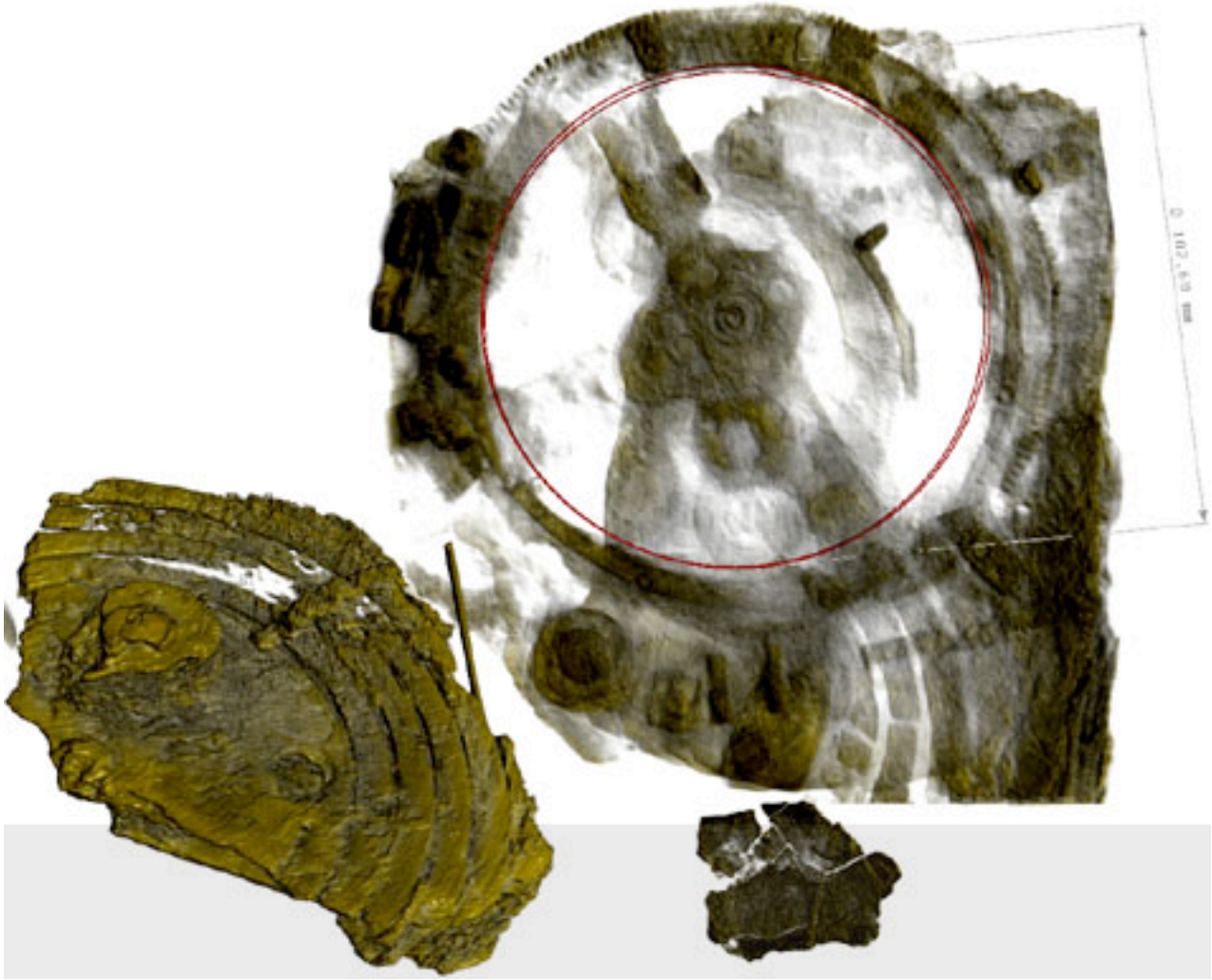
$$P(\rho,\theta) = \ln\left(\frac{I_o}{I(\rho,\theta)}\right) = \int_{-\infty}^{+\infty}\Sigma(x,y)ds = \int_{-\infty}^{+\infty}\Sigma(\rho\cos\theta - s\sin\theta, \rho\sin\theta + s\cos\theta)\,ds$$

Inverse Radon Transform ==> $\Sigma(x,y)$

$$\Sigma(x,y) = \mathrm{B}(x,y) = \int_0^{\pi} P(x\cos\theta + y\sin\theta, \theta)\,d\theta$$

VGStudio MAX supported the scientists unveiling the

Antikythera Mechanism



Fisica nucleare applicata alla geologia e archeologia

L'origine e struttura della Terra, le origini dell'umanita' e i vari stadi dell'evoluzione della societa' unmana hanno e continuano aad avere grande interesse.
La fisica nucleare ha fornito agli scienziati tecniche nuove ed metodi unici per datare materiali sulla base del contenuto di radioisotopi, come per studiare le rocce.
I radioisoptopi costituiscono un orologio nucleare che permette di detrminare l'eta' dei materiali in un range di $10\text{-}10^9$ anni.

Lo sviluppo dei metodi nucleari in supporto all'archeologia ed alla geologia riguardano molte aree:

- Geocronologia

Minerali e rocce conteneti nuclidi radioattivi a vita media lunga sono adatti come clock o geocronometri e quindi permettono di datare gli eventi geologici, es. cristallizzazione di minerali o formazione delle rocce o scioglimento delle medesime
Una delle tecniche usa la datazione potassio-argon. Il potassio nnaturale consiste di tre isotopi ^{39}K, ^{40}K e ^{41}K. Il ^{40}K , (0.0118 %) e' instabile ($T_{1/2}$ ~1.29 10^6y) e decade ^{40}Ca e ^{40}Ar (11% dei casi). Cosi' in ogni minerale contenete potassio il rapporto di ^{40}Ar e ^{40}Ca al ^{40}K aumenta in funzione del tempo e puo' servire come misura del tempo.

- Datazione col radiocarbonio

Dal rapporto $^{14}C/^{12}C$ si puo' risalire alla datazione di manufatti ed resti del mondo vivente, partendo dal presupposto che il rapporto C/C in atmosfera sia rimasto costante per tutti gli ultimi 5 10^4anni.
Dagli anni 70 si utilizza la spettroscopia AMS per il conteggio dei singoli atomi.

- Datazione con termoluminescenza

Quando un solido inorganico non elettro-conduttivo e' soggetto alla radiazione ionizzante si producono elettroni e lacune. Alcuni di questi sono intrappolati come difetti nel lattice cristallino. Quando il solido e' riscaldato gli elettroni e lacune sfuggono dalle trappole e ricombinandosi in centri luminescenti emettono un fotone caratteristico del salto quantico.

La radiazione emessa dipende dal materiale e dalla radiazione ricevuta.

Questa tecnica si rivela molto utile nella datazione delle ceramiche, ad es.

$$\text{Eta'}\ (y) = L/(SR)$$

essendo L la termoluminescenza naturale, S la sensitivita' della ceramica alla radiazione ionizzante e R la dose di radiazione ricevuta.

Altre tecniche di datazione utilizzano gli isotopi di Piombo.

Per studiare la comosizione geochimica della superfice terrestre si utilizzano tecniche che fannon uso di:

- Scattering di neutroni o gamma
- raggi gamma per studi di assorbimento fotoelettrico e densita'
- scattering di neutroni per valutare il contenuto di idrogeno
- spettroscopia gamma indotta da neutroni per studiare le proprieta' geochimiche della formazione delle rocce
- Idrologia isotopica
- predizione di terremoti (accresciuta concentrazione di radon nelle acque)
- mappatira con radon delle sorgenti di energia geotermica
- uso di AMS mella idrologia
- .....

Neutrino geophysics

Uso dei neutrini da acceleratori ad A.E. per studiare la conformazione terrestre.

Qual'e' l'idea? I neutrini hanno xsect molto piccola ed il loro libero cammino medio e' molto grande.
Studiando l'attenuazione di fasci di neutrini da acceleratori indirizzati verso rivelatori massivi, posti sulla linea del fascio, si puo' ottenere una tomografia della Terra.
Se invece si e' interessati ad indagare sulla composizione degli strati superficiali della terra, si possono rivelare i prodotti secondari delle interazione da neutrino con gli elementi che li compongono.

La xsect di interazione ei neutrini con un nucleo cresce con l'energia $L_\nu = (N_A \rho \sigma_\nu)^{-1}$

$$\sigma_\nu(E) = 10^{-35} E_\nu(TeV) \ \ \mathrm{cm}^2$$

Questo significa che neutrini di bassa energia , 1-10MeV, passano attraverso la Terra praticamente senza interagire e quindi la variazione di flusso e' praticamente nulla e difficile da rivelare.

Il n. di nucleoni per cm^3 e' uguale a $N = \frac{\rho}{A} N_A \cdot A = \rho N_A$ con ρ la densita' ed A il numero atomico medio della Terra

Essendo la lunghezza di attenuazione $L_\nu = (N_A \rho \sigma_\nu)^{-1}$

L'attenuazione del flusso dovuto all'assorbimento su una lunghezza L risulta $L_\nu = (N_A \rho \sigma_\nu)^{-1}$

$$F(L) = F(0) e^{-L/L_\nu} \quad = \quad F(0) e^{-\rho N_A L \sigma_\nu}$$

Essendo L= diametro della Terra = 1.2 10^4 Km una attenuazione sensibile si ha solo per neutrini di energia di 1 TeV ed oltre.

I neutrini come si ottemgono? attraverso i decadimenti di particelle instabili quali i mesoni π e K attraverso le reazioni

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad , \quad \mathrm{K}^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

Bombardando una targhetta pesante, es. W, con protoni ad alta energia siottengono pioni e K, questi in una proporzione circa 10 volte minore rispetto ai pioni.

I pioni di energia 1 TeV (vita media a riposo 10.4 10^{-8}s) decadono solo il 2% delle volte lungo 1Km, causa la contrazione del tempo di Lorentz, I K, piu' leggeri hanno vita media piu' breve ma la produzione e' minore.

I rivelatori debbono essere massivi ed adatti a rivelare muoni, perche' i neutrini interagendo con i nucleoni portano alla creazione di muoni e adroni che poi sviluppano una cascata adronica.

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + h$$

Molti progetti sono in cantiere, in considerazione dei molti esperimenti di neutrini in giro per il mondo.
Cosa si aspetta di misurare?
- informazioni sulla densita/ della Terra.
- con i muoni informazioni sulla composizione della Terra, risorse minerarie
- informazioni sulla composizione della Luna (necesita di rivelatore sul suolo lunare)