

Utilizzo dei neutroni per analisi non distruttive

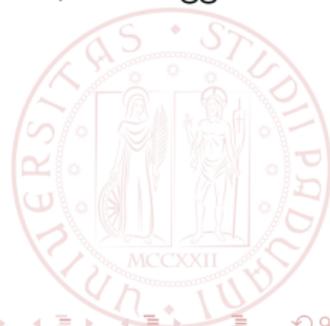


Luca Stevanato

<luca.stevanato@pd.infn.it>

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Fisica: "Galileo Galilei"
INFN - Sezione di Padova

Incontri di Fisica Applicata (IFA 2010)
Isola d'Elba, 25 Maggio 2010



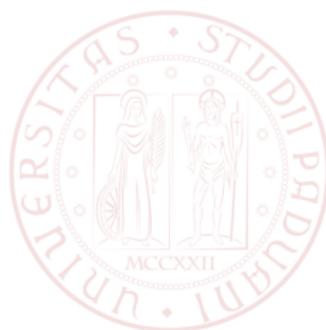
1 Introduzione

- Tecnologie esistenti
- Misure di trasmissione con i neutroni
- Scanner n/γ del CSIRO

2 Il progetto CARIPARO

- Apparato sperimentale
- Elettronica e DAQ
- Calibrazioni in R
- Ricostruzione Immagine
- FNRR
- Rivelatori γ
- Rivelatore a 90°

3 Conclusioni



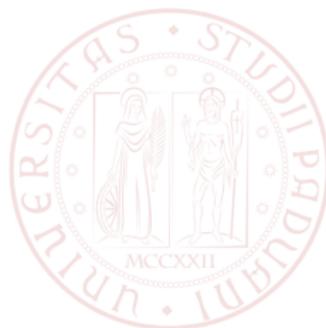
Analisi non distruttiva con neutroni veloci

I metodi principali si suddividono:

- Misure di trasmissione
- Neutroni che inducono radiazione secondaria (neutroni o raggi γ)

Le tecniche attualmente sviluppate sono:

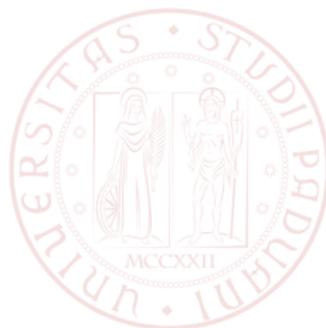
- Fast neutron and Gamma radiography (FNGR)
- Fast neutron resonance radiography (FNRR)
- Neutron-in gamma-out (raggi- γ caratteristici del materiale emessi in reazioni indotte da neutroni veloci o termici)



Fast Neutron Gamma Radiography

L'uso combinato di neutroni e raggi γ può portare informazioni sul numero atomico del materiale

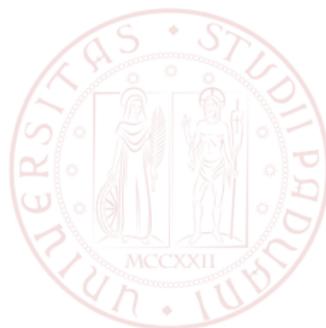
$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu\rho x)$$



Fast Neutron Gamma Radiography

L'uso combinato di neutroni e raggi γ può portare informazioni sul numero atomico del materiale

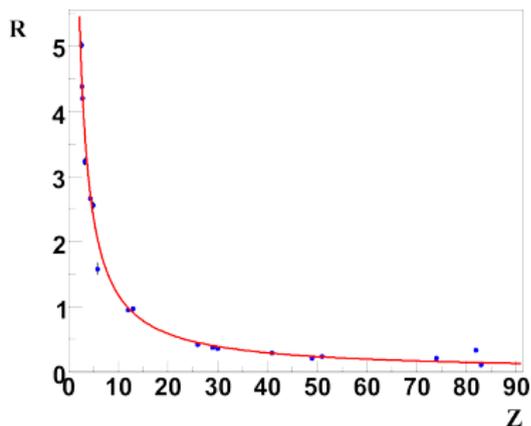
$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu\rho x) \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\mu_n}{\mu_\gamma} = \frac{\ln\left(\frac{I_n}{I_0^n}\right)}{\ln\left(\frac{I_\gamma}{I_0^\gamma}\right)}$$



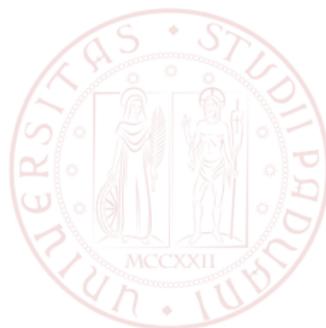
Fast Neutron Gamma Radiography

L'uso combinato di neutroni e raggi γ può portare informazioni sul numero atomico del materiale

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu\rho x) \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\mu_n}{\mu_\gamma} = \frac{\ln\left(\frac{I_n}{I_0^n}\right)}{\ln\left(\frac{I_\gamma}{I_0^\gamma}\right)}$$



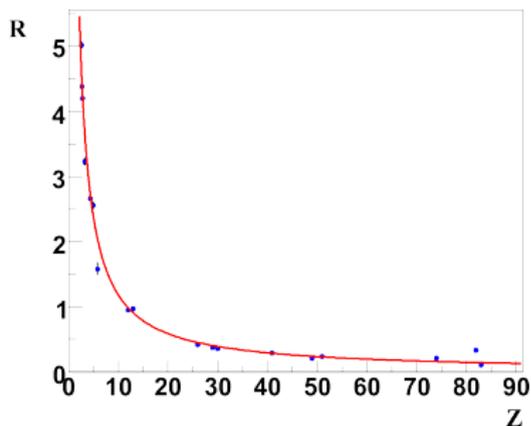
- R dipende da Z
- R non dipende dallo spessore del materiale



Fast Neutron Gamma Radiography

L'uso combinato di neutroni e raggi γ può portare informazioni sul numero atomico del materiale

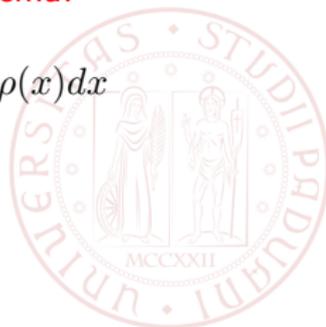
$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu\rho x) \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\mu_n}{\mu_\gamma} = \frac{\ln\left(\frac{I_n}{I_0^n}\right)}{\ln\left(\frac{I_\gamma}{I_0^\gamma}\right)}$$



- R dipende da Z
- R non dipende dallo spessore del materiale

Problema!

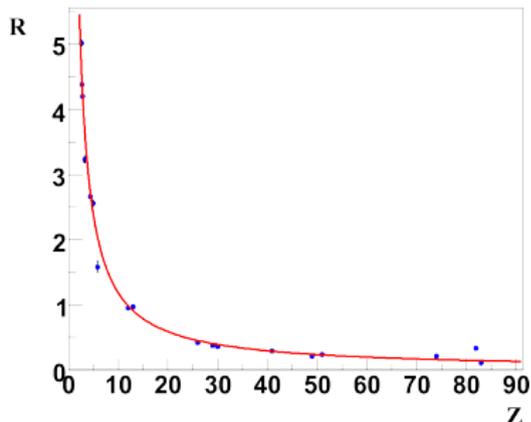
$$\int \mu(x)\rho(x)dx$$



Fast Neutron Gamma Radiography

L'uso combinato di neutroni e raggi γ può portare informazioni sul numero atomico del materiale

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu\rho x) \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\mu_n}{\mu_\gamma} = \frac{\ln\left(\frac{I_n}{I_n^0}\right)}{\ln\left(\frac{I_\gamma}{I_\gamma^0}\right)}$$



- R dipende da Z
- R non dipende dallo spessore del materiale

Problema!

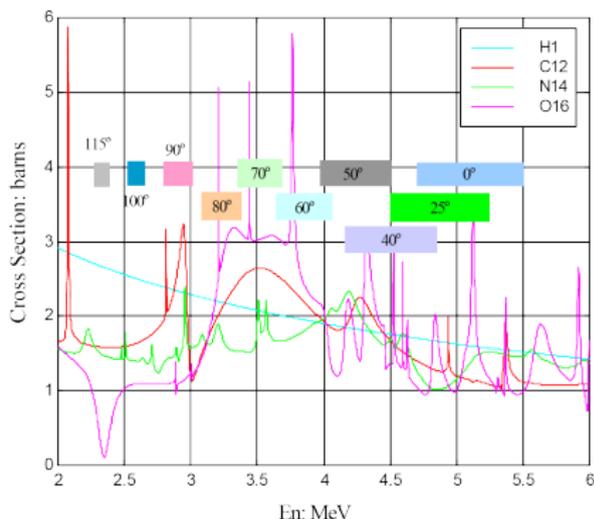
$$\int \mu(x)\rho(x)dx$$

Un sistema commerciale che usa quest'ultima tecnica è stato installato in Australia. (J. E. Eberhardt, *Appl. Radiat. Isot* 63 (2005) 179)

R.J. Rasmussen et Al. *Nucl Instrum. Meth.* B214 (1997) 611
G. Viesti et Al. *Nucl Instrum. Meth.* A593 (2008) 592-596

Fast Neutron Resonance Radiography

La FNRR studia le risonanze della sezione d'urto dei neutroni in un range di energia fra 1 e 10 MeV.



Lo studio si concentra su materiali organici come **CARBONIO, AZOTO, OSSIGENO** ove la sezione d'urto presenta diverse strutture a seconda dell'elemento.

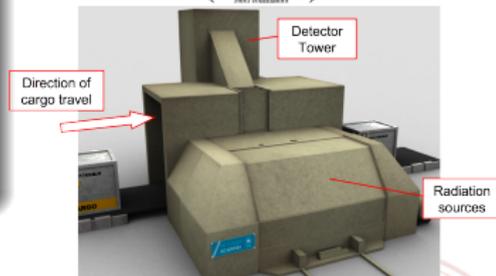
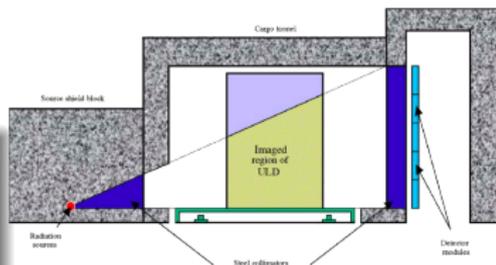
Questa tecnica potrebbe fornire in principio le frazioni C/O e N/O importanti per identificare materiali pericolosi come droghe ed esplosivi

W.L. Raas et al. Neutron Resonance radiography for explosive detection technical challenges. *In IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging* (2005)

Scanner installato all'aeroporto di Brisbane

Caratteristiche principali:

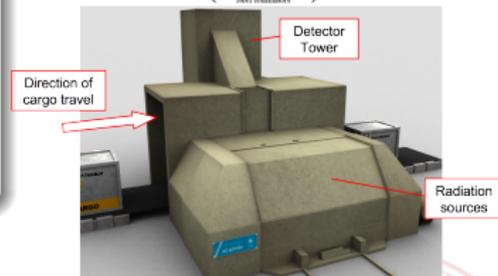
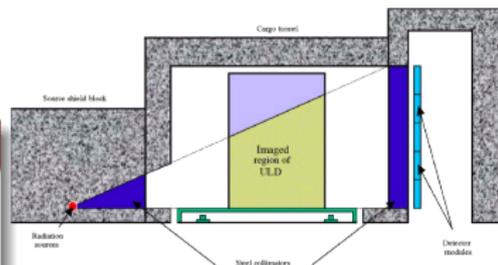
- Alto flusso di neutroni (10^{10} n/s) da 14 MeV,
- analizza ULDs sino a 2.7 metri di altezza,
- array di rivelatori per neutroni e raggi γ separati,
- pixel di 10x10 mm (oltre 1000 rivelatori)
- software di riconoscimento dei materiali per l'analisi in tempo reale
- tempi di scanning di circa 1-2 minuti per ULD



Scanner installato all'aeroporto di Brisbane

Caratteristiche principali:

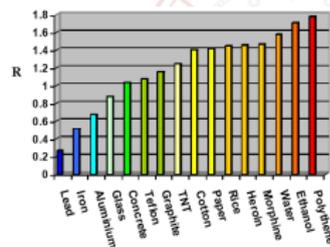
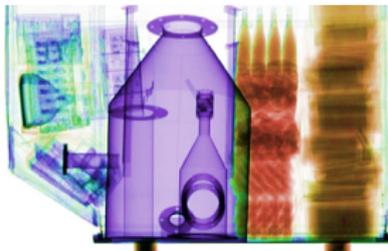
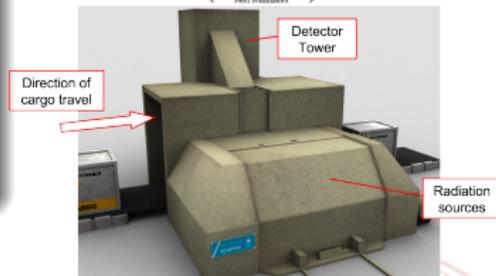
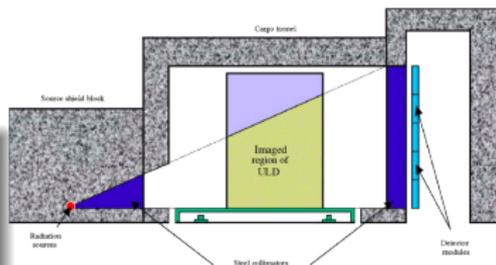
- Alto flusso di neutroni (10^{10} n/s) da 14 MeV,
- analizza ULDs sino a 2.7 metri di altezza,
- array di rivelatori per neutroni e raggi γ separati,
- pixel di 10x10 mm (oltre 1000 rivelatori)
- software di riconoscimento dei materiali per l'analisi in tempo reale
- tempi di scanning di circa 1-2 minuti per ULD



Scanner installato all'aeroporto di Brisbane

Caratteristiche principali:

- Alto flusso di neutroni (10^{10} n/s) da 14 MeV,
- analizza ULDs sino a 2.7 metri di altezza,
- array di rivelatori per neutroni e raggi γ separati,
- pixel di 10x10 mm (oltre 1000 rivelatori)
- software di riconoscimento dei materiali per l'analisi in tempo reale
- tempi di scanning di circa 1-2 minuti per ULD



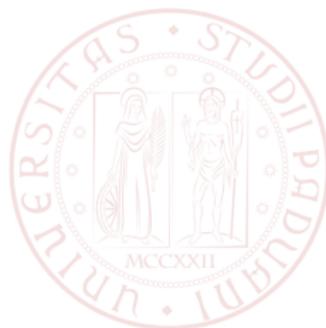
Material recognition con sorgenti di fissione

L'idea..
Utilizzo di una sorgente di fissione



Vantaggi

- Sorgente di neutroni e raggi γ
- Spettro continuo in energia
- Possibilità di effettuare FNRR, FNRR e γ caratteristici

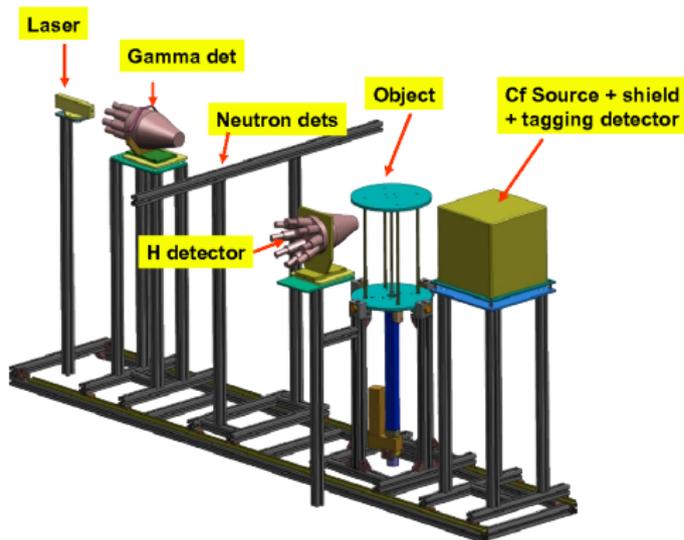


Material recognition con sorgenti di fissione

L'idea..
Utilizzo di una sorgente di fissione ⇒

Vantaggi

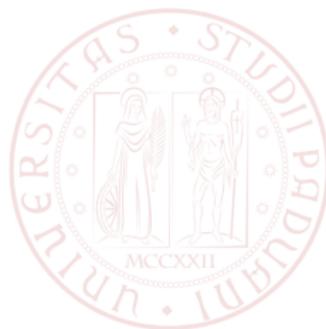
- Sorgente di neutroni e raggi γ
- Spettro continuo in energia
- Possibilità di effettuare FNRR, FNRR e γ caratteristici



Il progetto, finanziato dalla fondazione Cariparo, nasce con lo scopo di trovare i limiti statistici e di risoluzione per l'analisi non distruttiva con una sorgente di ^{252}Cf



L'apparato sperimentale

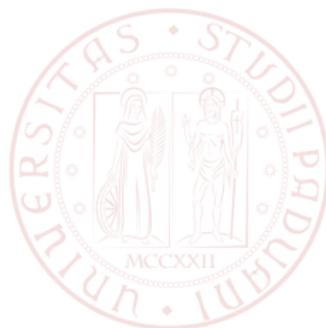


L'apparato sperimentale



Principali caratteristiche:

- Utilizzo sorgente di ^{252}Cf (10^6 neutroni/s),

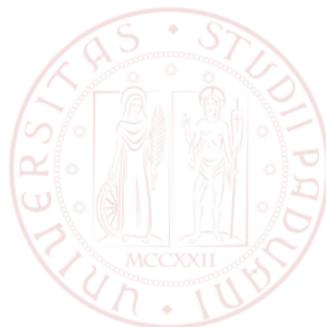


L'apparato sperimentale



Principali caratteristiche:

- Utilizzo sorgente di ^{252}Cf (10^6 neutroni/s),
- array di 8 rivelatori n/ γ ,

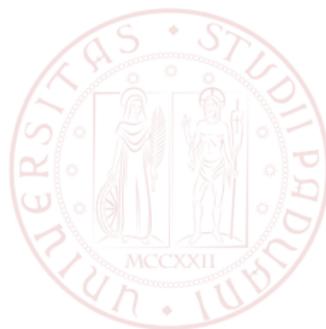


L'apparato sperimentale



Principali caratteristiche:

- Utilizzo sorgente di ^{252}Cf (10^6 neutroni/s),
- array di 8 rivelatori n/ γ ,
- NaI(Tl)+schermo anticoincidenza per lo studio di H(n, γ),

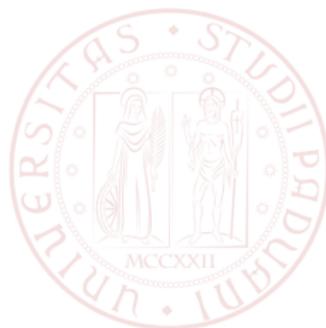


L'apparato sperimentale



Principali caratteristiche:

- Utilizzo sorgente di ^{252}Cf (10^6 neutroni/s),
- array di 8 rivelatori n/ γ ,
- NaI(Tl)+schermo anticoincidenza per lo studio di H(n, γ),
- NaI(Tl)+schermo anticoincidenza per materiali ad alto Z,

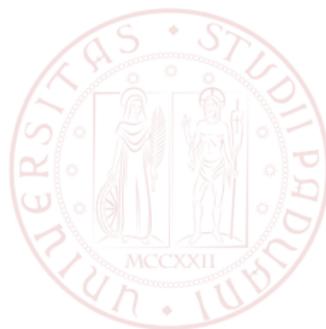
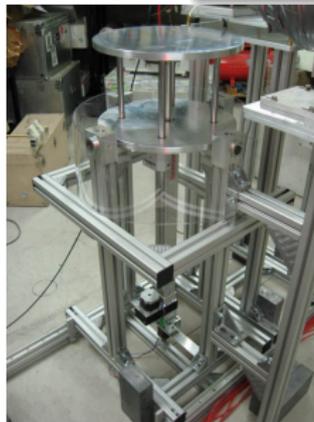


L'apparato sperimentale



Principali caratteristiche:

- Utilizzo sorgente di ^{252}Cf (10^6 neutroni/s),
- array di 8 rivelatori n/ γ ,
- NaI(Tl)+schermo anticoincidenza per lo studio di H(n, γ),
- NaI(Tl)+schermo anticoincidenza per materiali ad alto Z,
- sistema computer controlled per il posizionamento del campione.

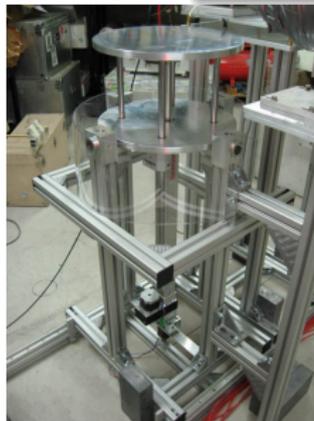


L'apparato sperimentale



Principali caratteristiche:

- Utilizzo sorgente di ^{252}Cf (10^6 neutroni/s),
- array di 8 rivelatori n/ γ ,
- NaI(Tl)+schermo anticoincidenza per lo studio di H(n, γ),
- NaI(Tl)+schermo anticoincidenza per materiali ad alto Z,
- sistema computer controlled per il posizionamento del campione.

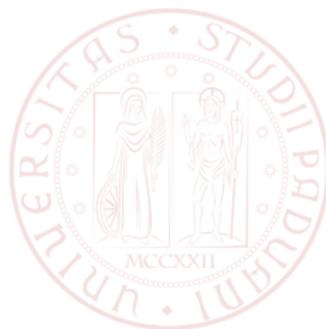
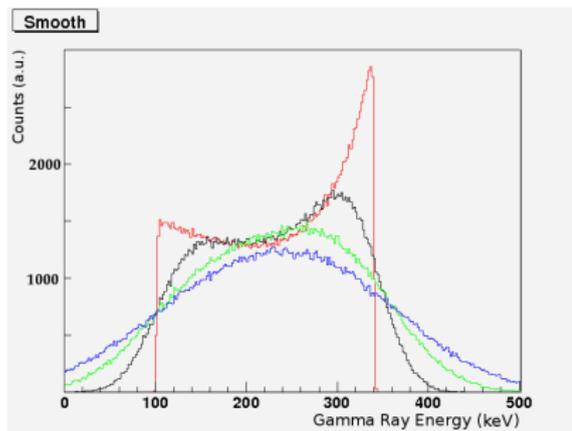


Calibrazioni

Per le calibrazioni in energia dei rivelatori di neutroni l'assenza del fotopicco costringe ad una calibrazione basata sul *Compton Edge*.

Problema: la risoluzione in energia del rivelatore provoca uno shift della posizione apparente del CE.

Soluzione: simulazione MonteCarlo, come varia il CE in funzione della risoluzione del nostro scintillatore

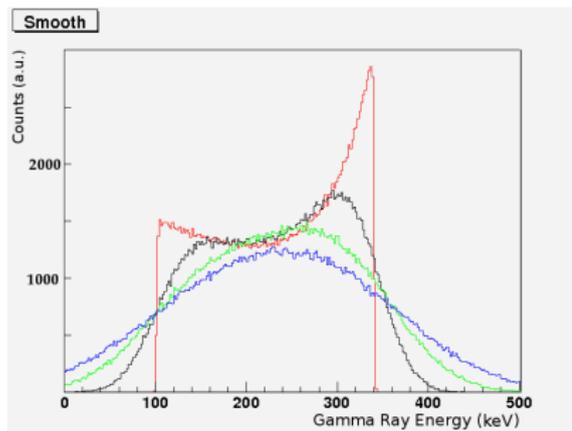


Calibrazioni

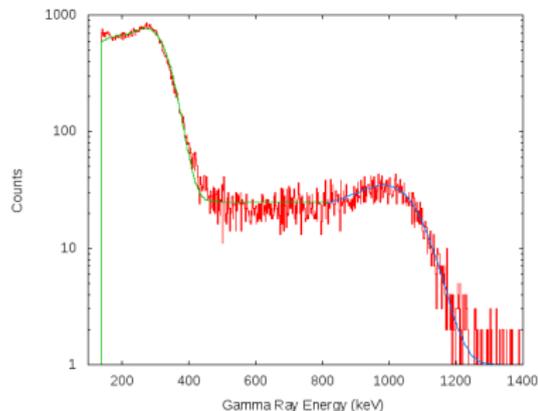
Per le calibrazioni in energia dei rivelatori di neutroni l'assenza del fotopicco costringe ad una calibrazione basata sul *Compton Edge*.

Problema: la risoluzione in energia del rivelatore provoca uno shift della posizione apparente del CE.

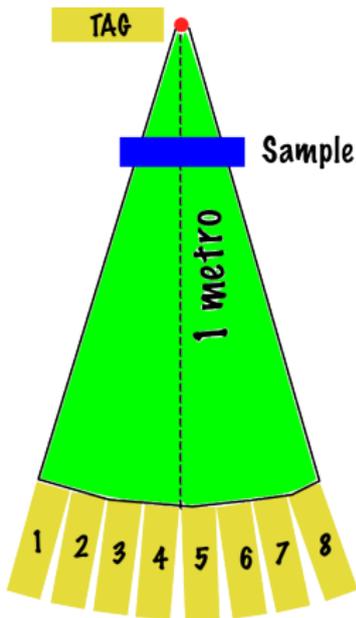
Soluzione: simulazione MonteCarlo, come varia il CE in funzione della risoluzione del nostro scintillatore



Le calibrazioni in energia sono state fatte con una sorgente di ^{22}Na trovando la risoluzione che minimizza il χ^2 del fit.



Le risoluzioni trovate sono del 13% ($\sigma = 46$ keV) per il CE a 340 keV e del 6% ($\sigma = 69$ keV) per il CE a 1062 keV.

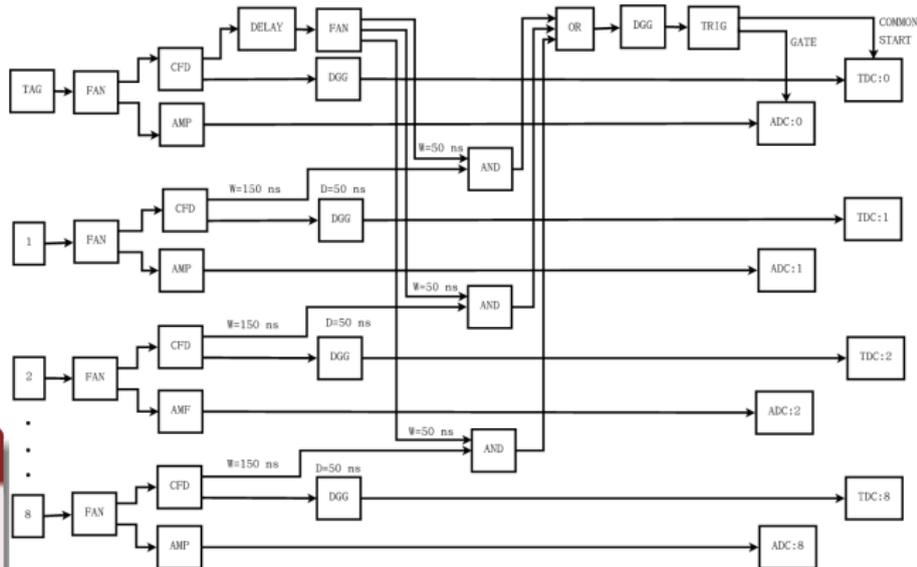


Viene registrato:

- Tempo di volo
- Ampiezza del segnale

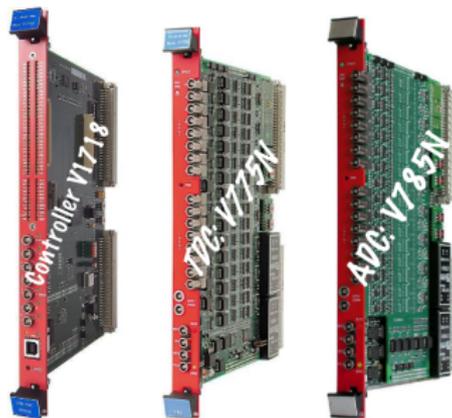
TRIGGER di acquisizione

(TAG AND 1) OR (TAG AND 2) OR ... OR (TAG AND 8)

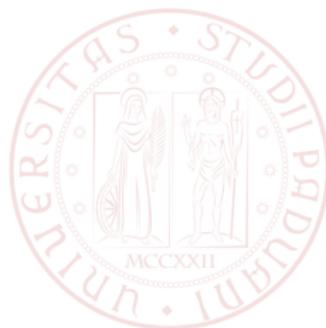


VME & LabView

I segnali in energia e i tempi di volo degli 8 rivelatori vengono registrati dal VME.

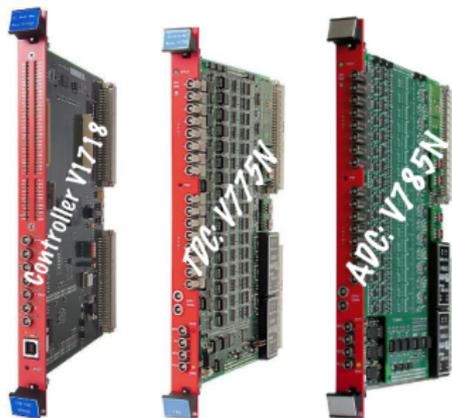


- Alta velocità di trasferimento dati (30Mb/s)
- Totale gestibilità via software
- Estrema versatilità



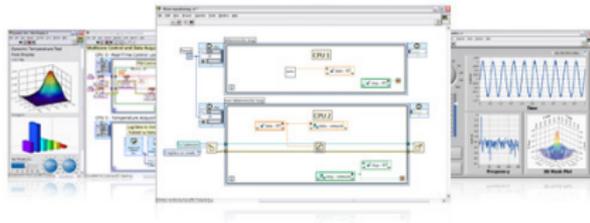
VME & LabView

I segnali in energia e i tempi di volo degli 8 rivelatori vengono registrati dal VME.



- Alta velocità di trasferimento dati (30Mb/s)
- Totale gestibilità via software
- Estrema versatilità

Il sistema di acquisizione è controllato da LabView.



LabView coordina:

- Il movimento dei motori per il posizionamento del campione
- Crea il file di configurazione per il VME
- Start e Stop dell'acquisizione
- Salvataggio dei dati e conversione

LabView permette di effettuare attualmente la mosaicatura bidimensionale di un oggetto in maniera totalmente automatica ed in futuro la ricostruzione tridimensionale

Campioni utilizzati per la calibrazione

Calibrazioni in R:

- 14 campioni monoelementali
- 10 campioni plurielementali

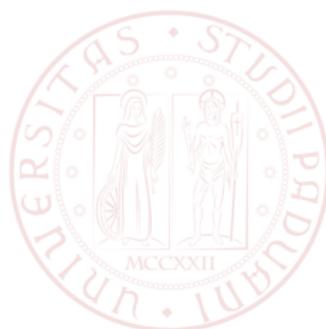


Monoelementali				Plurielementali			
Materiale	Z	Materiale	Z	Materiale	Z	Materiale	Z
C	6	Ge	32	Alcol	2.88	Carta	4.09
Mg	12	Nb	41	Polietilene	2.67	Melamine	4.40
Al	13	Cd	48	Acqua	3.33	Kapton	5.02
S	16	In	49	Plexiglass	3.6	PVC	5.33
Fe	26	Sn	50	Bachelite	3.88	Teflon	8.00
Ni	28	Ta	73				
Cu	29	Bi	83				

Calibrazione R verso Z

R non dipende dallo spessore e
dalla densità del campione

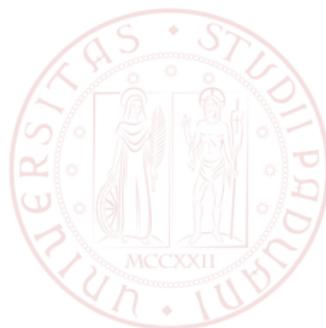
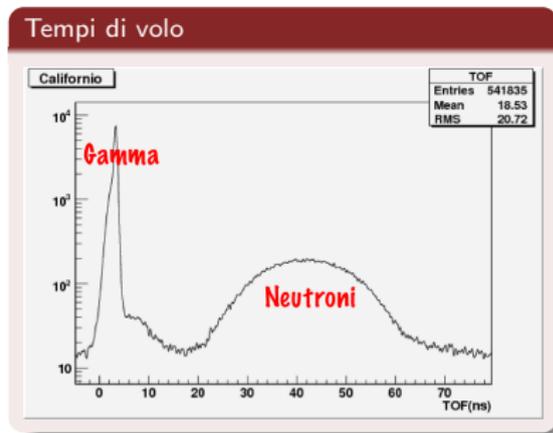
$$R = \frac{\mu_n}{\mu_\gamma} = \frac{\ln\left(\frac{I_n}{I_n^0}\right)}{\ln\left(\frac{I_\gamma}{I_\gamma^0}\right)}$$



Calibrazione R verso Z

R non dipende dallo spessore e dalla densità del campione

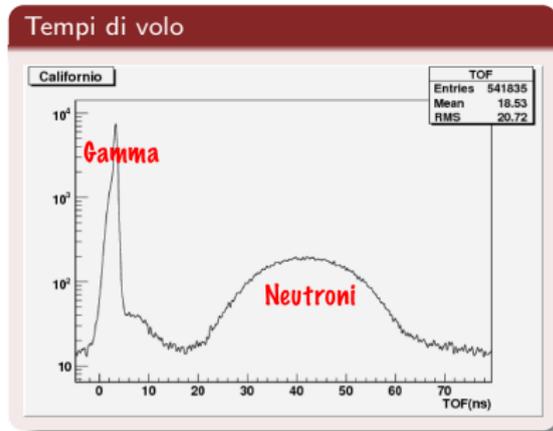
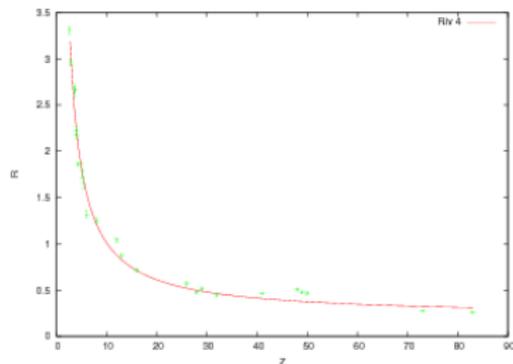
$$R = \frac{\mu_n}{\mu_\gamma} = \frac{\ln\left(\frac{I_n}{I_n^0}\right)}{\ln\left(\frac{I_\gamma}{I_\gamma^0}\right)}$$



Calibrazione R verso Z

R non dipende dallo spessore e dalla densità del campione

$$R = \frac{\mu_n}{\mu_\gamma} = \frac{\ln\left(\frac{I_n}{I_n^0}\right)}{\ln\left(\frac{I_\gamma}{I_\gamma^0}\right)}$$



$$R = a + \frac{b}{Z}$$

$$a = 0.21 \pm 0.02$$

$$b = 7.93 \pm 0.28$$

La variazione $\Delta R/\Delta Z$ è molto più importante per elementi leggeri piuttosto che per elementi ad alto Z

$$\frac{\Delta R}{\Delta Z} = 220 \cdot 10^{-3} \quad 5 < Z < 13$$

$$\frac{\Delta R}{\Delta Z} = 5.4 \cdot 10^{-3} \quad Z > 26$$

Il potere risolvente è definito:

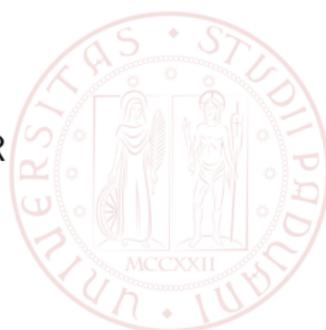
$$\delta Z = \frac{\Delta Z}{\Delta R} \sigma_R$$



con un accuratezza del 5% sulla misura di R

$$\delta Z \sim 0.2 \quad 5 < Z < 13$$

$$\delta Z \sim 9.2 \quad Z > 26$$



Potere risolvante apparato

Riportiamo il potere risolvante dell'apparato CARIPARO per spettri da $2 \cdot 10^5$ secondi con un'accuratezza su R inferiore all'1%.

Potere Risolvante

ΔZ	Rivelatori							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2.67-3.6	0.117	0.087	0.091	0.079	0.090	0.078	0.450	0.090
3.6-3.69	0.013	0.029	0.039	0.301	0.025	0.046	0.004	0.028
3.69-3.88	0.029	0.019	0.019	0.020	0.021	0.017	0.057	0.023
3.88-4.40	0.037	0.038	0.057	0.038	0.044	0.066	0.036	0.050
4.40-6	0.116	0.116	0.121	0.107	0.144	0.111	0.112	0.095
6-8	0.393	0.392	0.358	0.915	0.285	0.320	0.345	0.480
8-12	0.924	0.818	0.891	0.656	0.824	0.840	0.806	0.678
12-16	0.341	0.297	0.356	0.324	0.378	0.463	0.422	0.328
16-26	2.188	1.520	1.623	1.903	1.305	1.253	1.617	1.444
26-41	4.376	3.305	4.075	3.398	4.939	5.298	4.011	4.410
41-73	4.441	3.441	4.024	3.769	4.115	4.742	5.655	4.077
73-83	8.398	5.896	6.743	12.363	7.385	6.311	10.222	13.829

Immagine dei cilindri di grafite

La prima ricostruzione di un'immagine bidimensionale è stata fatta con due cilindri di grafite e due tavolette di legno

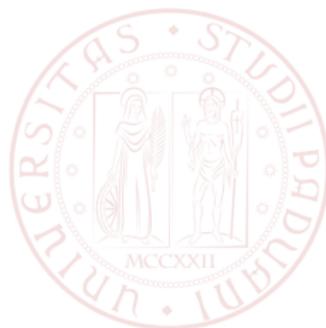
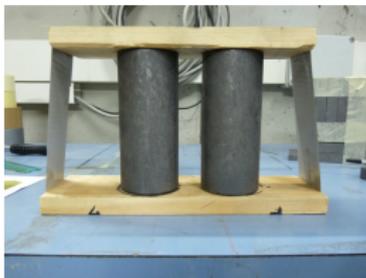
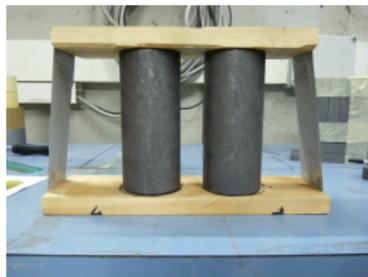


Immagine dei cilindri di grafite

La prima ricostruzione di un'immagine bidimensionale è stata fatta con due cilindri di grafite e due tavolette di legno



- Distanza sorgente-campione 50 cm
- Array di 8 rivelatori
- Pixel di 2.5 cm
- Movimento verticale di 8 step

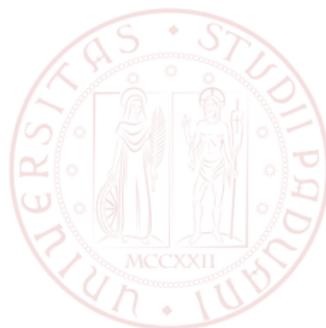
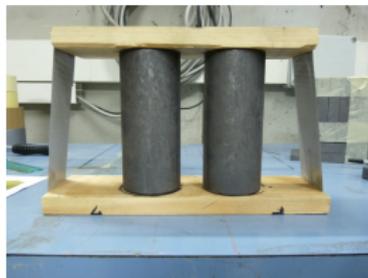


Immagine dei cilindri di grafite

La prima ricostruzione di un'immagine bidimensionale è stata fatta con due cilindri di grafite e due tavolette di legno



- Distanza sorgente-campione 50 cm
- Array di 8 rivelatori
- Pixel di 2.5 cm
- Movimento verticale di 8 step

Attenuazione raggi γ (64 pixel)

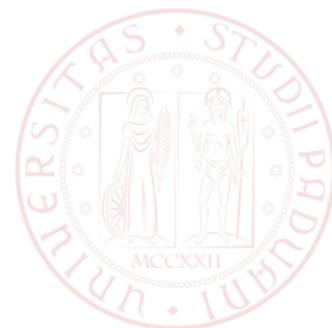
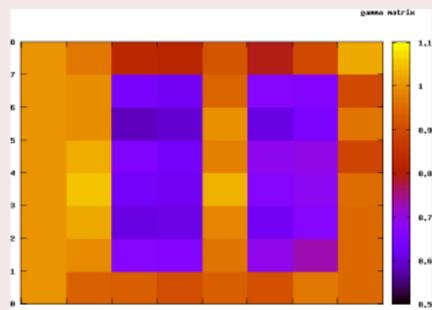
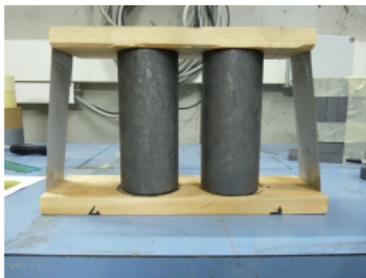


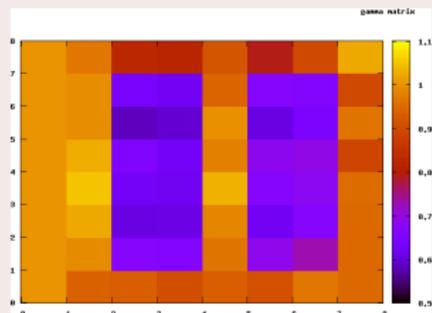
Immagine dei cilindri di grafite

La prima ricostruzione di un'immagine bidimensionale è stata fatta con due cilindri di grafite e due tavolette di legno



- Distanza sorgente-campione 50 cm
- Array di 8 rivelatori
- Pixel di 2.5 cm
- Movimento verticale di 8 step

Attenuazione raggi γ (64 pixel)



Attenuazione raggi γ (1600 pixel)

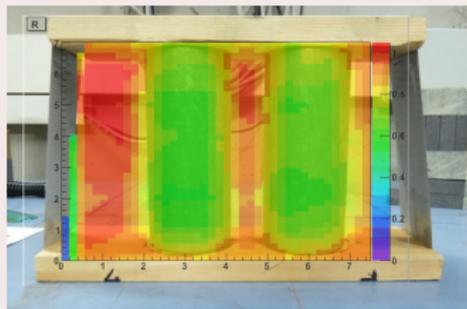


Immagine di un campione plurielementale

La seconda ricostruzione è stata fatta con un campione plurielementale composto da: polietilene, alluminio, piombo, grafite.

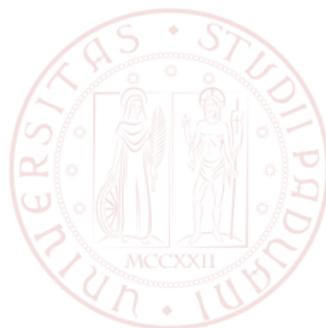


Immagine di un campione plurielementale

La seconda ricostruzione è stata fatta con un campione plurielementale composto da: polietilene, alluminio, piombo, grafite.



- Distanza sorgente-campione 35 cm
- Pixel di 1.8 cm
- Movimento verticale di 10 step
- Immagine di 2000 pixel

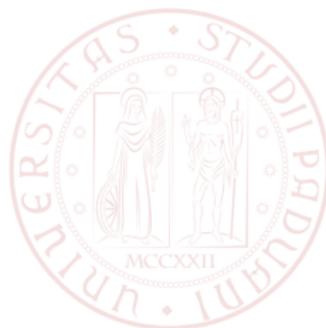


Immagine di un campione plurielementale

La seconda ricostruzione è stata fatta con un campione plurielementale composto da: polietilene, alluminio, piombo, grafite.



- Distanza sorgente-campione 35 cm
- Pixel di 1.8 cm
- Movimento verticale di 10 step
- Immagine di 2000 pixel

Rapporto R

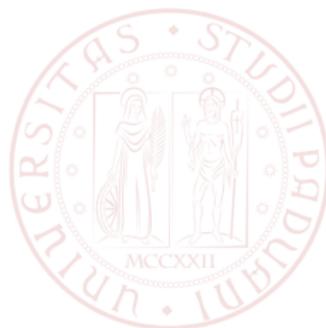
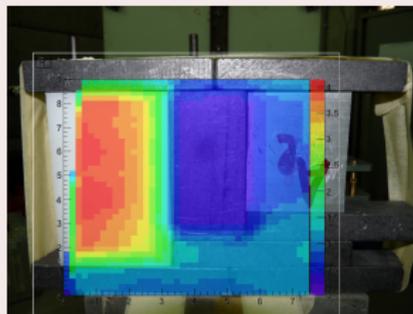


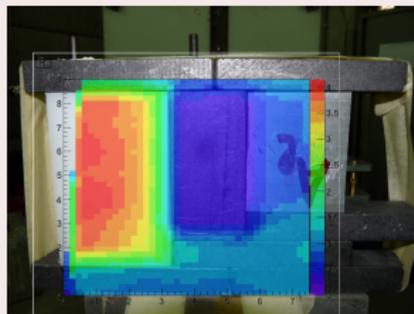
Immagine di un campione plurielementale

La seconda ricostruzione è stata fatta con un campione plurielementale composto da: polietilene, alluminio, piombo, grafite.



- Distanza sorgente-campione 35 cm
- Pixel di 1.8 cm
- Movimento verticale di 10 step
- Immagine di 2000 pixel

Rapporto R



Ricostruzione dello Z a partire da R

	Rivelatori							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	10.01	12.27	12.75	13.09	12.99	11.57	10.66	10.73
2	6.07	6.23	6.63	12.91	15.23	13.34	10.61	9.22
3	2.33	2.62	2.69	54.42	93.06	89.77	16.59	13.86
4	2.22	2.65	2.59	56.14	93.99	91.01	16.42	14.07
5	2.17	2.54	2.66	63.22	103.08	104.10	17.41	14.25
6	2.24	2.58	2.60	66.42	105.96	93.42	17.33	15.09
7	2.10	2.47	2.67	67.42	113.96	101.51	17.06	13.86
8	2.22	2.70	2.76	54.96	86.11	82.11	10.94	8.93
9	2.30	2.78	2.84	6.71	8.64	8.84	9.44	8.35
10	7.68	8.80	8.83	8.07	9.11	8.38	9.34	8.57

Immagine di un campione plurielementale

La terza ricostruzione è stata fatta con una finestra di plexiglass riempita di melamina, zolfo e grafite.

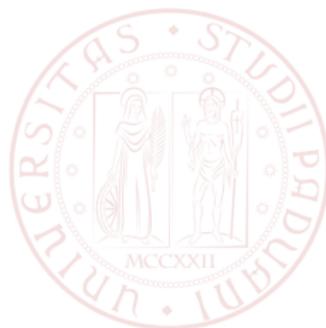
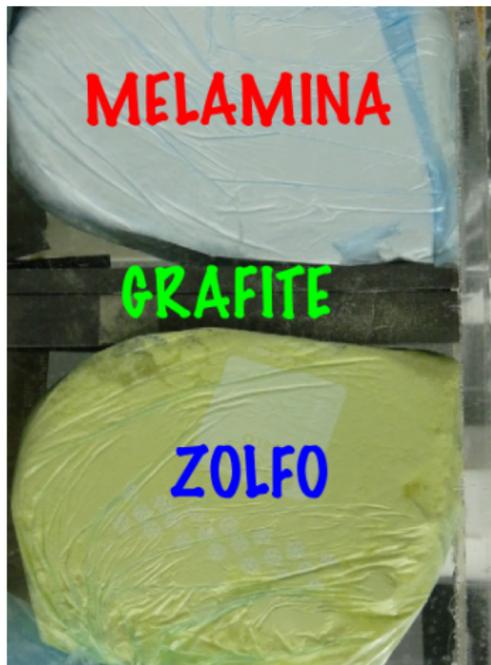


Immagine di un campione plurielementale

La terza ricostruzione è stata fatta con una finestra di plexiglass riempita di melamina, zolfo e grafite.



- Distanza sorgente-campione 30 cm
- Pixel di 1.8x1.0 cm
- Movimento verticale di 10 step
- Immagine di 2000 pixel

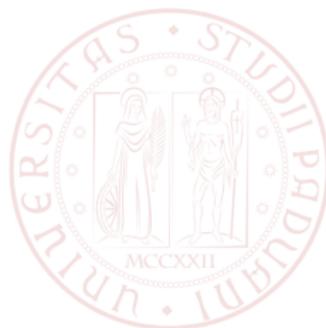
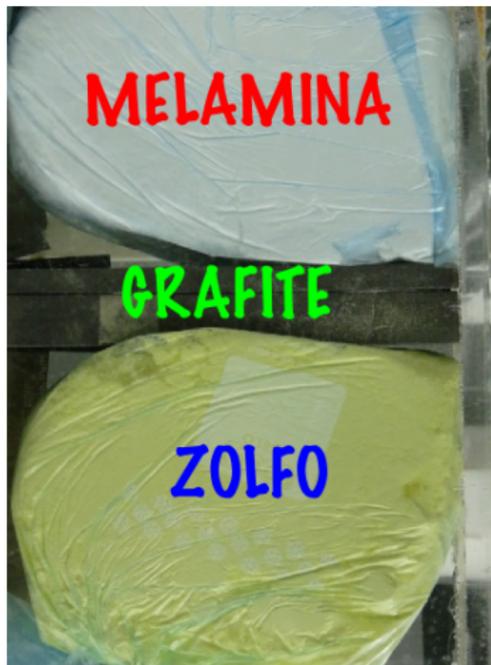


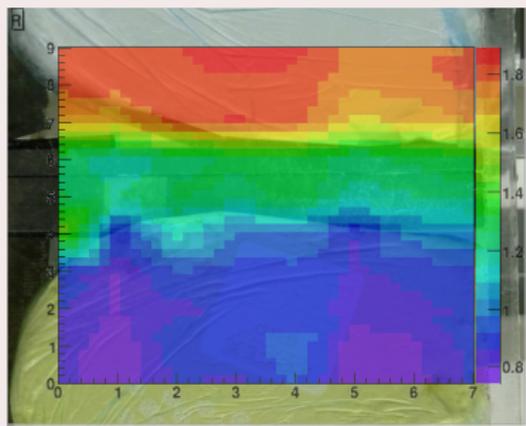
Immagine di un campione plurielementale

La terza ricostruzione è stata fatta con una finestra di plexiglass riempita di melamina, zolfo e grafite.



- Distanza sorgente-campione 30 cm
- Pixel di 1.8x1.0 cm
- Movimento verticale di 10 step
- Immagine di 2000 pixel

Rapporto R



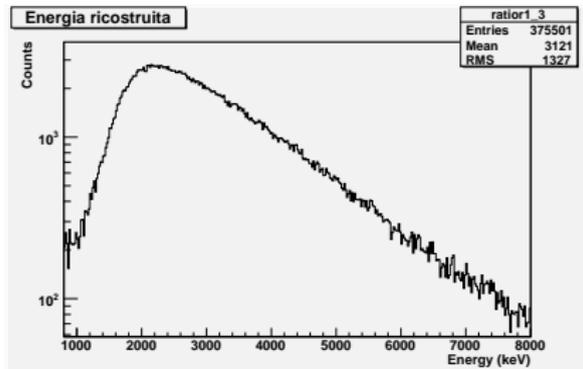
Costruire uno spettro di trasmissione

Neutroni veloci (0.5-8 MeV)



l'energia del neutrone può essere ricostruita a partire dal tempo di volo in approssimazione non relativistica ($\beta < 0.1$):

$$E_n = \frac{1}{2} m_n \left(\frac{d}{t} \right)^2$$



L'errore sulla ricostruzione dell'energia dipende dalla risoluzione temporale del sistema e dall'incertezza sul punto di irradiazione del neutrone all'interno del rivelatore ($\sigma_d = 2.5$ cm)



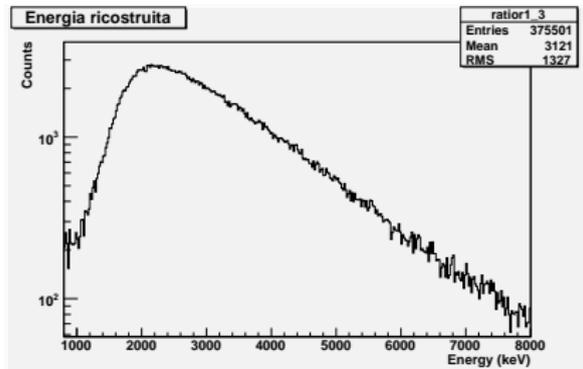
Costruire uno spettro di trasmissione

Neutroni veloci (0.5-8 MeV)



l'energia del neutrone può essere ricostruita a partire dal tempo di volo in approssimazione non relativistica ($\beta < 0.1$):

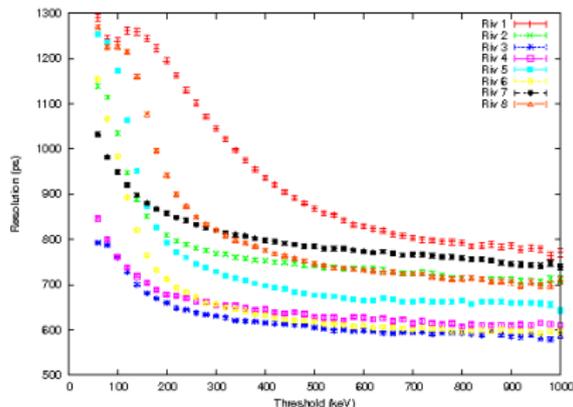
$$E_n = \frac{1}{2} m_n \left(\frac{d}{t} \right)^2$$



L'errore sulla ricostruzione dell'energia dipende dalla risoluzione temporale del sistema e dall'incertezza sul punto di iterazione del neutrone all'interno del rivelatore ($\sigma_d = 2.5$ cm)

IMPORTANTE ottimizzare la risoluzione temporale!

- Ottimizzata l'elettronica
- Impostata soglia adeguata



Per CARIPARO \Rightarrow TH= 300 keVee

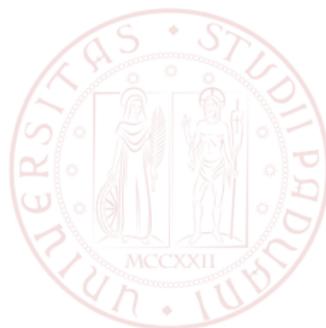
Risoluzione temporale $\sigma_t = 600 - 800$ ps

La risoluzione temporale è stata calcolata come FWHM del picco γ nello spettro dei tempi di volo.

Misure di trasmissione dei neutroni

Il coefficiente di attenuazione per i neutroni è definito a partire dalla sezione d'urto.

$$\mu(E) = \Sigma(E) = N\sigma(E) \quad \Rightarrow \quad \mu_n(E) = \frac{\log\left(\frac{I_0(E)}{I(E)}\right)}{\rho x}$$

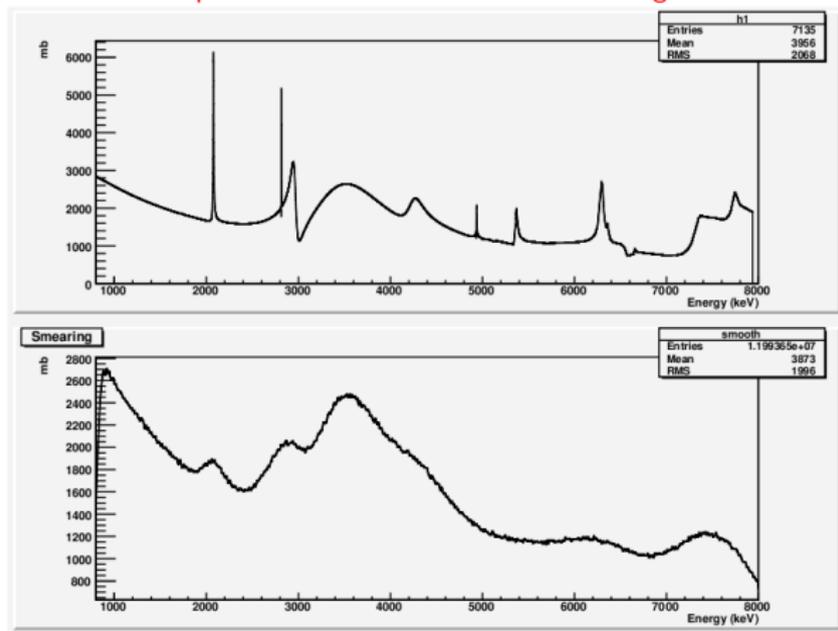


Misure di trasmissione dei neutroni

Il coefficiente di attenuazione per i neutroni è definito a partire dalla sezione d'urto.

$$\mu(E) = \Sigma(E) = N\sigma(E) \quad \Rightarrow \quad \mu_n(E) = \frac{\log\left(\frac{I_0(E)}{I(E)}\right)}{\rho x}$$

La risoluzione in tempo del rivelatore introduce uno smearing della sezione d'urto

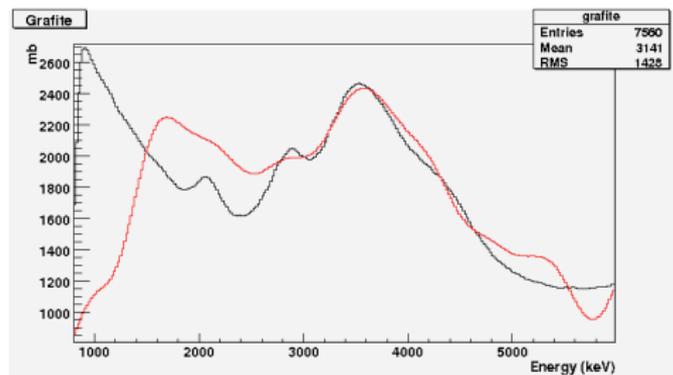


Campioni semplici

Campione monoelentale

Grafite

Composizione: C



La curva rossa si riferisce allo spettro sperimentale, la curva nera è la previsione teorica

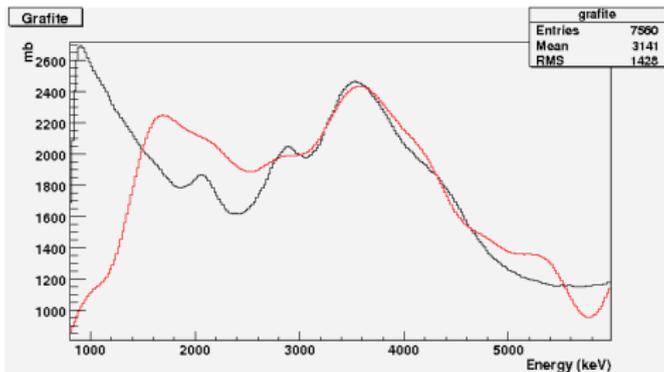


Campioni semplici

Campione monoelentale

Grafite

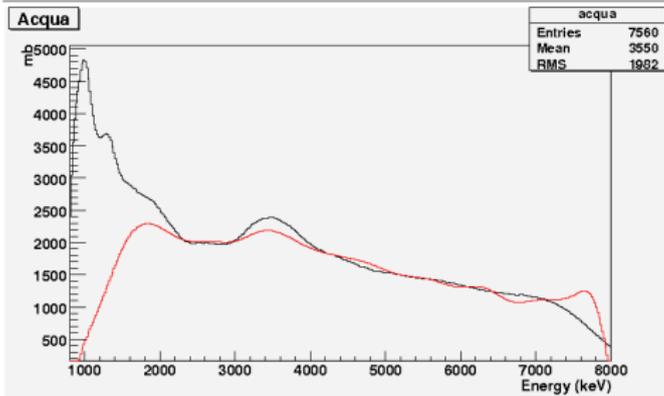
Composizione: C



Finestra di 2 cm di spessore

Acqua

Composizione: H₂O



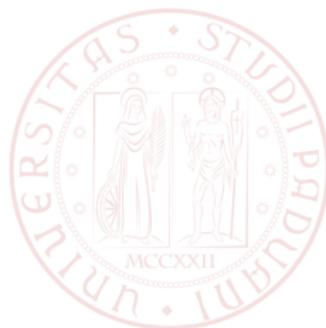
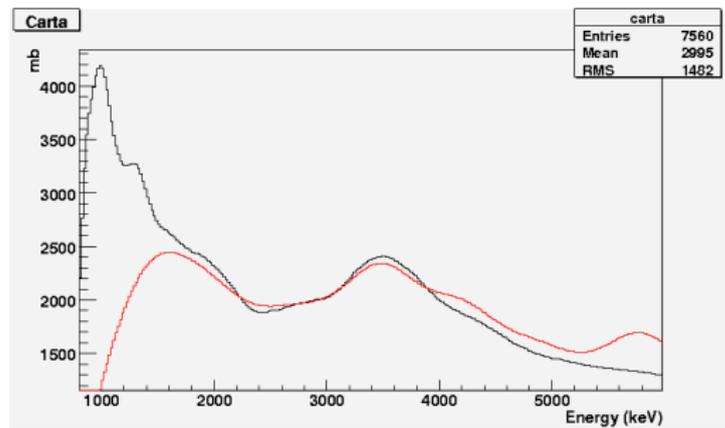
La curva rossa si riferisce allo spettro sperimentale, la curva nera è la previsione teorica

Campioni complessi

Risma di 5 cm di spessore

Carta

Composizione: $C_6H_{10}O_5$

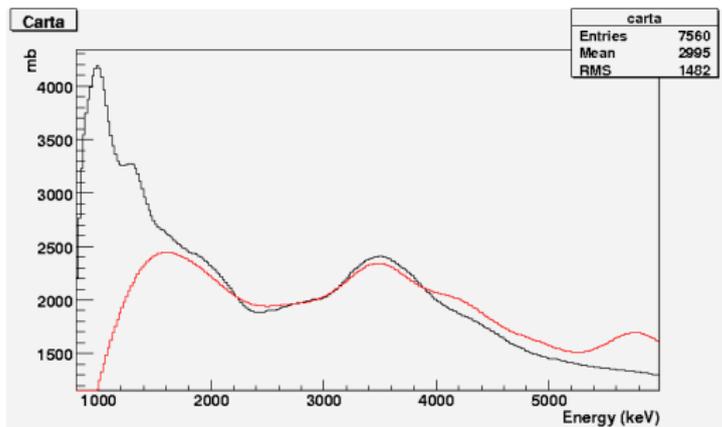


Campioni complessi

Risma di 5 cm di spessore

Carta

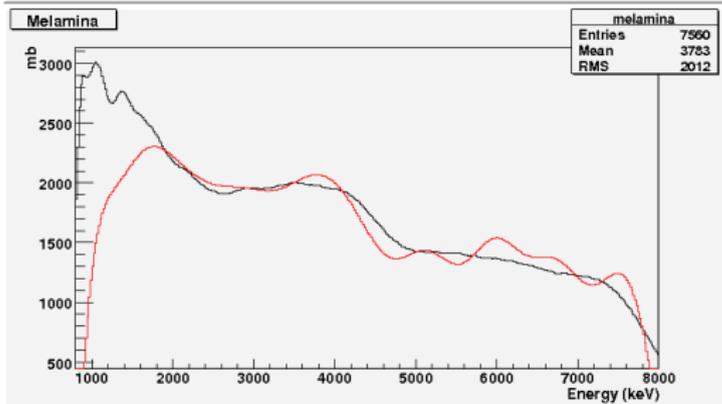
Composizione: $C_6H_{10}O_5$



Finestra di 2 cm di spessore

Melamina

Composizione: $C_3H_6N_6$

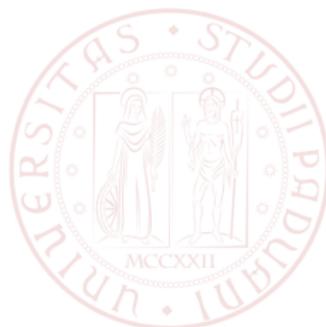
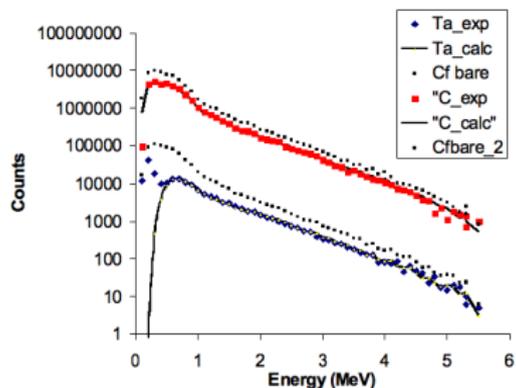


Identificazione del materiale

Misurando lo spettro di trasmissione per i raggi γ in un range di energia fra 0.1 e 5.5 MeV, caratteristico del ^{252}Cf , è possibile identificare lo Z del materiale.

Nota l'intensità del fascio incidente: $I_{\gamma,0}(E)$ è possibile ricostruire, attraverso il database del NIRST, lo spettro atteso.

$$I_{\gamma}(E, Z) = I_{\gamma,0}(E) \exp(-\mu(Z)t)$$

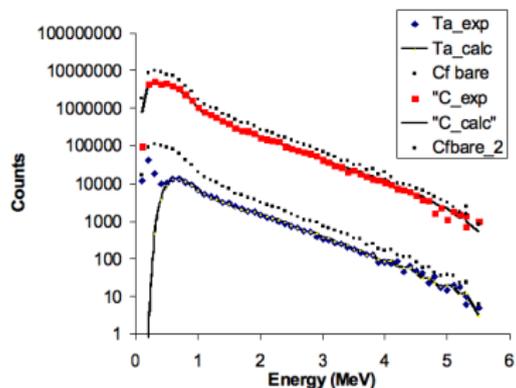


Identificazione del materiale

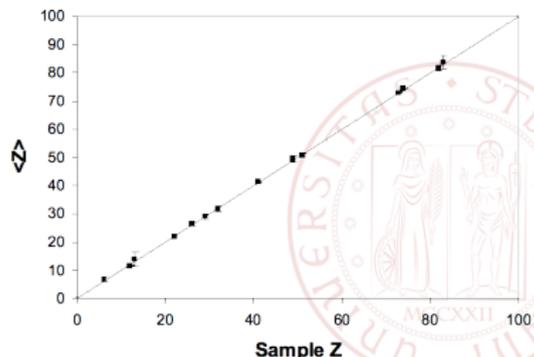
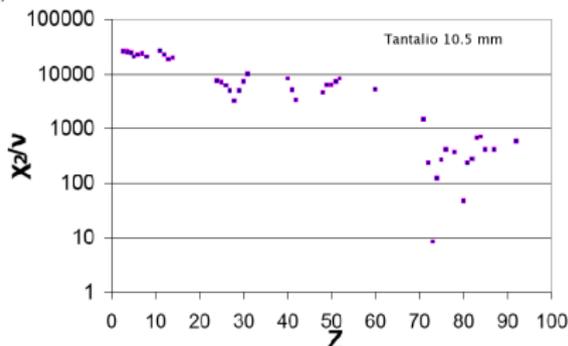
Misurando lo spettro di trasmissione per i raggi γ in un range di energia fra 0.1 e 5.5 MeV, caratteristico del ^{252}Cf , è possibile identificare lo Z del materiale.

Nota l'intensità del fascio incidente: $I_{\gamma,0}(E)$ è possibile ricostruire, attraverso il database del NIRST, lo spettro atteso.

$$I_{\gamma}(E, Z) = I_{\gamma,0}(E) \exp(-\mu(Z)t)$$



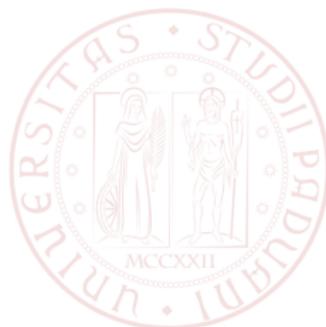
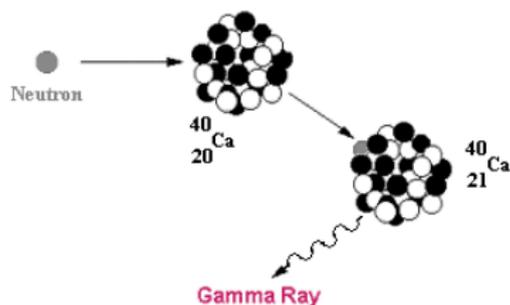
Attraverso lo spettro misurato $I_{\gamma}(E)$, noto lo spessore t è possibile identificare lo $\langle Z \rangle$ minimizzando il χ^2/ν .



G. Viesti et al. Material recognition using fission gamma ray. *Nucl. Instrum. Meth.* (2007)

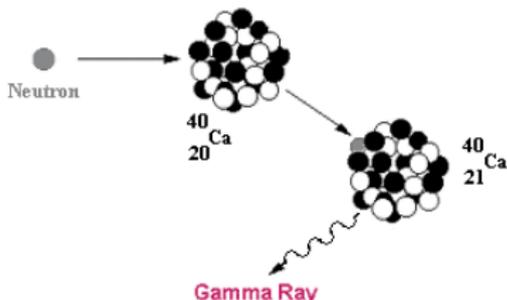
Thermal neutron capture

Il rivelatore posto a 90° rispetto all'asse dell'apparato ha la funzione di contare i raggi γ emessi a causa della cattura di un neutrone termico da parte del campione.



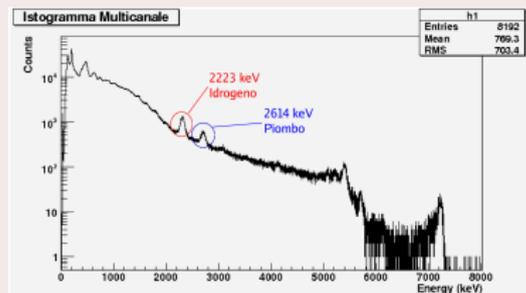
Thermal neutron capture

Il rivelatore posto a 90° rispetto all'asse dell'apparato ha la funzione di contare i raggi γ emessi a causa della cattura di un neutrone da parte del campione.

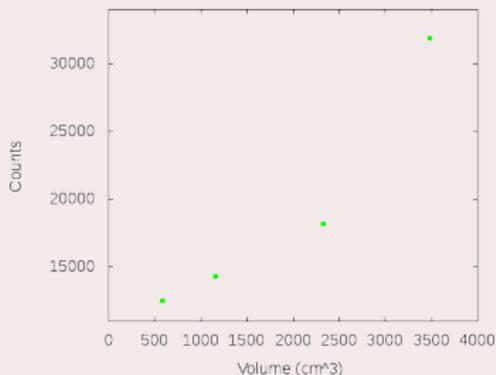


In particolare noi guarderemo la cattura neutronica da parte dell'idrogeno $\text{H}(n,\gamma)$
Scopo: risalire alla quantità d'Idrogeno presente nel campione

Spettro in energia

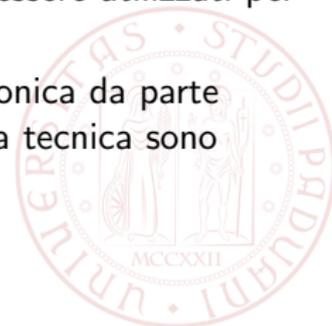


Calibrazione in H



Conclusioni

- La calibrazione in R risulta all'avanguardia rispetto ai sistemi pubblicati precedentemente
- Il potere risolvante del sistema è ~ 0.1 per materiali leggeri ($Z < 10$) mentre per elementi pesanti R non fornisce informazioni significative
- Ricostruendo le prime immagini abbiamo dimostrato la possibilità di effettuare analisi non distruttive con questo apparato
- Le misure di trasmissione dei neutroni possono portare informazioni sulla composizione del materiale, in particolare per quanto riguarda le frazioni C/O N/O
- Le misure di trasmissione dei raggi γ da fissione possono essere utilizzati per l'identificazione dei materiali ad alto Z
- Il rivelatore a 90° conta i raggi γ indotti da cattura neutronica da parte dell'Idrogeno. Le calibrazioni necessarie per l'uso di questa tecnica sono tutt'ora in corso



L. Stevanato^a, D. Fabris^b, M. Lunardon^{a,b}, S. Moretto^{a,b}, G. Nebbia^b, S. Pesente^b, L. Sajo-Bohus^c, G. Viesti^{a,b}

^aDipartimento di Fisica dell'Università di Padova, Via Marzolo 8, I-35131 Padova, Italy

^bINFN Sezione di Padova, Via Marzolo 8, I-35131 Padova, Italy

^cUniversidad Simon-Bolivar, Laboratorio Física Nuclear, Apartado 8900, 1080 A. Caracas Venezuela

