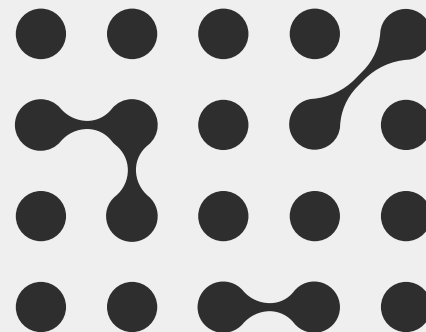


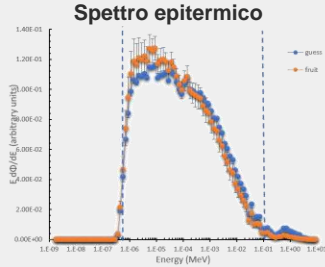


Calibrazione di uno spettrometro $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ per misure di attivazione neutronica in ambito BNCT

- » Candidata: Valentina Barletta
- » Relatore: prof. Marco Costa



BNCT: Boron Neutron Capture Therapy



↓

Usa **neutroni** nel range epitermico (**1 eV - 100 keV**)

↓

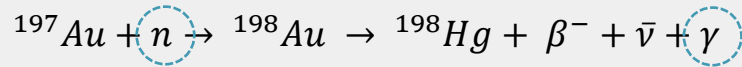
La qualifica dello spettro richiede uno **strumento** in grado di misurare energie su 5 ordini di grandezza

↓

Sviluppo di uno spettrometro ad attivazione

Attivazione neutronica

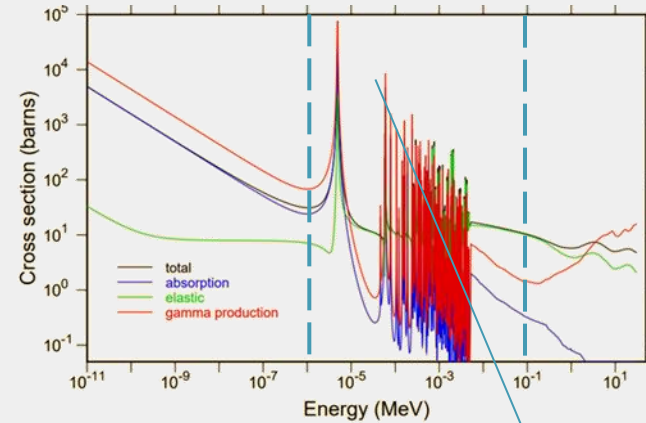
- Il processo di attivazione neutronica consiste nella produzione di un isotopo instabile attraverso l'assorbimento di neutroni da parte dei nuclei presenti nel materiale da analizzare.



- L'*Attività* di una lamina dopo essere stata irradiata è:

$$A(t_{irr}) = R \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t_{irr}}{t_{1/2}}}\right)$$

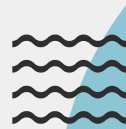
dove t_{irr} è il tempo di irraggiamento, $t_{1/2}$ è il tempo di dimezzamento e R è il rate di cattura per i neutroni.



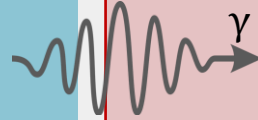
Picco di risonanza che si trova nel range epitermico

Come funziona?

Lamine attivate
con sezione
d'urto nota



n



γ

Spettrometria γ

$$n_{\gamma}(E) \propto n_n(E)$$

Calibrazione in:

- **Energia**
- **Efficienza**

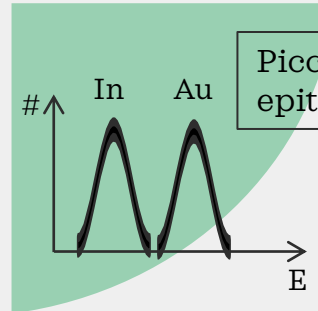
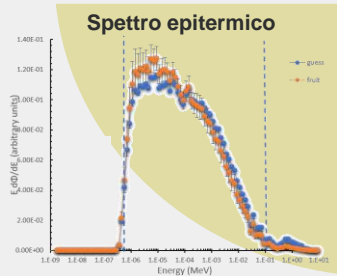
Questa tesi



- Associare il **picco**
- Misurare l'**attività**

Attività

Unfolding



Picchi in range
epitermico

Setup

Posizione:

- 2.0 ± 0.1 mm (a contatto)
- 20.0 ± 0.1 cm (a distanza)

- Dimensioni e densità

- Tempo di risposta

Detector

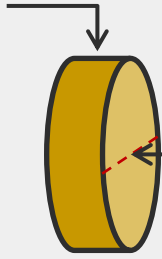
- Risoluzione energetica

- Efficienza nominale

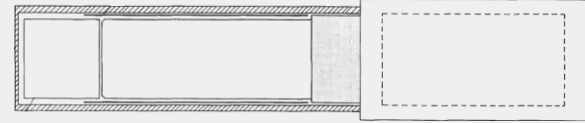
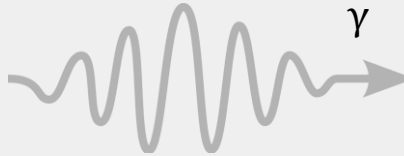
Spessore:
 $30 - 500 \mu\text{m}$



n



Diametro:
 $10 - 12.5$ mm



Attivazione

Spettroscopia γ

HPGe **vs** LaBr₃(Ce)



HPGe

~ 700 kg

	HPGe	LaBr ₃ (Ce)
Dimensioni	2" × 2"	1.5" × 1.5"
Densità [g/cm³]	5.35	5.29
Tempo di risposta [ns]	8 -10	26
Risoluzione energetica [% @ 662keV]	<0.3	<3
Efficienza rispetto a NaI[%]	20	40

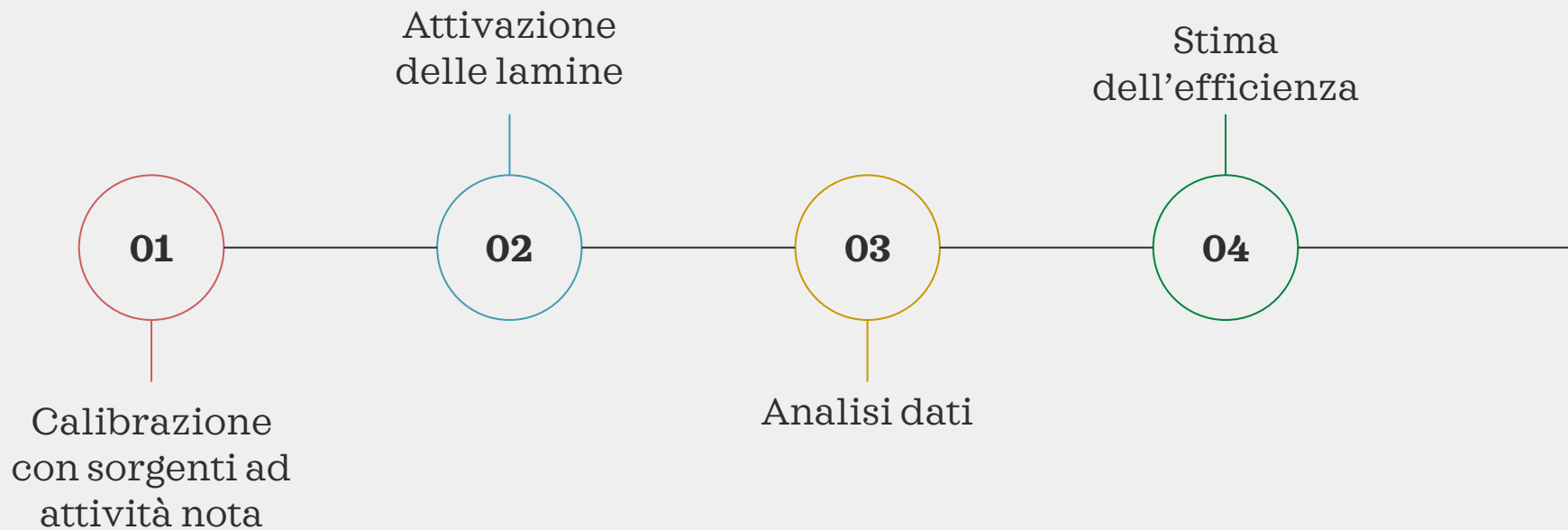


LaBr₃(Ce)

~ 3 kg

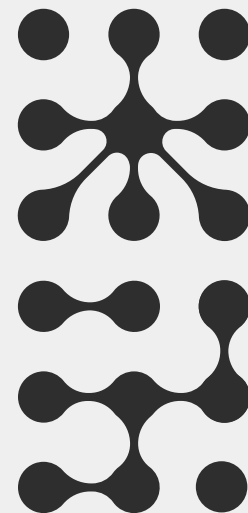
Questa tesi

STEP



01

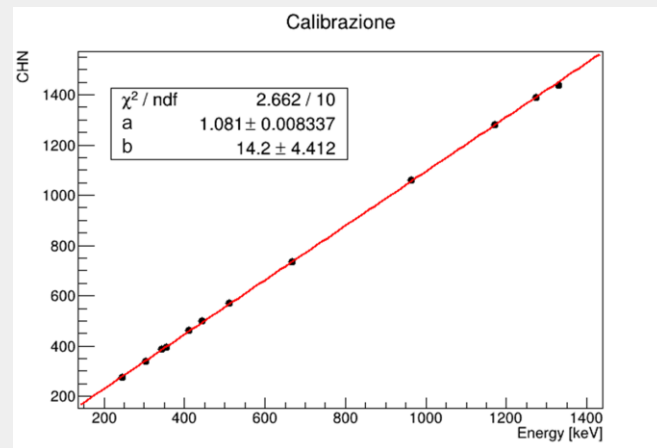
Calibrazione
con sorgenti ad
attività nota



Calibrazione in energia

- La calibrazione in energia è stata ricavata utilizzando sorgenti di attività nota poste a 20 cm dal rivelatore: ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{22}Na .

	CHN	Energia [keV]
^{152}Eu	276.0 ± 5.4	245
^{133}Ba	339.0 ± 5.8	303
^{152}Eu	387.0 ± 6.6	344
^{133}Ba	397.0 ± 6.5	356
^{152}Eu	462.0 ± 6.4	411
^{152}Eu	498.0 ± 7.3	444
^{22}Na	572.0 ± 8.3	511
^{137}Cs	736.0 ± 9.6	667
^{152}Eu	$(106.2 \pm 1.2) \cdot 10^1$	964
^{60}Co	$(127.9 \pm 1.4) \cdot 10^1$	1170
^{22}Na	$(138.9 \pm 1.5) \cdot 10^1$	1273
^{60}Co	$(143.9 \pm 1.5) \cdot 10^1$	1330



$$CHN = a \cdot E + b$$

$$a = (1.081 \pm 0.008) \text{ keV}^{-1}$$

$$b = (14.2 \pm 4.4)$$

Calibrazione in efficienza

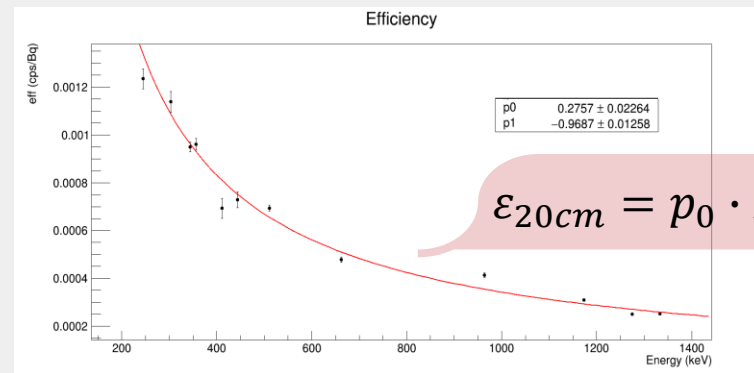
- L'efficienza ε del detector si stima a partire dall'efficienza ε_{20cm} moltiplicata per un fattore di scala F_{scala} :
$$\varepsilon = \varepsilon_{20cm} \cdot F_{scala}$$

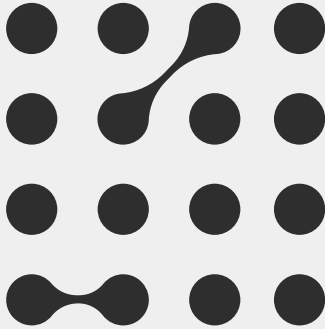
- L'efficienza ε_{20cm} è:

$$\varepsilon_{20cm} = \frac{cps}{A \cdot BR}$$

dove cps sono i conteggi al secondo, A si riferisce all'attività stimata della sorgente durante la misura e BR è il *Branching Ratio*.

	Attività nota A_0 [kBq]	$t_{1/2}$ [anni]
^{133}Ba	37.00 ± 0.01 @ 15/04/2004	10.51
^{60}Co	18.50 ± 0.01 @ 30/01/2018	5.27
^{137}Cs	19.80 ± 0.01 @ 01/07/2017	30.07
^{152}Eu	6.34 ± 0.10 @ 05/07/2022	13.54
^{22}Na	120.99 ± 0.01 @ 08/02/2018	2.60



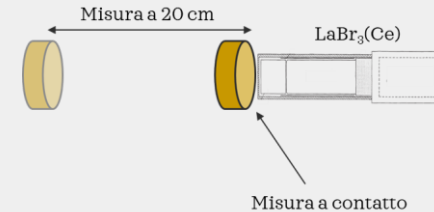


Attivazione delle
lamine

Attivazione delle lamine

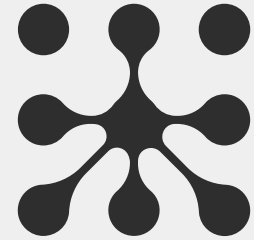


- Le lamine Au, Cu, In, Mn, NaCl, V sono state irradiate al **reattore** del **LENA** di Pavia;
- Il tempo di irraggiamento (30 - 160 s) è stato regolato in modo da evitare un alto *dead time* del rivelatore (<3%);
- Grazie all'elevata attività delle lamine è stato possibile acquisire le misure a distanza di 20 cm dal detector (vale l'approssimazione sorgente puntiforme), oltre che a contatto.



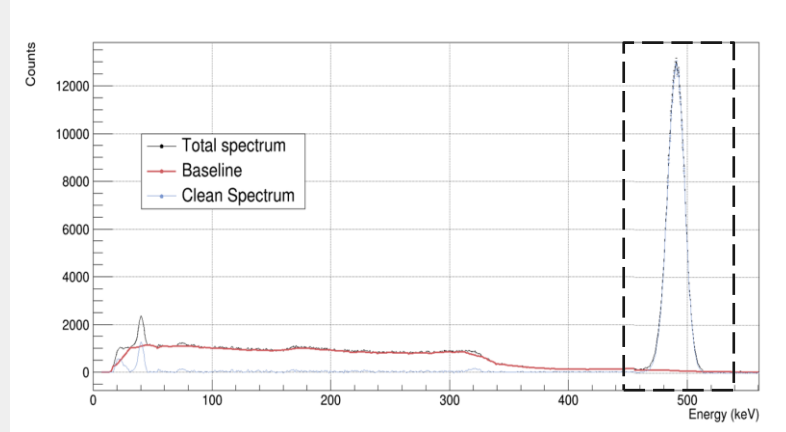
03

Analisi dati



Analisi dati

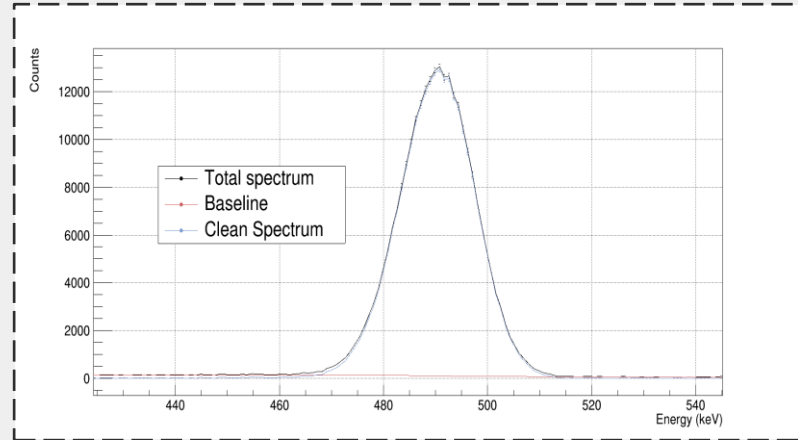
- Step 1: Si utilizza l'algoritmo SNIP per ricavare la **Baseline** partendo dallo spettro totale.
- Step 2: Da (*Spettro totale* - **Baseline**) si ricavano i conteggi su cui applicare il fit gaussiano.



Spettro del Cu in seguito all'applicazione di SNIP

Analisi dati

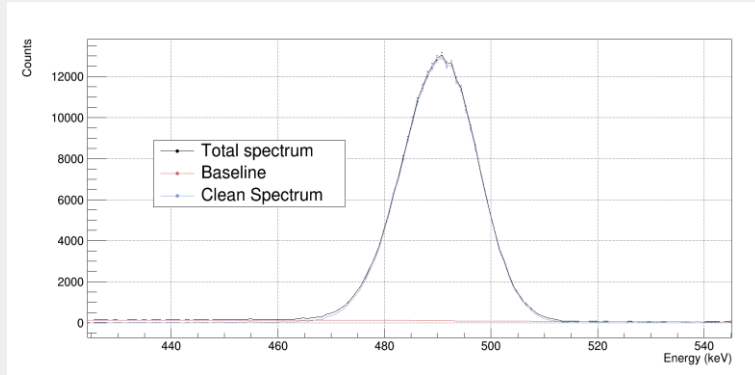
- Step 1: Si utilizza l'algoritmo SNIP per ricavare la **Baseline** partendo dallo spettro totale.
- Step 2: Da (*Spettro totale* - **Baseline**) si ricavano i conteggi su cui applicare il fit gaussiano.



Spettro del Cu in seguito all'applicazione di SNIP

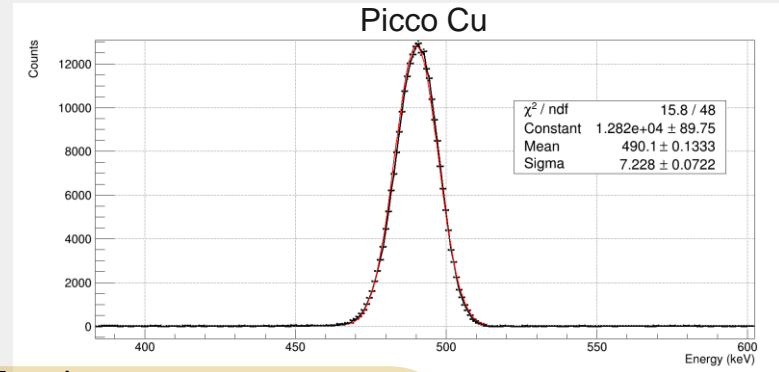
Analisi dati: fit gaussiano

Step 1



Da (*Spettro totale* - *Baseline*) si ricavano i valori del picchi su cui applicare il fit Gaussiano. Il test del χ^2 è superato con un livello di significatività del 5%.

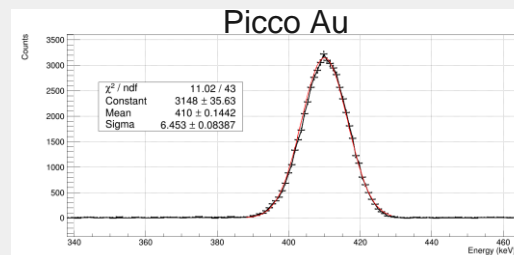
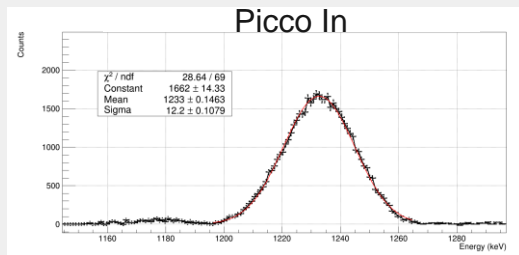
Step 2



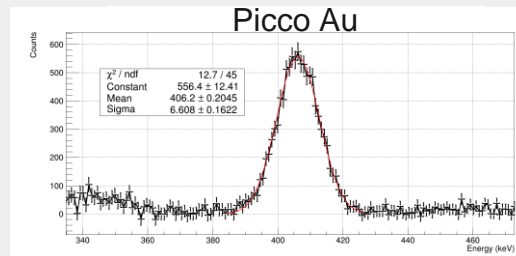
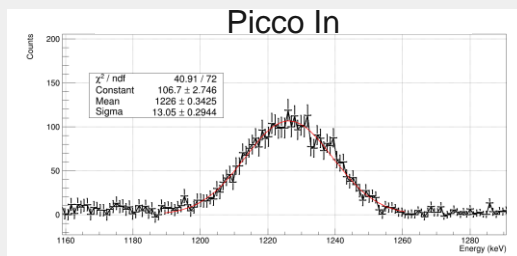
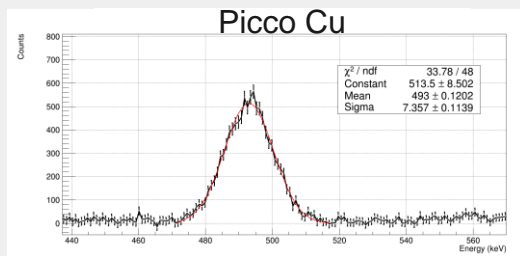
● Lamina posta a contatto

Analisi dati: tutti i plot

Lamine poste a contatto

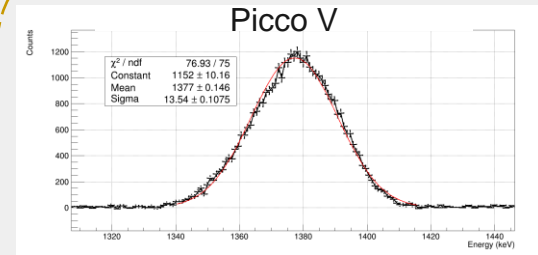
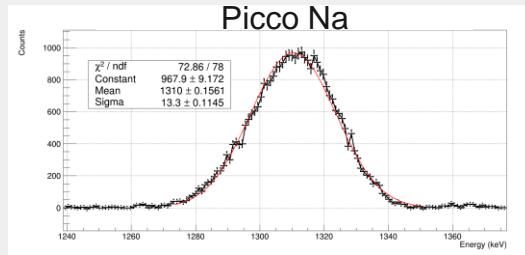
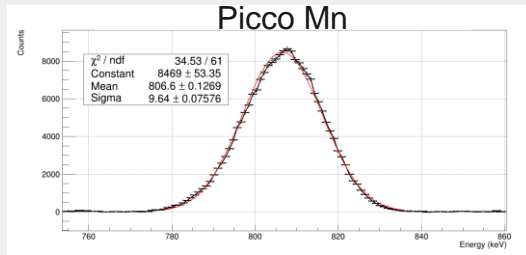


Lamine poste a 20 cm

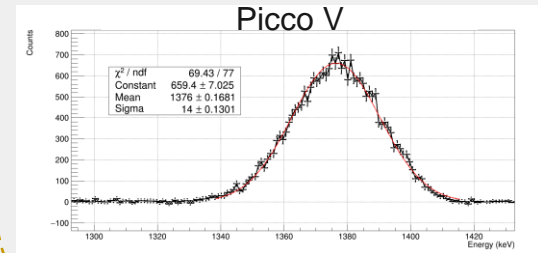
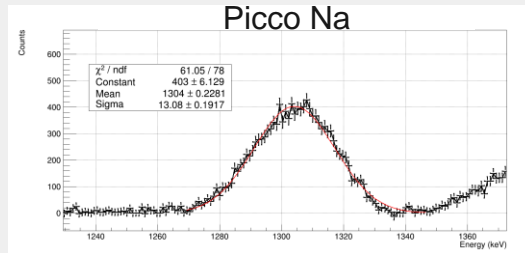
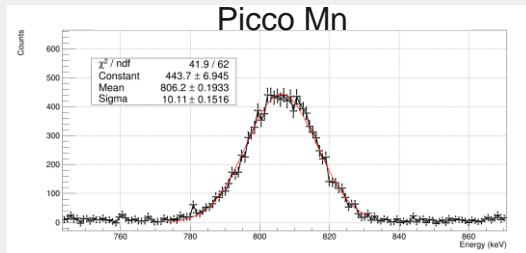


Analisi dati: tutti i plot

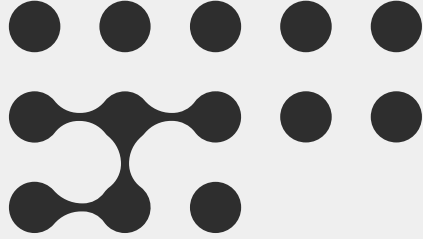
Lamine poste a contatto



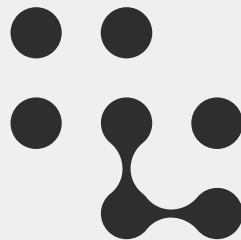
Lamine poste a 20 cm



Il picco del V si sovrappone al picco intrinseco del La. Per questo motivo dal fit gaussiano è stato eliminato il picco intrinseco del La



Stima dell'efficienza



Fattore Geometrico ed Efficienza

- Dalle misure dell'attività di saturazione delle lamine si ricava il *Fattore di scala*, F_{scala} , come il rapporto tra quella ricavata a contatto e quella a 20 cm.

	F_{scala}	Incertezza
Au	126.2	5.0
Cu	104.8	3.3
In	87.2	3.2
Mn	97.4	4.3
Na	98.4	1.0
V	106.6	2.3

- Dalla relazione:

$$\varepsilon = \varepsilon_{20\text{cm}} \cdot F_{\text{scala}}$$

si può determinare l'efficienza del detector a contatto.

Ricavata precedentemente con la calibrazione in efficienza del LaBr_3

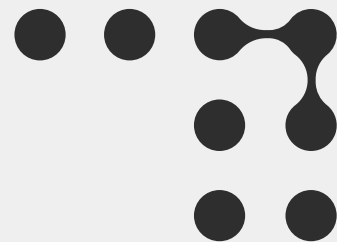
La conoscenza di questa efficienza sarà determinante per future misure di attivazione.



Conclusioni

- ✓ Calibrazione in Energia a partire da sorgenti di attività nota posizionate a distanza;
- ✓ Calibrazione in Efficienza ricavata come prodotto di $\epsilon_{20\text{cm}}$ e F_{scala} , stimato attraverso l'analisi di lamine attivate;
- ✓ Il LaBr₃(Ce) è un detector adeguato con un'accuratezza entro il 5% per le misure d'interesse;

Lo **strumento** è, quindi, **pronto** ad essere usato per ottenere lo spettro di neutroni epitermici per BNCT.



Grazie per
l'attenzione





SNIP

Sensitive **N**on-linear
Iterative **P**eak

01

Applica l'**operatore LLS** ai conteggi del canale i-esimo:

$$v(i) = \log \left\{ \log \left[\sqrt{y(i)} + 1 \right] + 1 \right\}$$

dove $y(i)$ rappresenta il valore dei conteggi del canale i-esimo.

Questo operatore consente di lavorare con dati che spazzano vari ordini di grandezza e la radice quadrata permette di esaltare anche i picchi più bassi

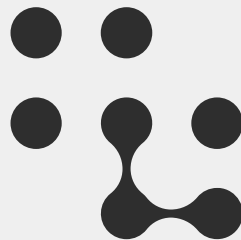
02

Da $v(i)$ calcola **step by step** $v_1(i)$, $v_2(i)$, ..., $v_m(i)$, dove m è scelta a partire da $2m+1 = w$, ovvero dalla dimensione della finestra su cui agisce SNIP. Il nuovo valore del canale i alla p -esima iterazione è:

$$v_p(i) = \min \left\{ v_{p-1}(i), \frac{1}{2} [v_{p-1}(i+p) + v_{p-1}(i-p)] \right\}$$

03

Infine dopo aver stimato $v_m(i)$ applica l'**operatore LLS inverso** e in questo modo si ricava lo spettro della baseline



Confronto Attività

- Dall'efficienza a contatto del $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ è stato possibile ricavare misure di *Attività* per alcune lamine irraggiate al **LINAC** di Torino.

	Attività HPGe [Bq/g]	Attività $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ [Bq/g]	Incertezza	Differenza [%]
Au	$2.67 \cdot 10^4$	$2.43 \cdot 10^4$	9%	9%
In	$7.47 \cdot 10^4$	$5.92 \cdot 10^4$	9%	21%
Cu	$5.62 \cdot 10^2$	$4.57 \cdot 10^2$	11%	19%
Mn	$2.94 \cdot 10^3$	$2.58 \cdot 10^3$	10%	12%
V	$9.9 \cdot 10^2$	$1.19 \cdot 10^3$	9%	20%

- Tenendo conto delle differenti condizioni di misura e di irraggiamento tra i due set di dati sperimentali, si ritiene che ci sia un **buon accordo tra i due rivelatori**.

Cos'è la BNCT?

La terapia si compone di due fasi:

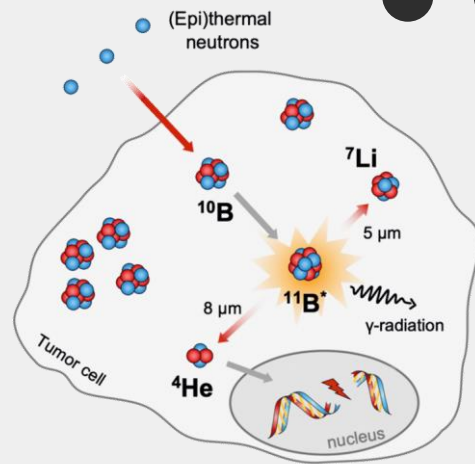
1. Al paziente viene somministrato del ^{10}B che tenderà a concentrarsi nelle cellule tumorali;
2. Il tumore viene irradiato con un fascio di neutroni epitermici:



Perderanno energia entro il
diametro della cellula tumorale



danni
irreversibili
alla struttura.



La terapia è altamente **selettiva** e permette di risparmiare i tessuti sani