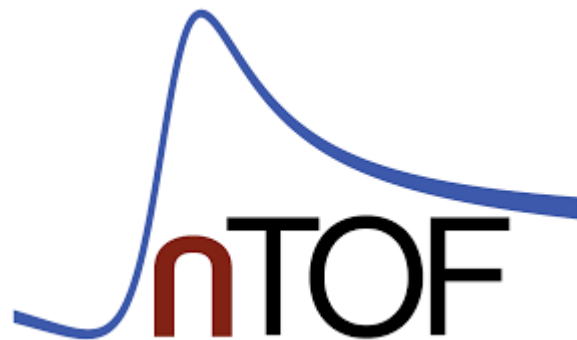




# *$^{12}\text{C}(n,p)$ con rivelatore GEMPIX*

*Gerardo Claps*

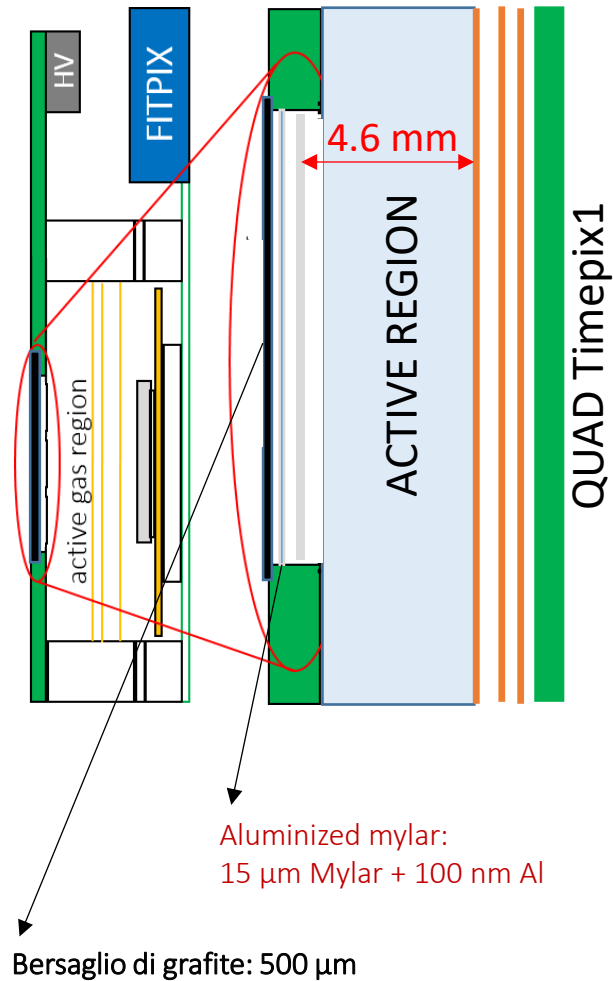
*INFN - LNF & ENEA Frascati*

*n\_TOF Italy Meeting  
29 Aprile 2025*

# *SOMMARIO*

- 1) *Riepilogo analisi dati con rivelatore GEMpix Head-On*
- 2) *Il rivelatore Side-on GEMpix e misure di caratterizzazione sulla sorgente HOTNES*
- 3) *Misure e risultati preliminari su  $n_{TOF}$  con GEMpix Side-on*
- 4) *Attività con QUAD Timepix3 a stato solido: misure su target e BNCT*

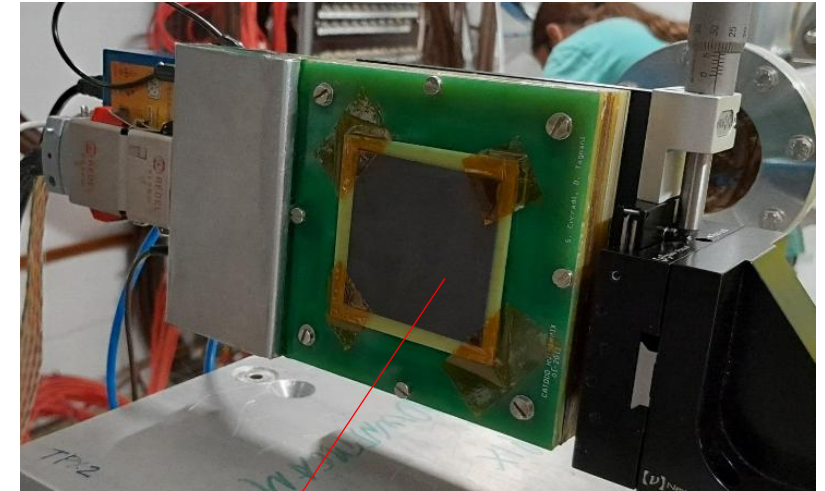
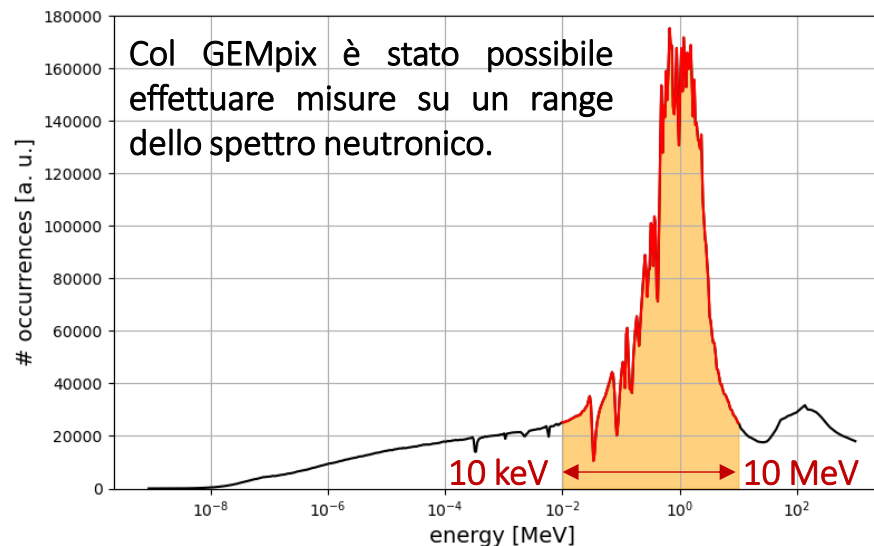
# 1. Head-on GEMpix @ $n\_TOF$ per la misura dei prodotti di reazione in EAR1 (Settembre 2023)



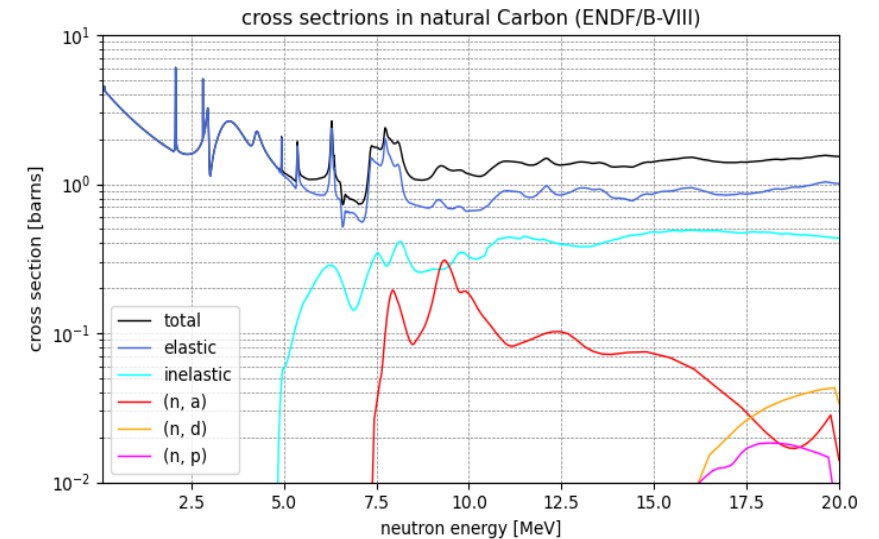
Risultati interessanti sono stati ottenuti nel range di energie neutroniche sotto a 10 MeV (fino a circa 10 keV).

Per le prime misure, è stata utilizzata una camera GEMpix standard (drift region 4.6 mm) e il bersaglio di carbonio è stato posizionato prima della finestra di mylar esternamente alla camera.

Non è stato possibile inserire il bersaglio di carbonio all'interno della regione attiva perché la camera è sigillata.

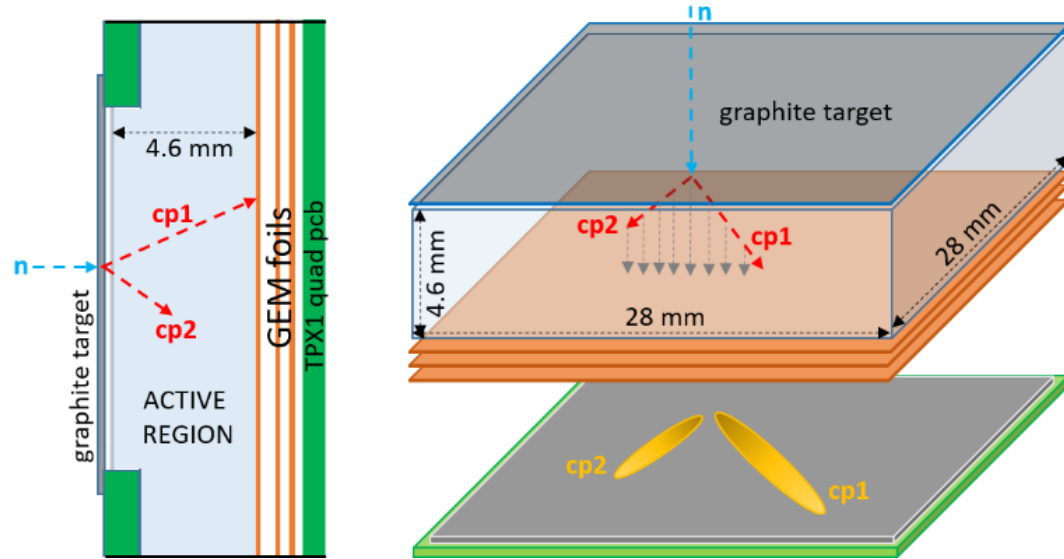


Bersaglio di grafite da 500 µm



Il range di energie si è mantenuto sotto ai 20 MeV dello spettro neutronico per evitare l'eccessivo pile-up delle tracce osservato a energie più alte.

# 1. GEMpix @ $n_{TOF}$ per la misura dei prodotti di reazione protoni, alpha e ioni per neutroni < 10 MeV (*Bersaglio di Carbonio*)



L'analisi di traccia è stata condotta tenendo conto dei seguenti parametri:

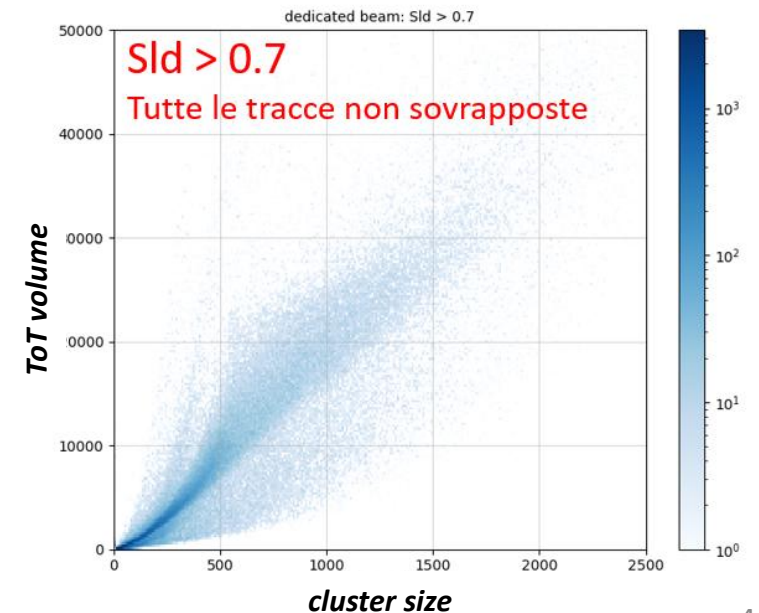
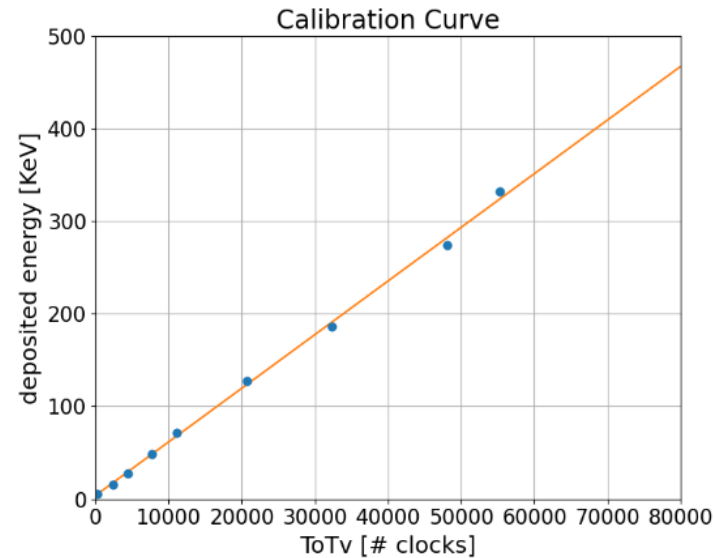
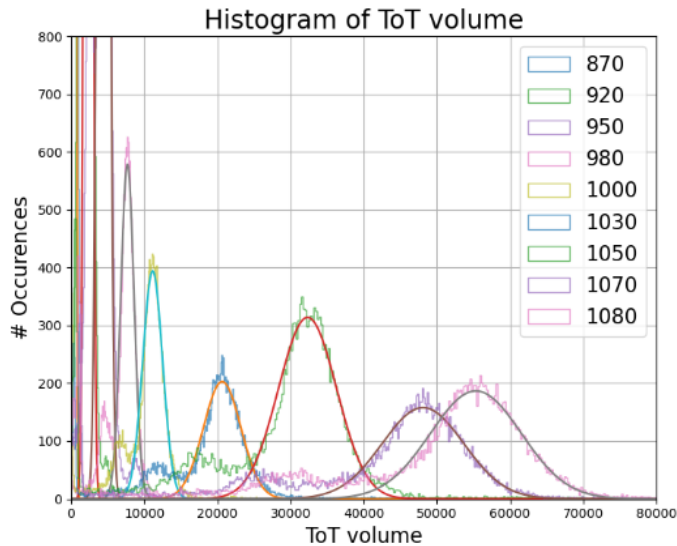
**Solidity parameter (Sld):** frazione tra cluster size e convex hull (ovvero il più piccolo insieme convesso che contiene la traccia). In questo modo le tracce sovrapposte possono essere escluse.

**Cluster Size:** somma dei pixel costituenti il cluster (dimensione del cluster)

**ToTv:** somma dei valori di ToT dei pixel costituenti il cluster (proporzionale alla carica rilasciata nel gas)

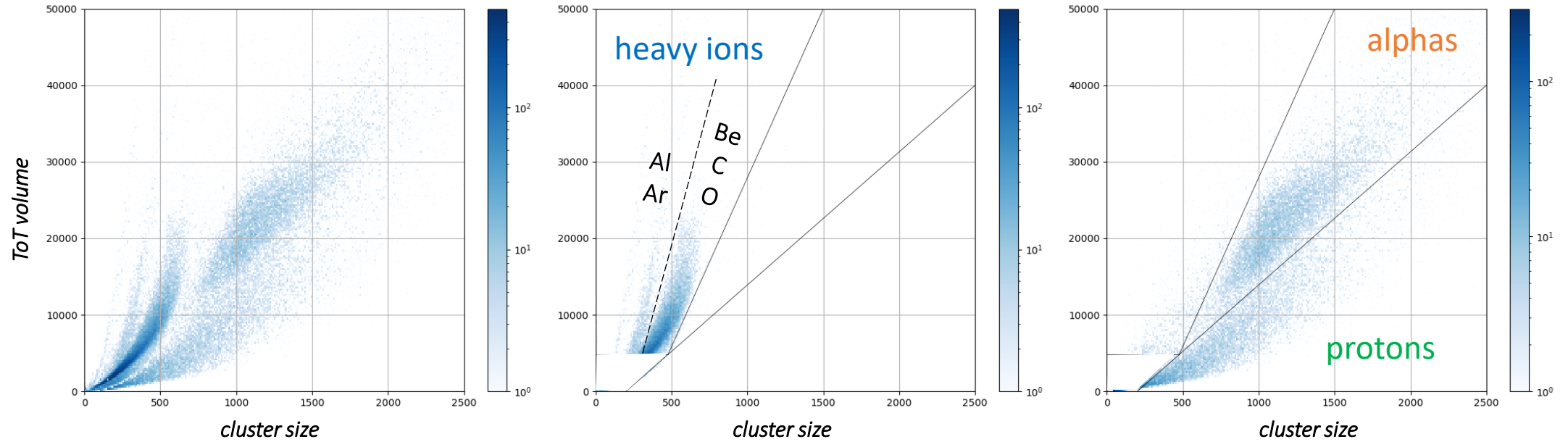
**Roundness (Rnd):** frazione tra Cluster Size e l'area della circonferenza di diametro pari alla distanza dei pixel più distanti nel cluster (consente di identificare i cluster di forma più circolare)

## Charge calibration in lab with $^{55}\text{Fe}$ X-ray source

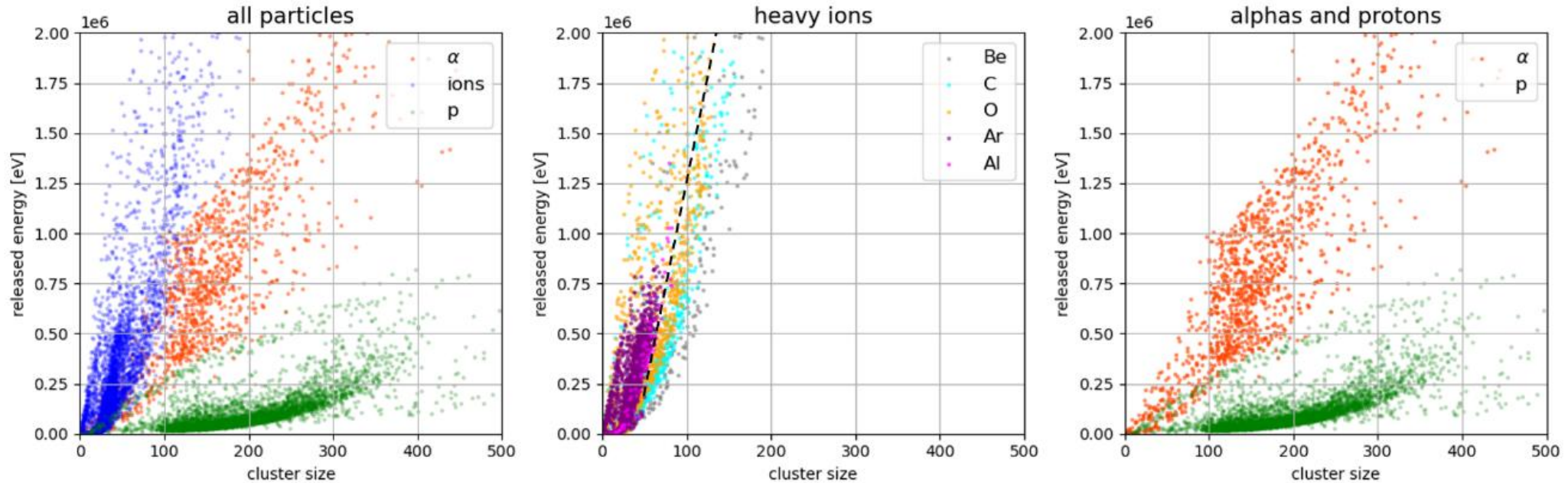


# 1. Head-on GEMpix @ $n_{TOF}$ per la misura dei prodotti di reazione per neutroni < 10 MeV (*Bersaglio di Carbonio*)

Risultati sperimentali



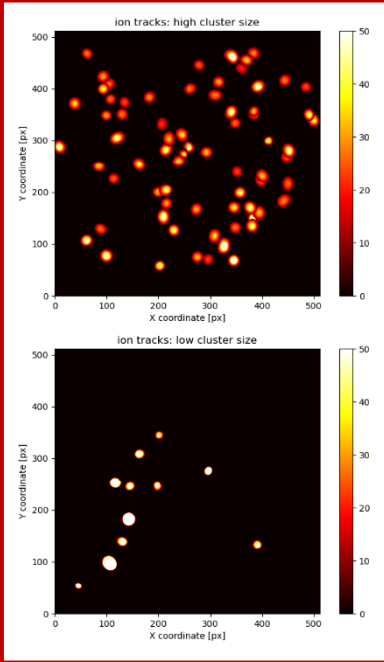
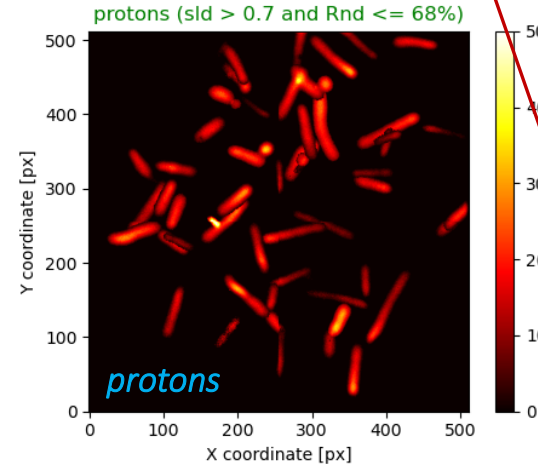
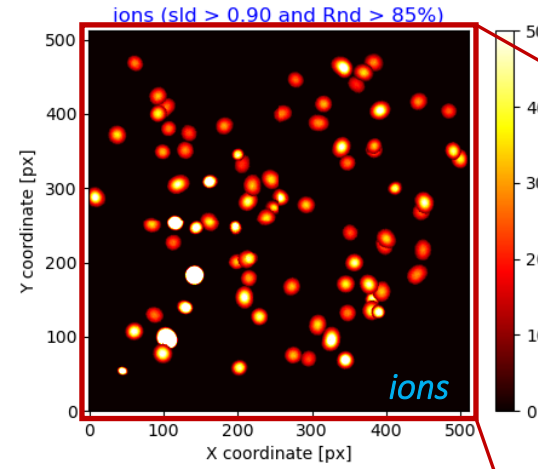
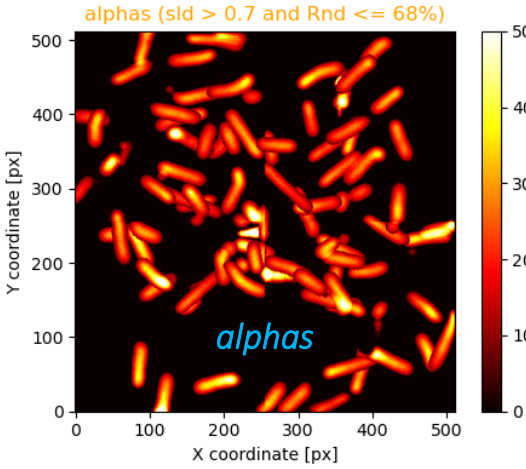
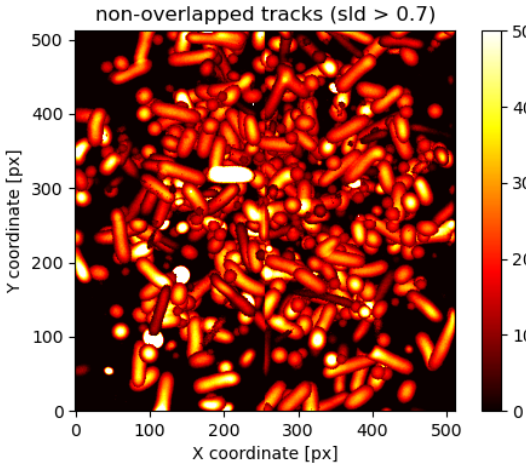
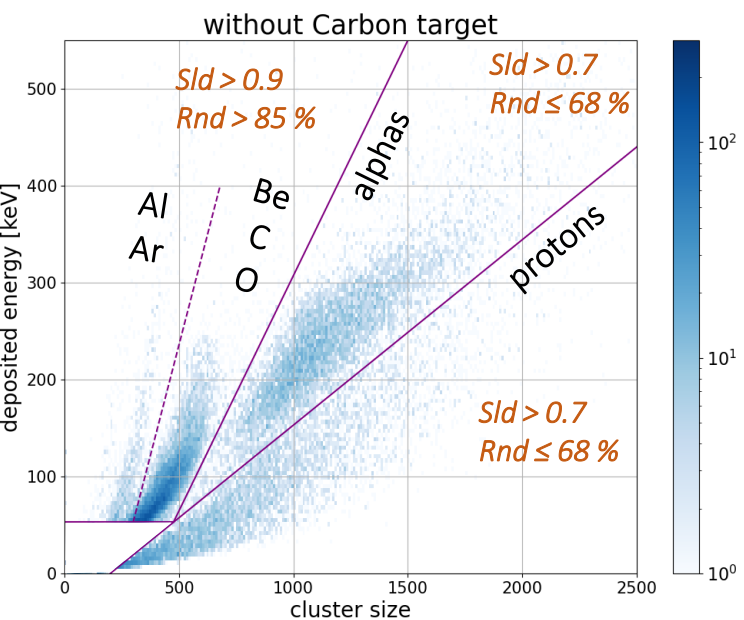
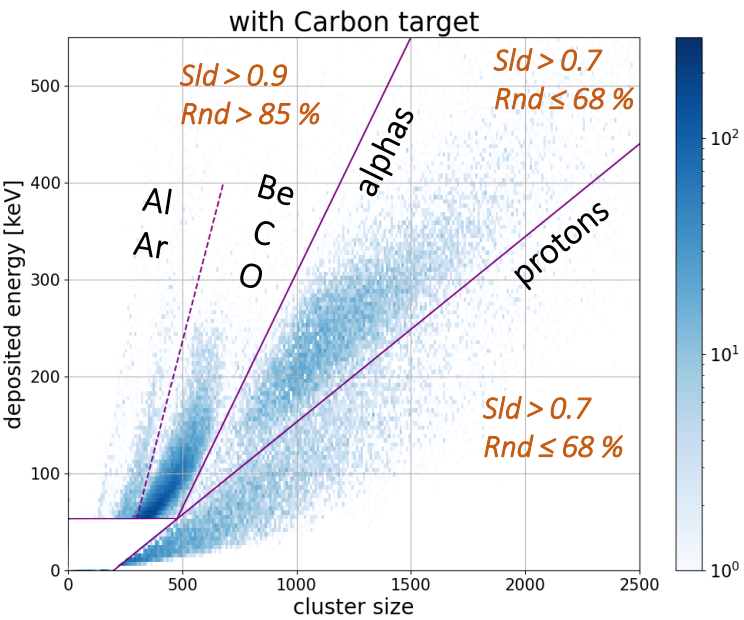
Simulazioni MC



# GEMpix @ n\_TOF per la misura dei prodotti di reazione protoni, alpha e ioni per neutroni < 10 MeV (*Bersaglio di Carbonio*)

con bersaglio di Carbonio

senza bersaglio di Carbonio

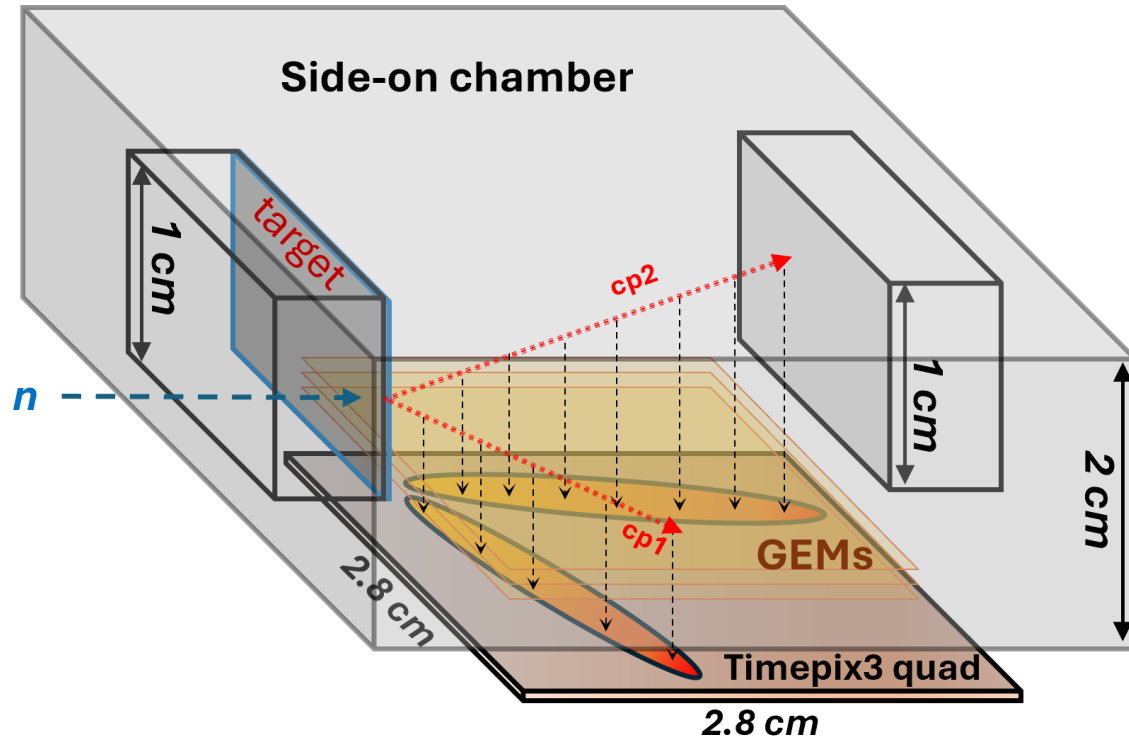


More than one ion population can be distinguished.

| graphite       | heavy ions [ $\times 10^3$ ] | protons [ $\times 10^3$ ] | alphas [ $\times 10^3$ ] | Total [ $\times 10^3$ ] |
|----------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| with target    | $14.4 \pm 0.1$               | $8.98 \pm 0.09$           | $12.2 \pm 0.1$           | $35.6 \pm 0.2$          |
| without target | $13.3 \pm 0.1$               | $8.52 \pm 0.09$           | $11.2 \pm 0.1$           | $33.0 \pm 0.2$          |
|                |                              |                           | + 8 %                    | + 8 %                   |

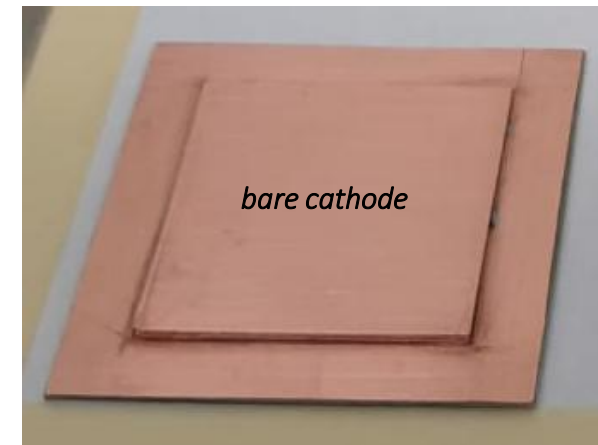
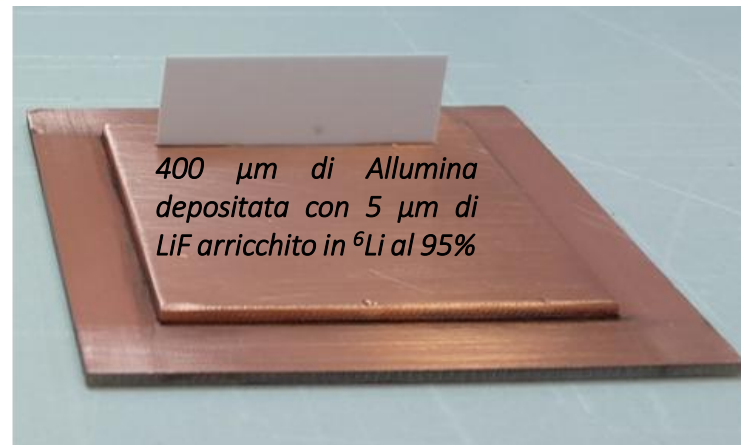
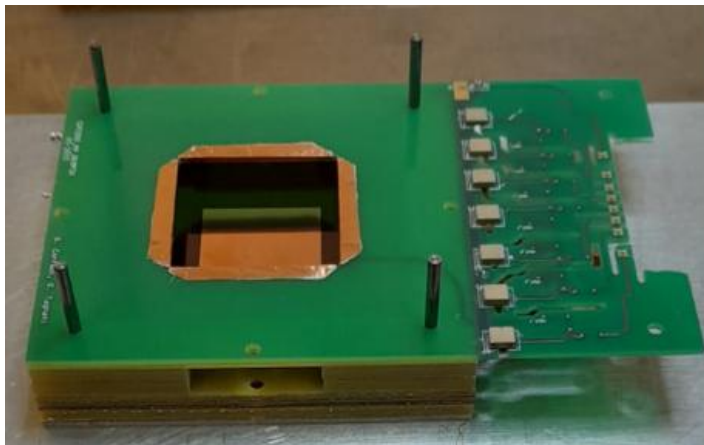
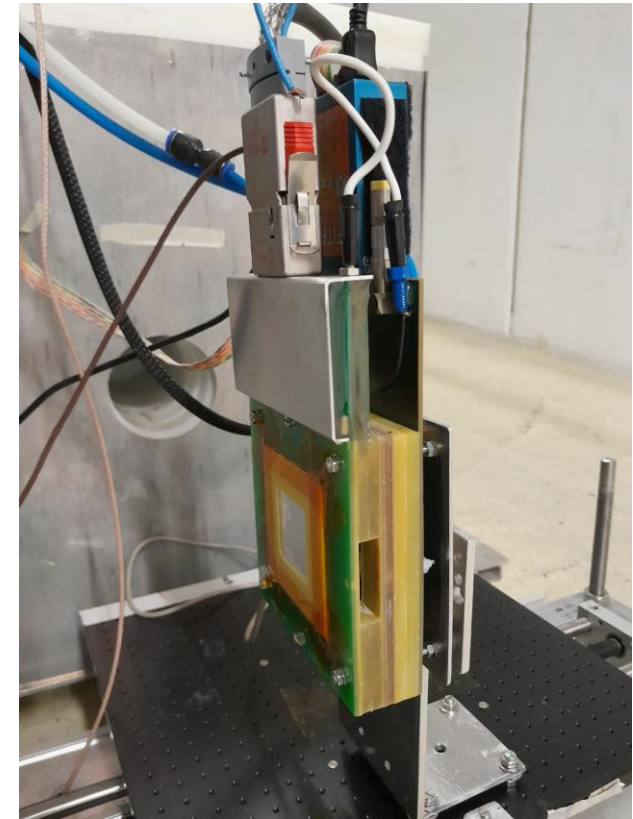
Con il target di carbonio, il **numero di particelle stimate** aumenta di circa **8 %** rispetto al background e l'energia minima stimata raggiunge valori inferiori a **0.1 MeV**.

## 2. Il rivelatore Head-on GEMpix con lettura TPX1 e bersagli interni



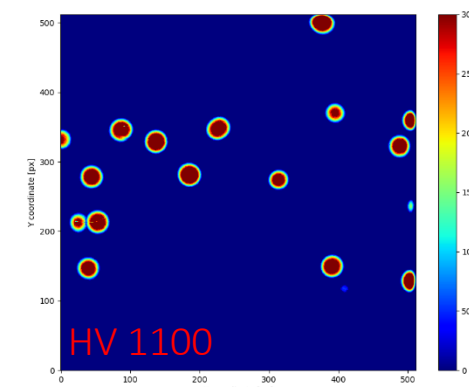
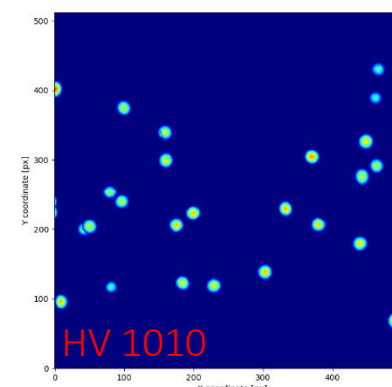
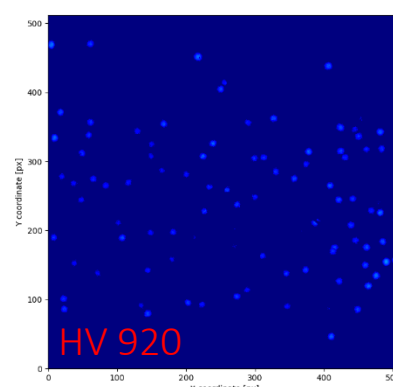
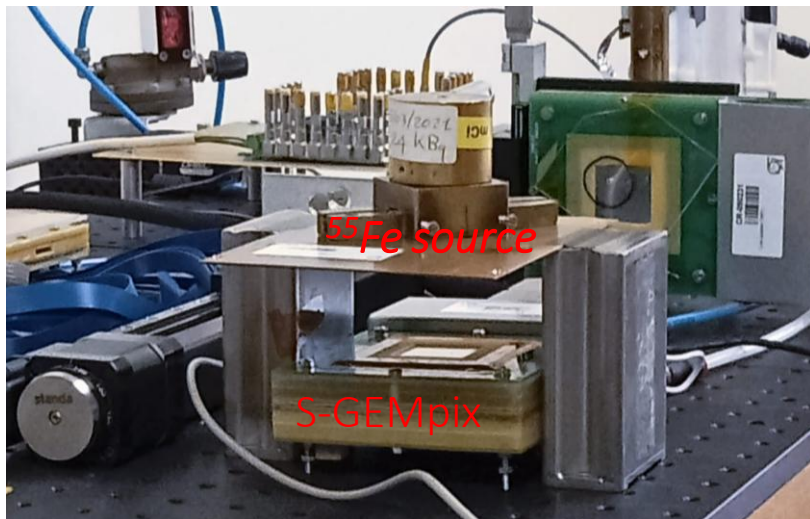
*Si è realizzata una camera GEMpix side-on con lettura TPX1.*

*Sono stati realizzati una serie di catodi in vetronite ramata con e senza target in modo da poterli sostituire completamente senza rimuovere il target.*



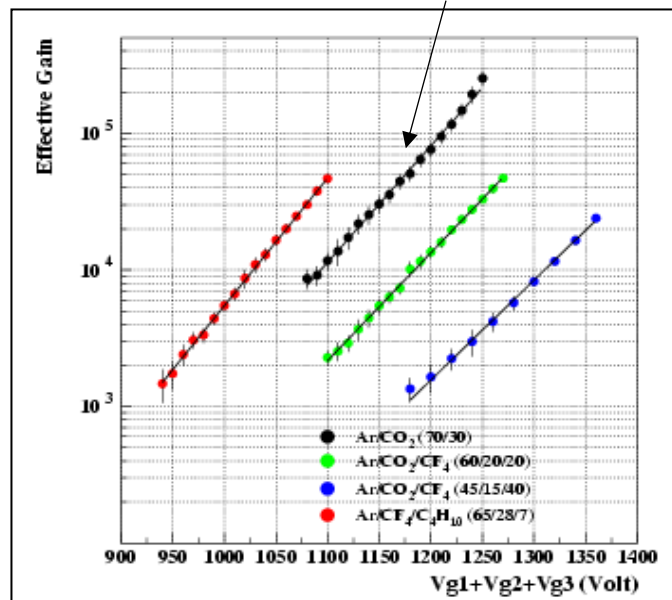
*Si ringrazia A. Vincenti (ENEA di Frascati) per le deposizioni LiF sui Allumina e Silicio.*

## 2. Il rivelatore Side-on GEMpix e misure di caratterizzazione sulla sorgente HOTNES

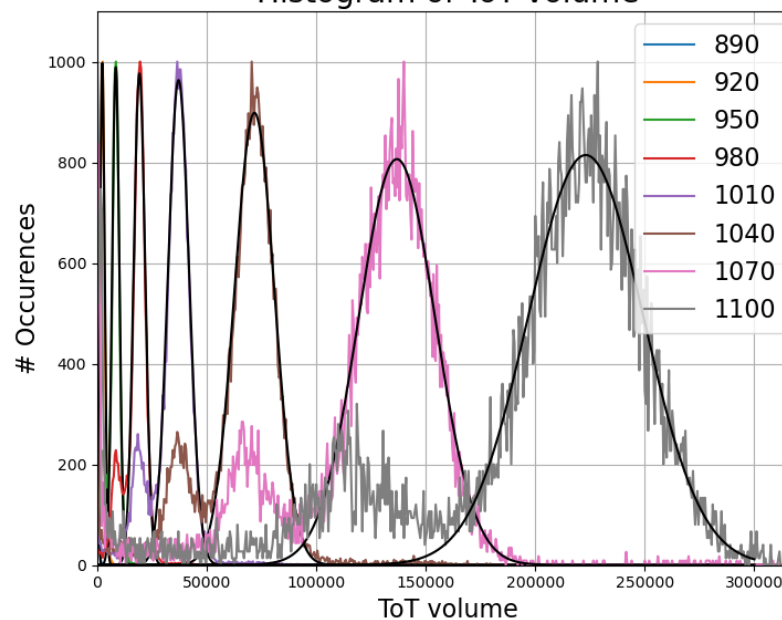


Utilizzando una sorgente di  $^{55}\text{Fe}$  ed effettuando uno scan in guadagno, si è effettuata una calibrazione in carica, utile per valutare le energie in gioco.

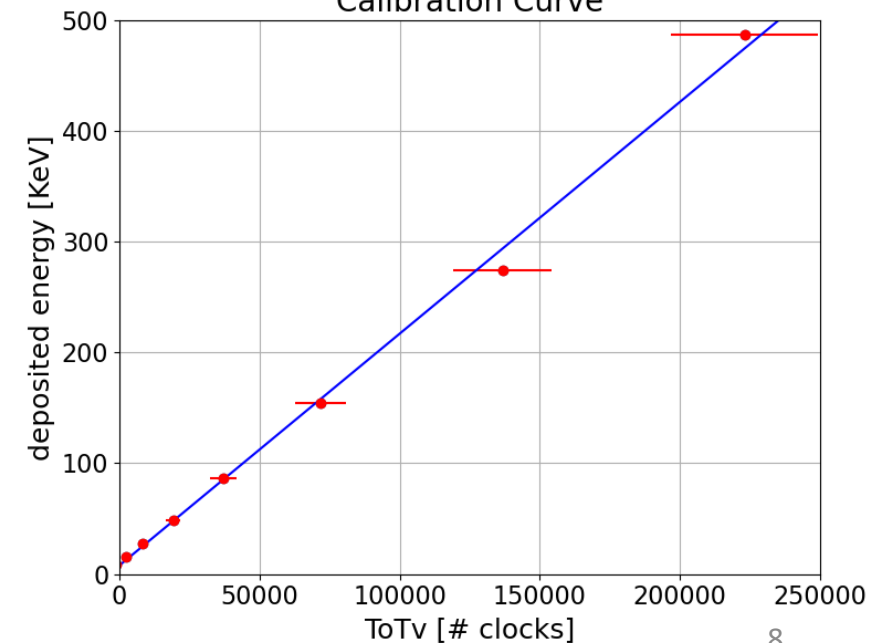
curva di guadagno di ArCO<sub>2</sub> (70/30)



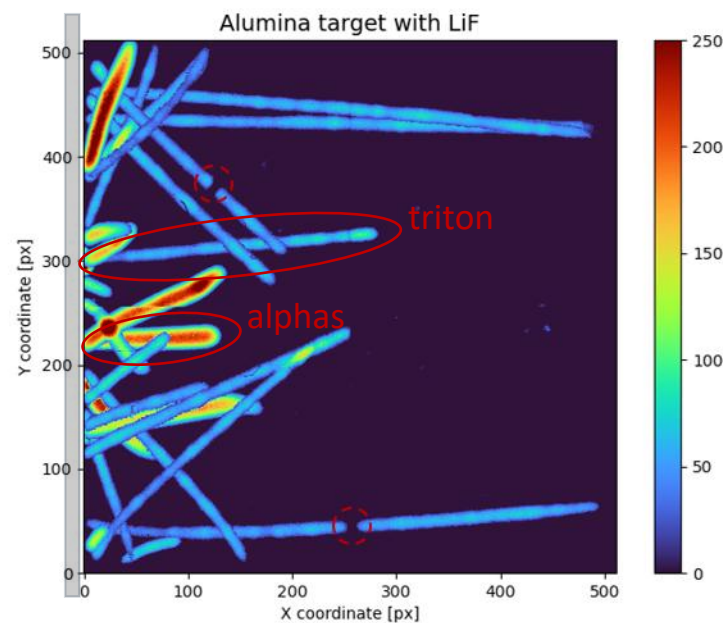
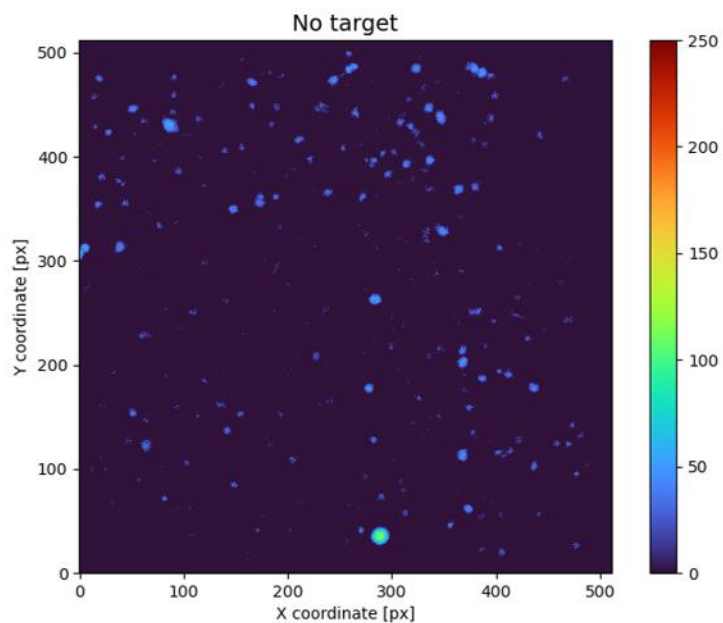
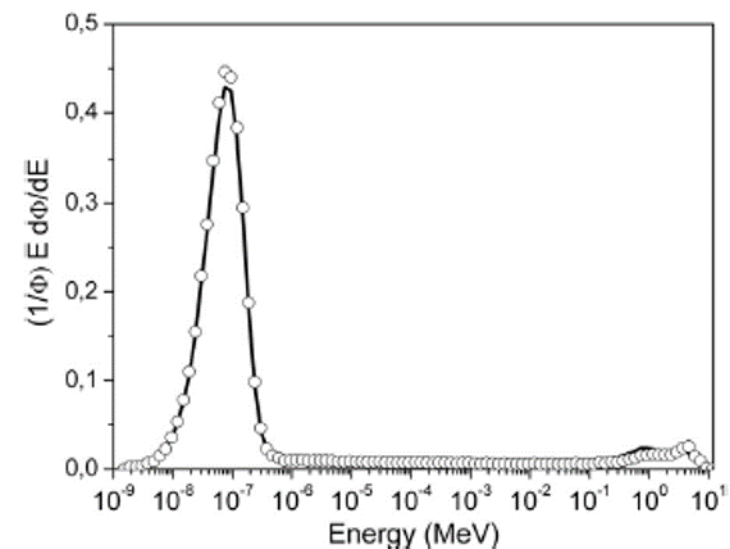
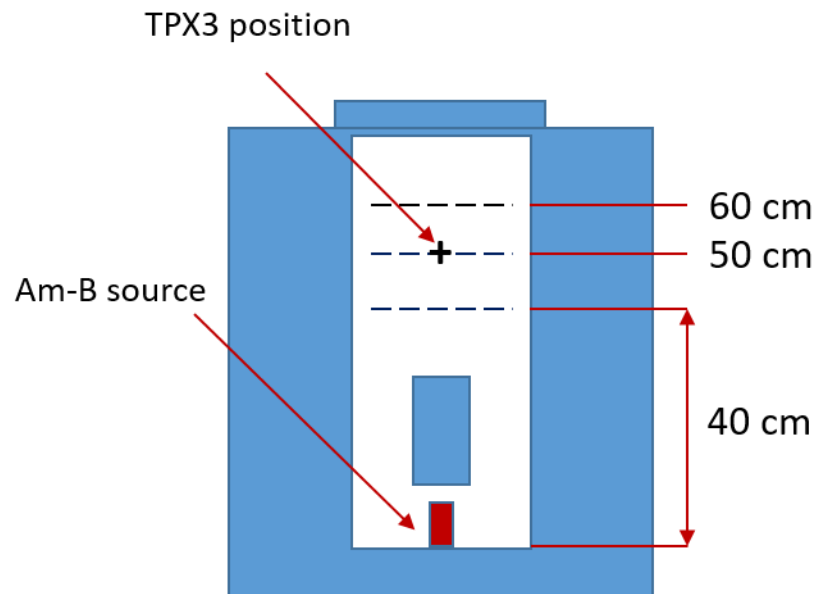
Histogram of ToT volume



Calibration Curve



## 2. Il rivelatore Side-on GEMPix e misure di caratterizzazione sulla sorgente HOTNES

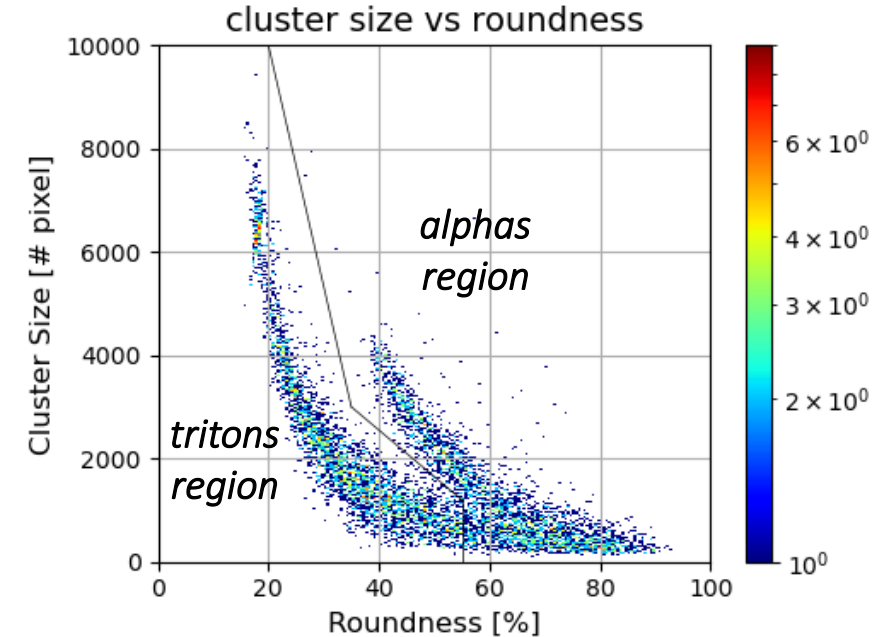
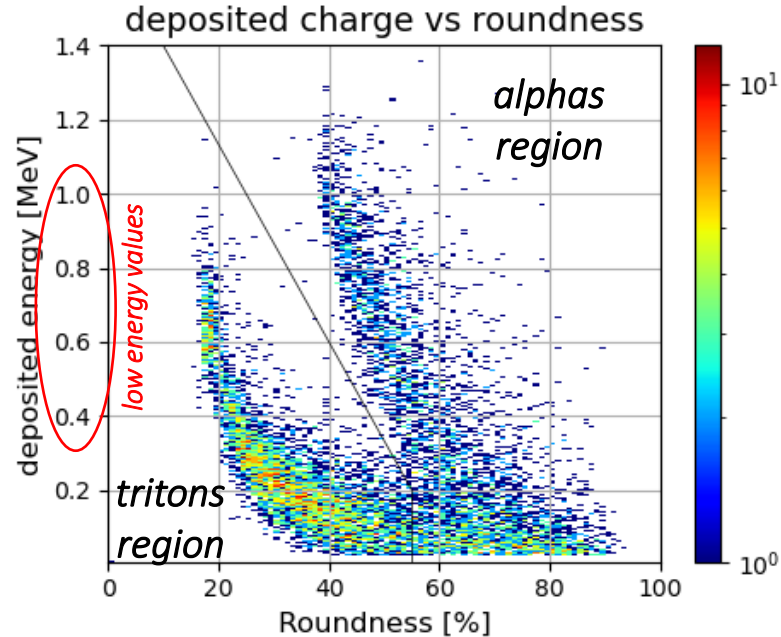
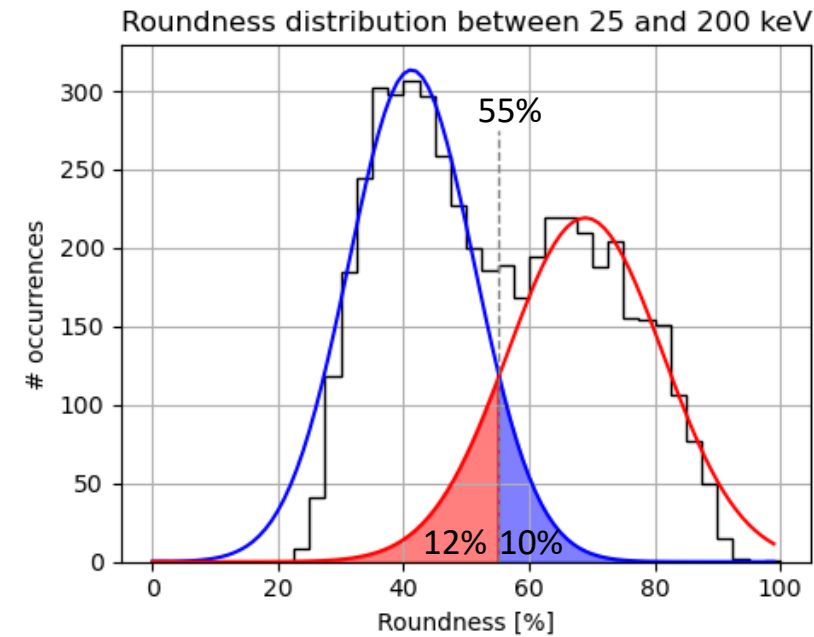
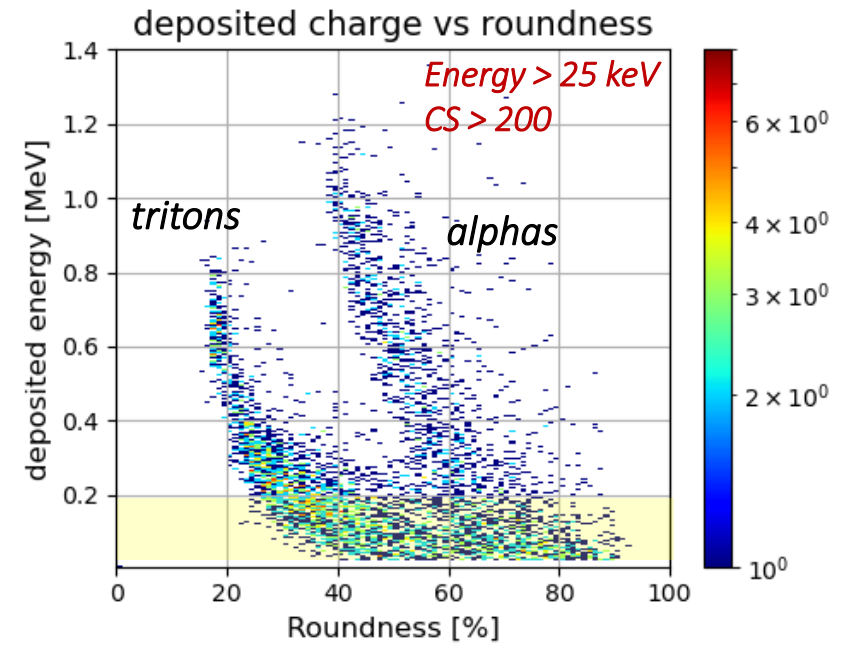
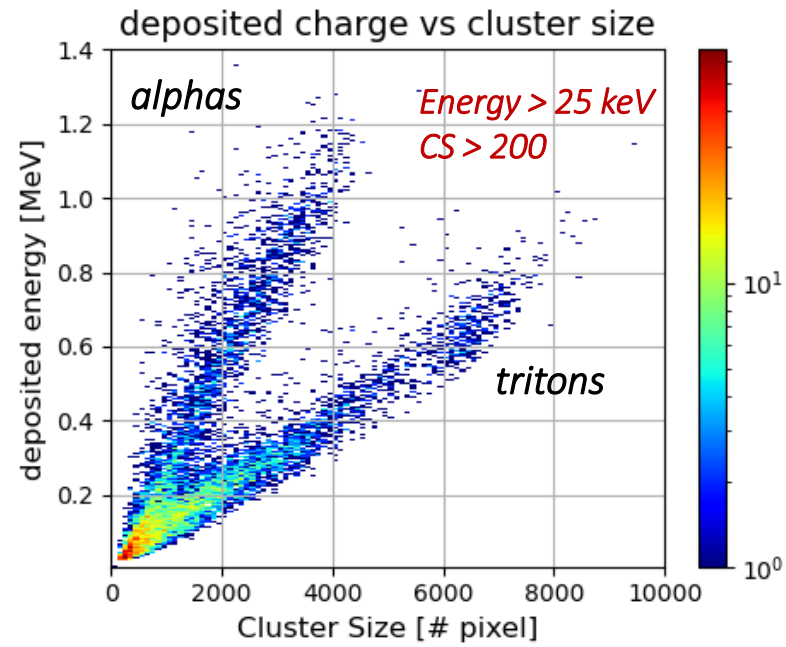
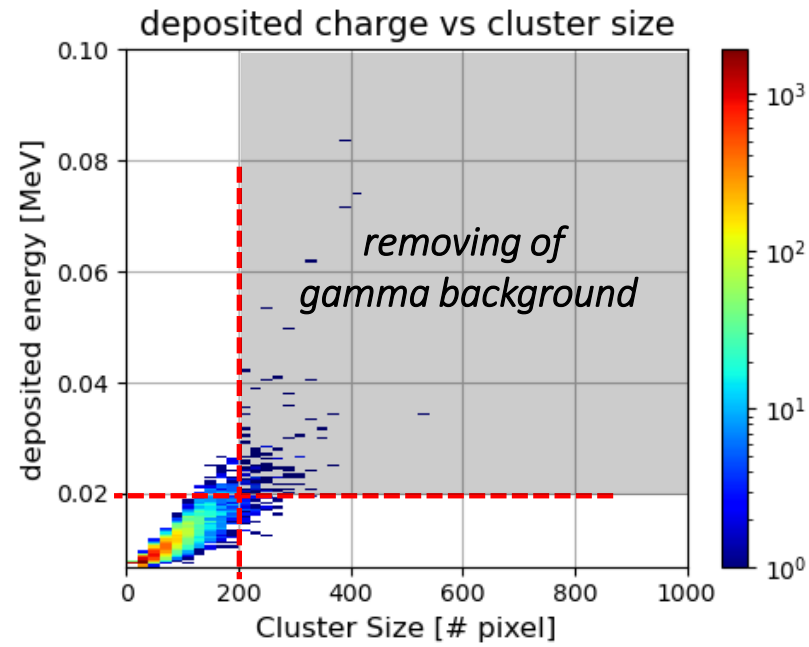


Anche per l'analisi di questi dati sono stati definiti i parametri: Solidity (*Sld*), Cluster Size, ToTv, Roundness (*Rnd*).

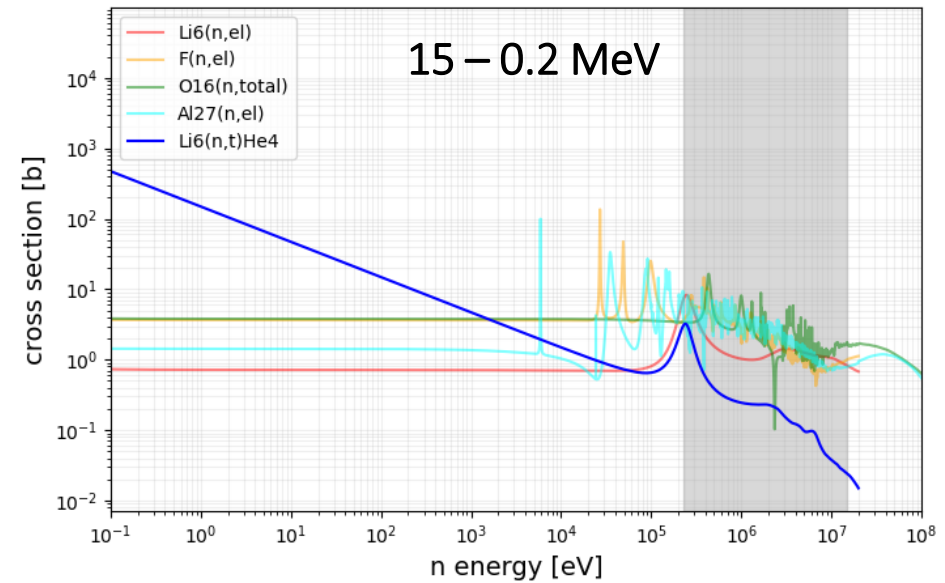
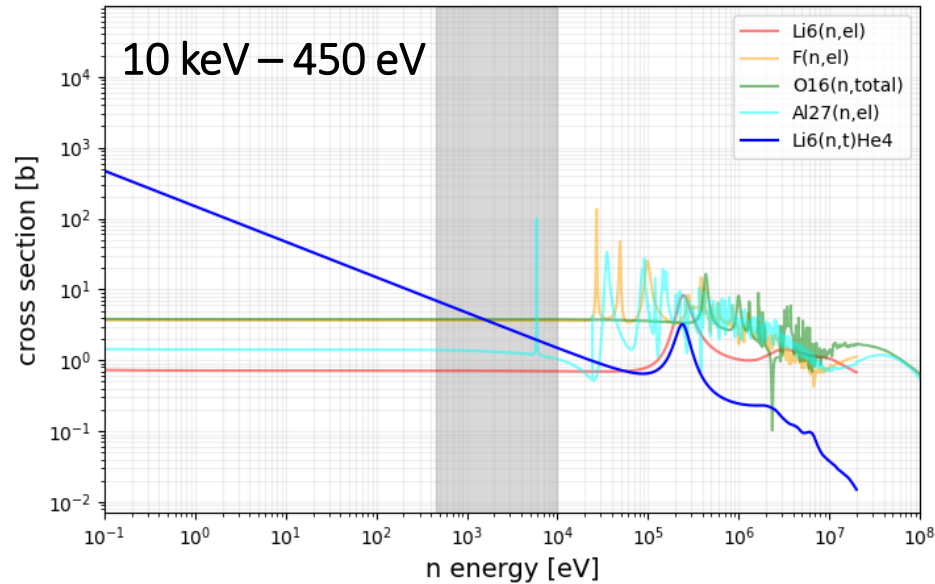
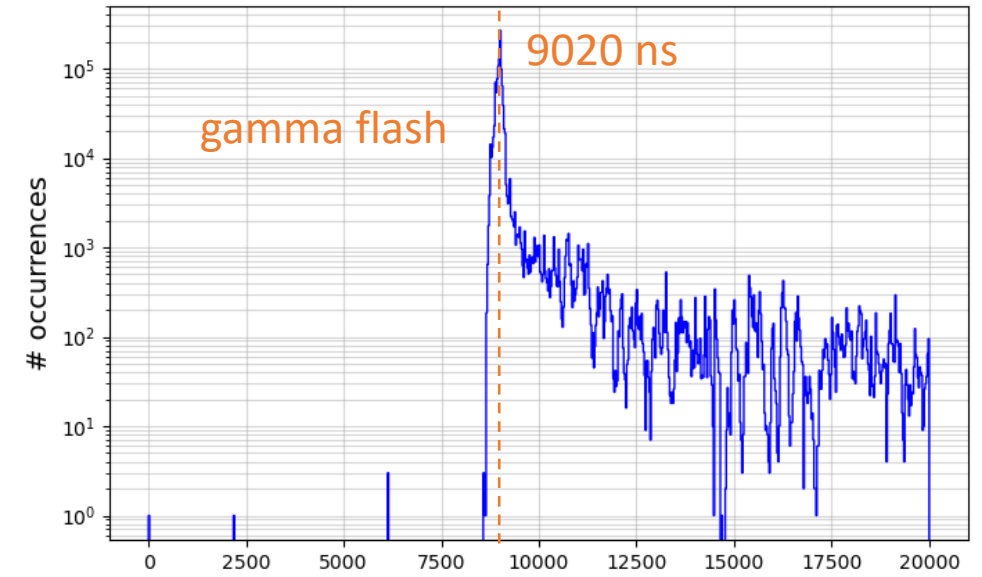
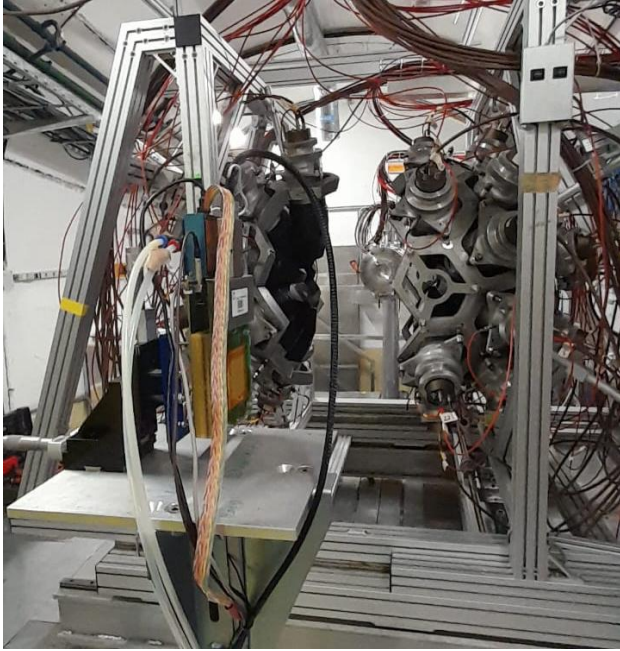
In più l'algoritmo ha tenuto presente di tracce discontinue applicando una operazione di closing.

Questa procedura consiste nel definire una regione circolare intorno a ogni pixel diverso da zero del cluster e verificare se altri pixel attivi rientrano in tale regione. Se due o più di tali regioni si sovrappongono o sono sufficientemente vicine, esse vengono fuse in un unico cluster collegato.

## 2. Il rivelatore Side-on GEMPix e misure di caratterizzazione sulla sorgente HOTNES



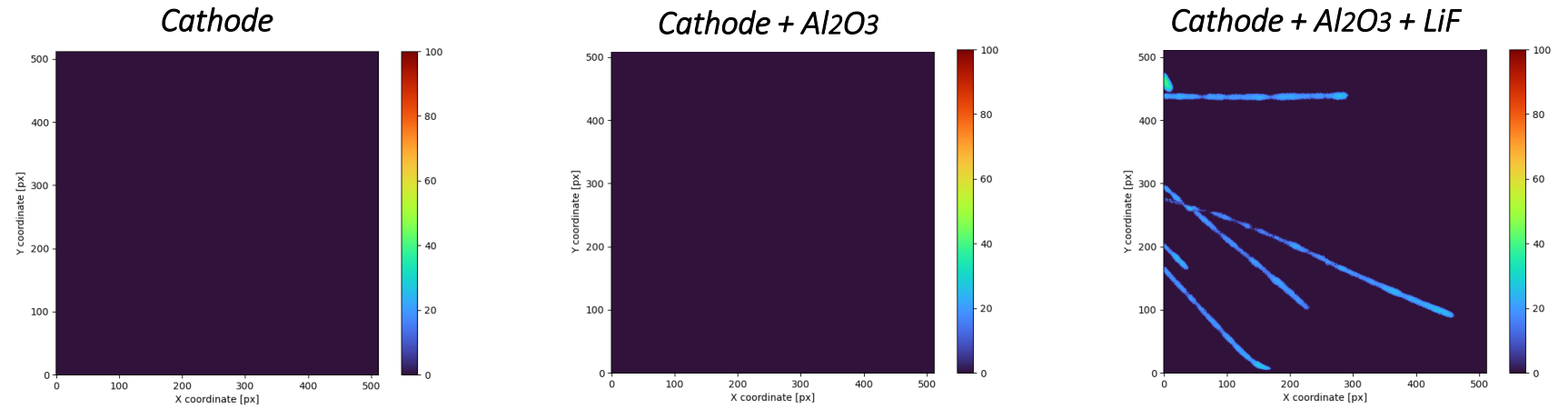
### 3. Misure e risultati preliminari su $n\_TOF$ con GEMpix Side-on



### 3. Misure e risultati preliminari su n\_TOF con GEMPix Side-on

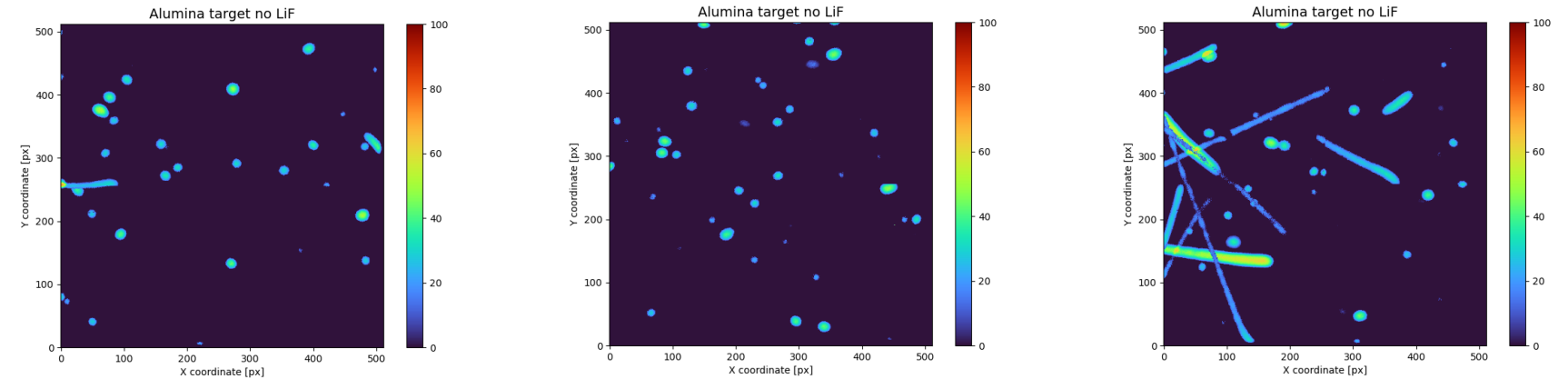
Softer delay: 143.6  $\mu$ s  
Time Acquisition window: 500  $\mu$ s

Energy Range: 14 keV – 450 eV



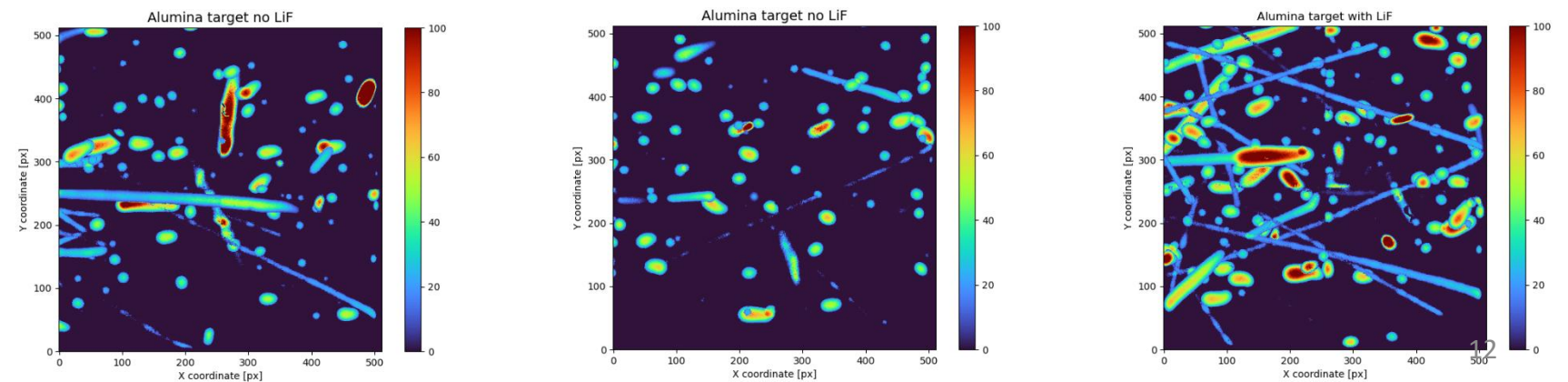
Softer delay: 21.9  $\mu$ s  
Time Acquisition window: 100  $\mu$ s

Energy Range: 1 MeV – 14 keV



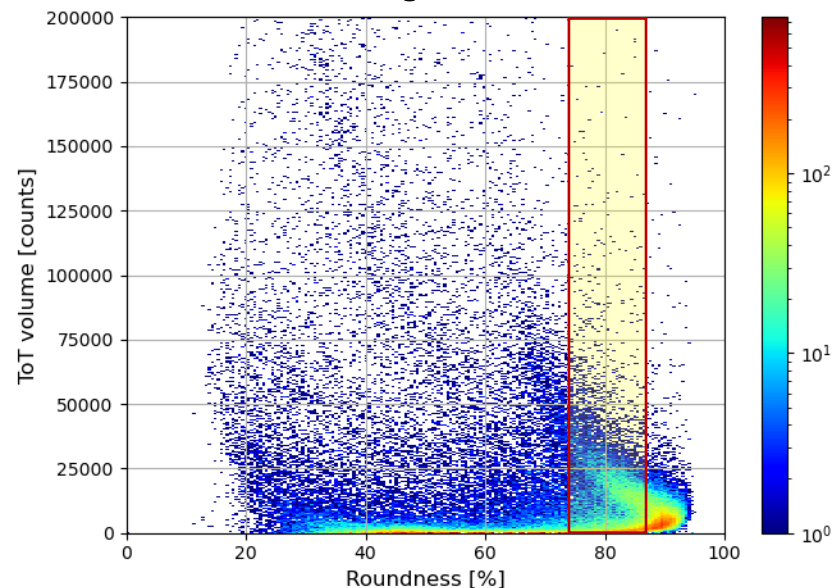
Softer delay: 11.9  $\mu$ s  
Time Acquisition window: 25  $\mu$ s

Energy Range: 15 MeV – 0.2 MeV

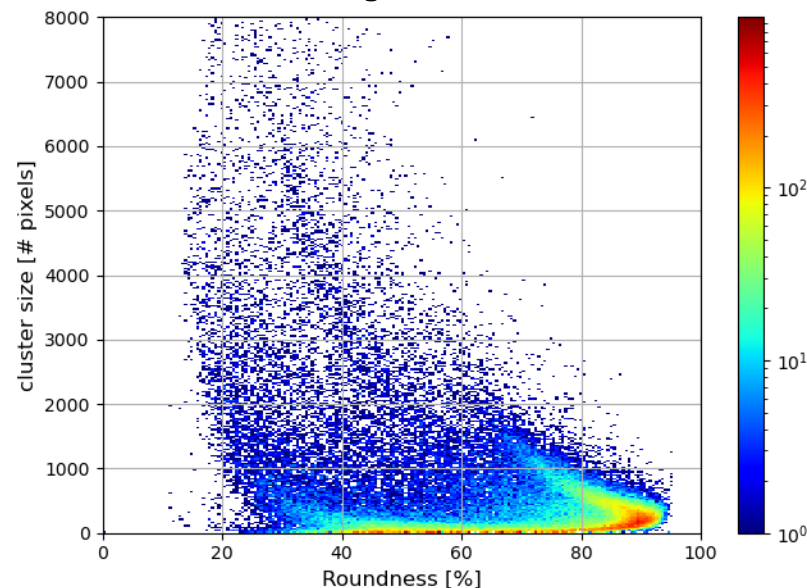


### 3. Misure e risultati preliminari su $n$ TOF con GEMPix Side-on

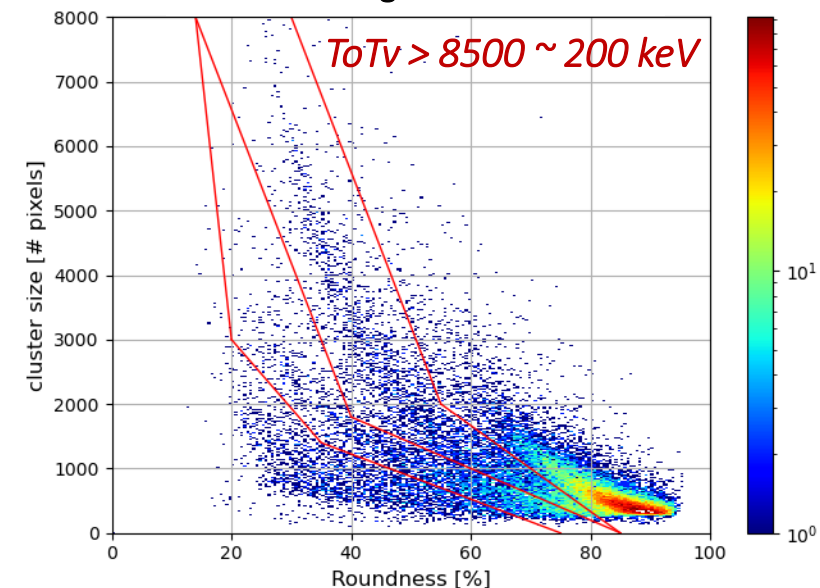
neutron energies 15 – 0.2 MeV



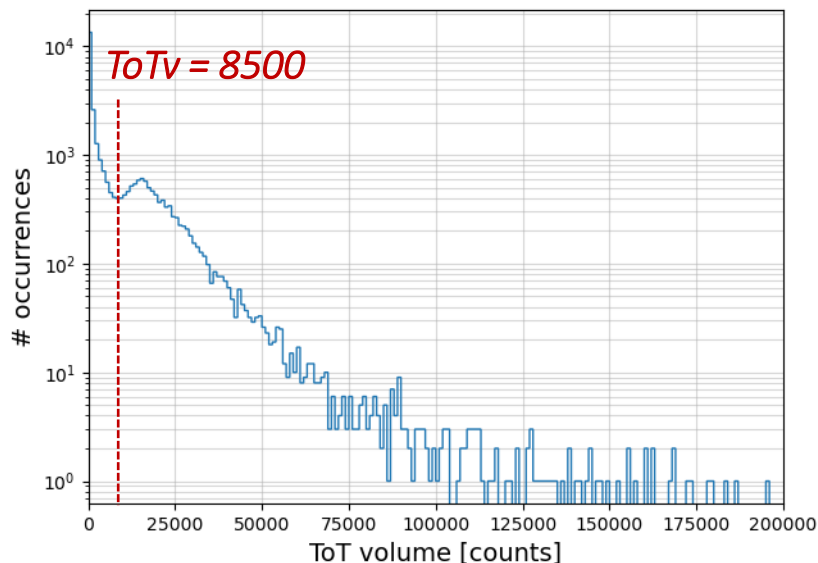
neutron energies 15 – 0.2 MeV



neutron energies 15 – 0.2 MeV



ToTv with Rnd between 75 and 85 %

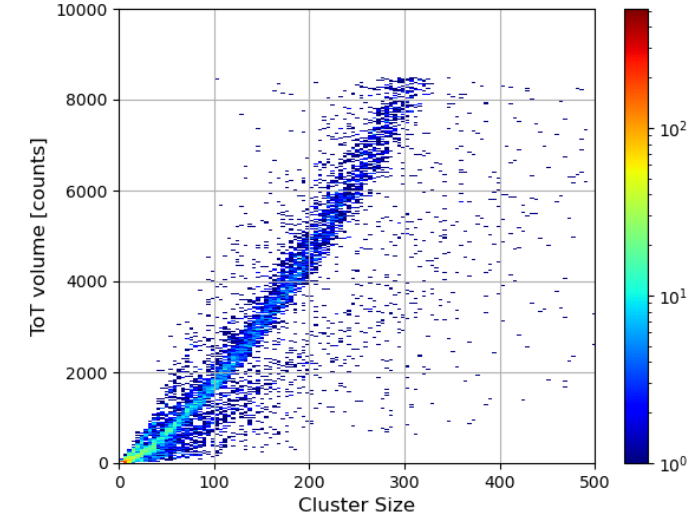


*L'applicazione di un taglio sul parametron ToTv a 8500 (~ 200 keV) ha consentito di indentificare almeno 4 famiglie che iniziano a differenziarsi per valori di Rnd < 80 %.*

*Tra queste 2 corrispondono alle ad alfa e tritoni, come viene ottenuto per neutroni termici sulla sorgente HOTNES e come è stato confermato su intervalli di bassa energia su  $n_{TOF}$*

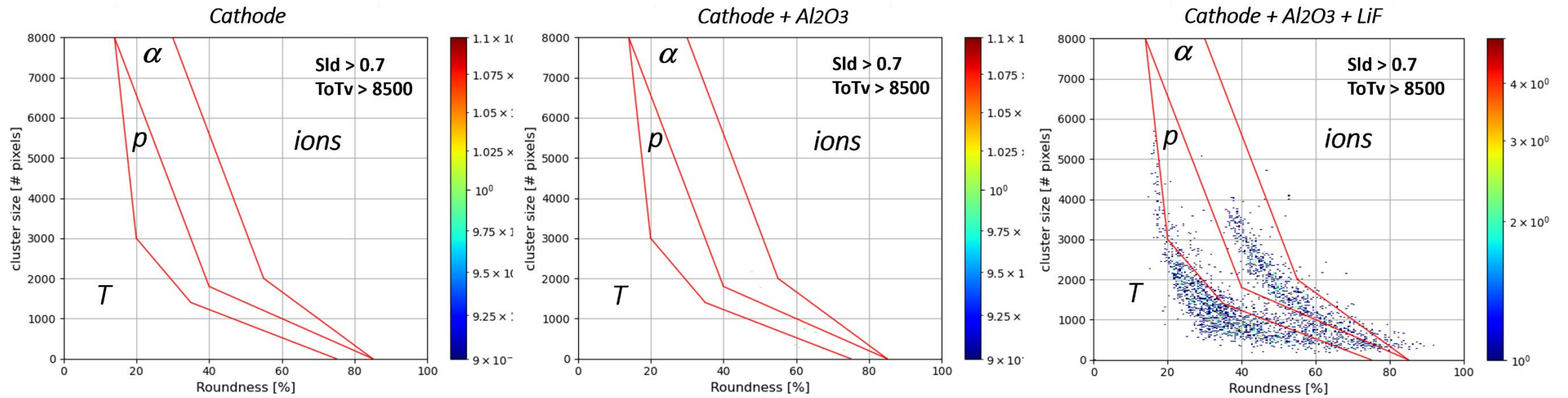
*Per valori di energia < di 200 keV si osservno altre popolazioni dovute a ioni di bassa energia (min 25 keV).*

ToT volume vs Cluster Size

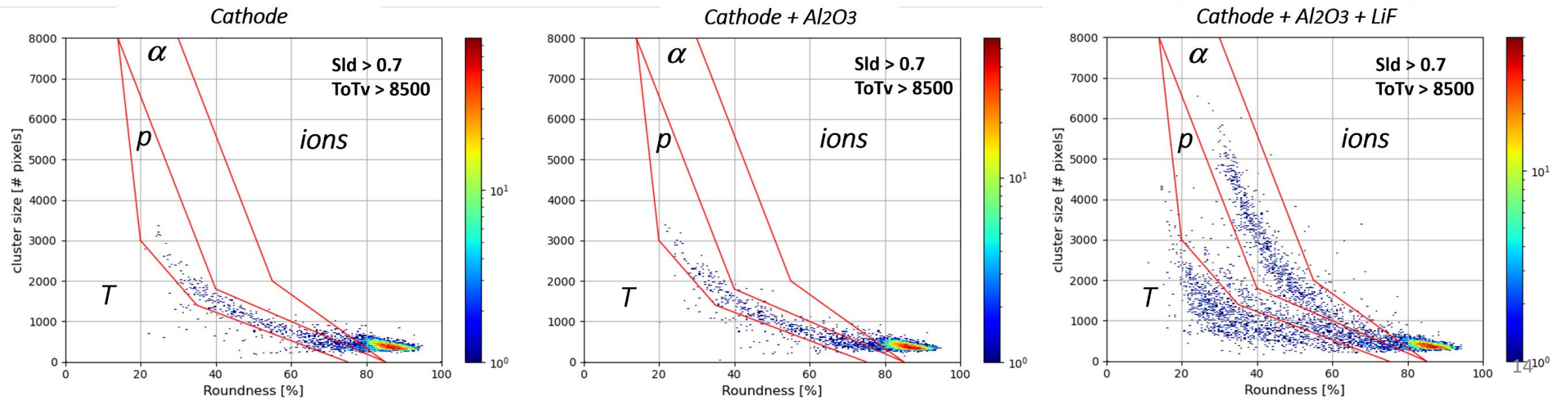


### 3. Misure e risultati preliminari su n\_TOF con GEMPix Side-on

energy range 10 keV – 450 eV

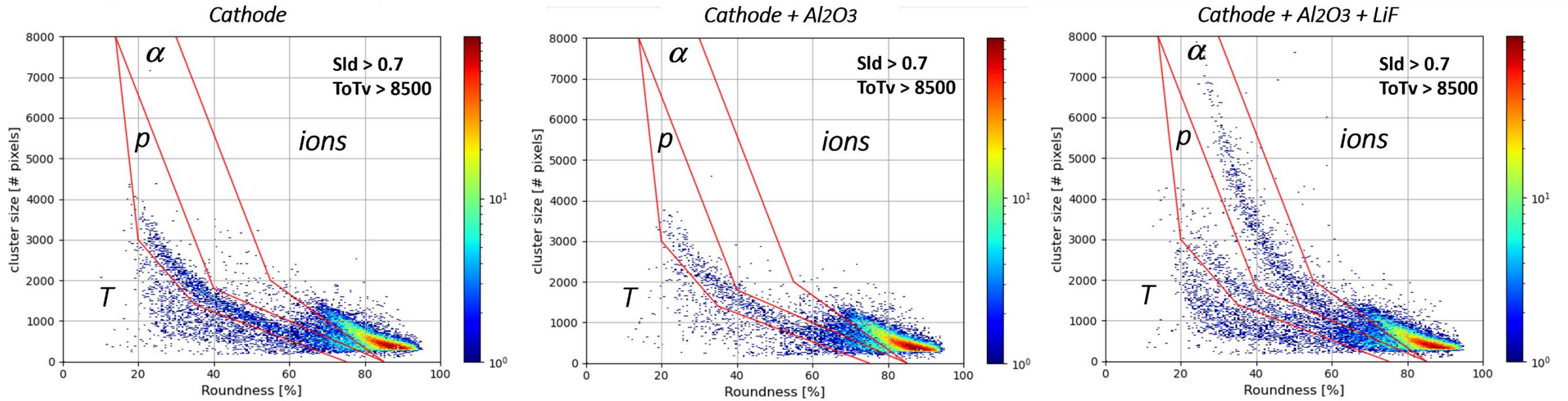


energy range 1 MeV – 14 keV

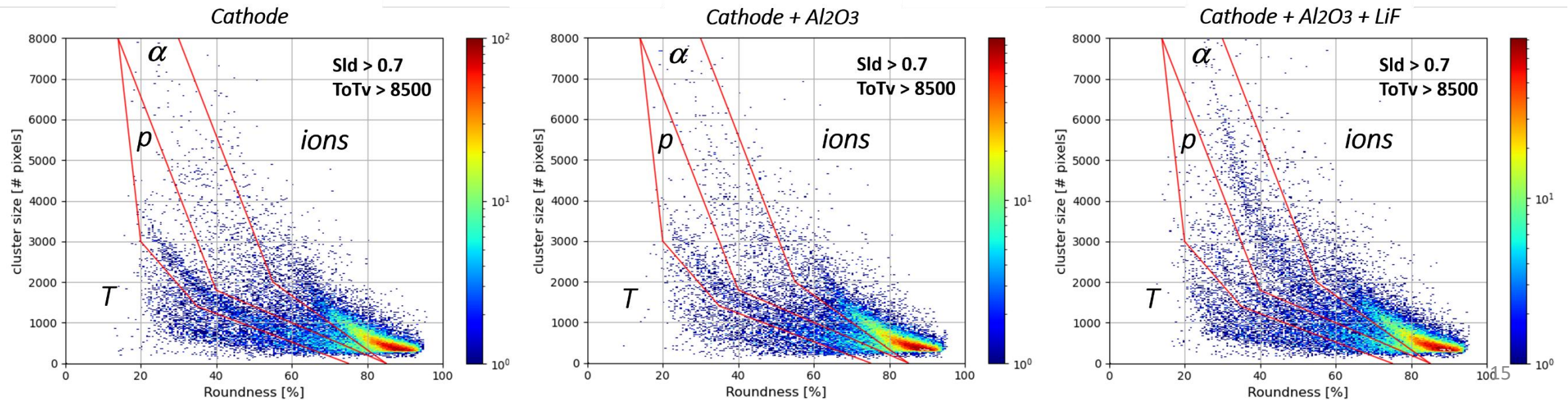


### 3. Misure e risultati preliminari su $n\_TOF$ con GEMPix Side-on

energy range 3 – 0.2 MeV



energy range 15 – 0.2 MeV



### 3. Misure e risultati preliminari su n\_TOF con GEMpix Side-on

| 1 MeV - 14 keV   |                                 |       |         |        |         |
|------------------|---------------------------------|-------|---------|--------|---------|
| # RUN            | Cathode                         | ions  | protons | alphas | tritons |
|                  | 30no Target                     | 5235  | 604     | 278    | 71      |
|                  | 37Alumina                       | 4633  | 703     | 250    | 85      |
|                  | 23Alumina + LiF                 | 4510  | 958     | 1389   | 1410    |
|                  | respect to bare cathode         |       |         | 80.0%  | 94.9%   |
|                  | respect to cathode with Alumina |       |         | 82.0%  | 94.0%   |
| 3 MeV - 0.2 MeV  |                                 |       |         |        |         |
| # RUN            | Cathode                         | ions  | protons | alphas | tritons |
|                  | 29no Target                     | 15990 | 2240    | 1713   | 1443    |
|                  | 36Alumina                       | 17593 | 1917    | 1777   | 642     |
|                  | 22Alumina + LiF                 | 15990 | 2240    | 2956   | 1543    |
|                  | respect to bare cathode         |       |         | 42.0%  | 6.5%    |
|                  | respect to cathode with Alumina |       |         | 39.9%  | 58.4%   |
| 15 MeV - 0.2 MeV |                                 |       |         |        |         |
| # RUN            | Cathode                         | ions  | protons | alphas | tritons |
|                  | 28no Target                     | 21916 | 4520    | 3671   | 2888    |
|                  | 35Alumina                       | 23423 | 3671    | 3560   | 1977    |
|                  | 21Alumina + LiF                 | 23207 | 4020    | 5145   | 2737    |
|                  | respect to bare cathode         |       |         | 28.6%  | -5.5%   |
|                  | respect to cathode with Alumina |       |         | 30.8%  | 27.8%   |

# particelle su 5000 trigger

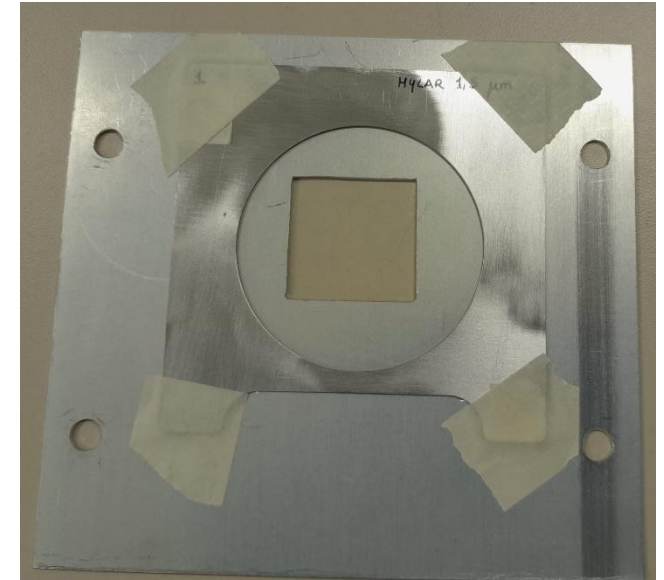
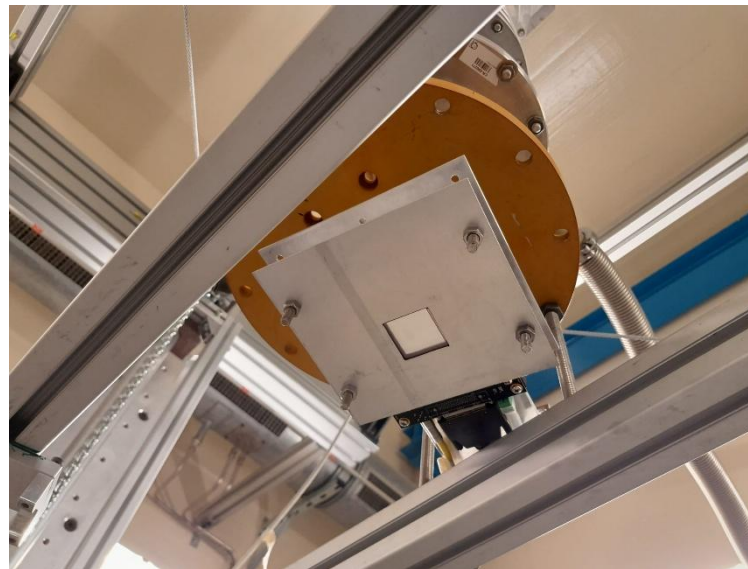
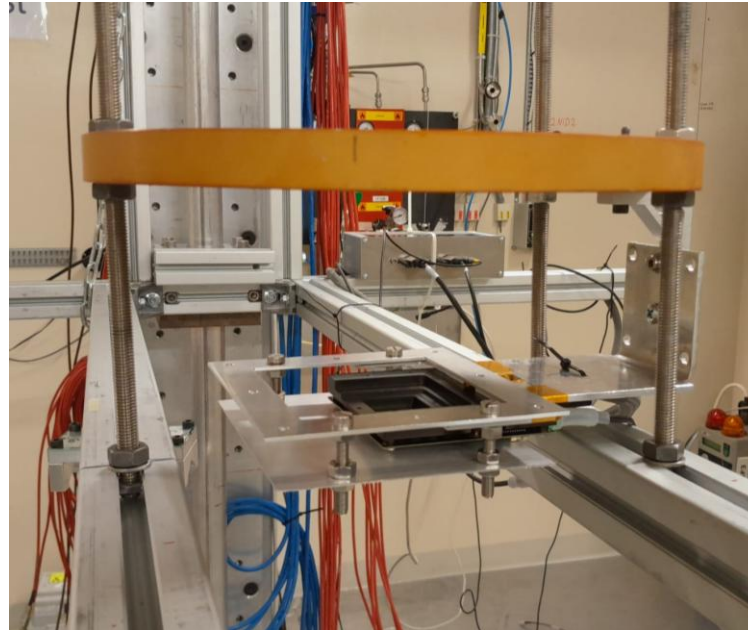
- Il contributo di alfa e tritoni legato alla presenza del LiF rispetto al background tende a ridursi ad energie dei neutroni più alte.
- Sembra che il peso del background sia ulteriormente ridotto quando è presente il substrato di Allumina.
- Ad energie più alte la percentuale legata alle alfa raggiunge un valore del 30 %, significativamente più dell'8% stimato col GEMpix head-on.
- La misura delle energie dei prodotti carichi può scendere fino ai 25 keV e diverse famiglie di ioni possono essere distinte.

I presenti risultati verranno verificati ulteriormente con analisi dati più dettagliate e integrati con simulazioni per una più corretta interpretazione.

#### 4. Attività con QUAD Timepix3 a stato solido: misure su LiF (31 Ottobre – 11 Novembre 2024)



Il QUAD è stato posizionato a circa 3 m dal pavimento dopo il rivelatore anulare in EAR2.

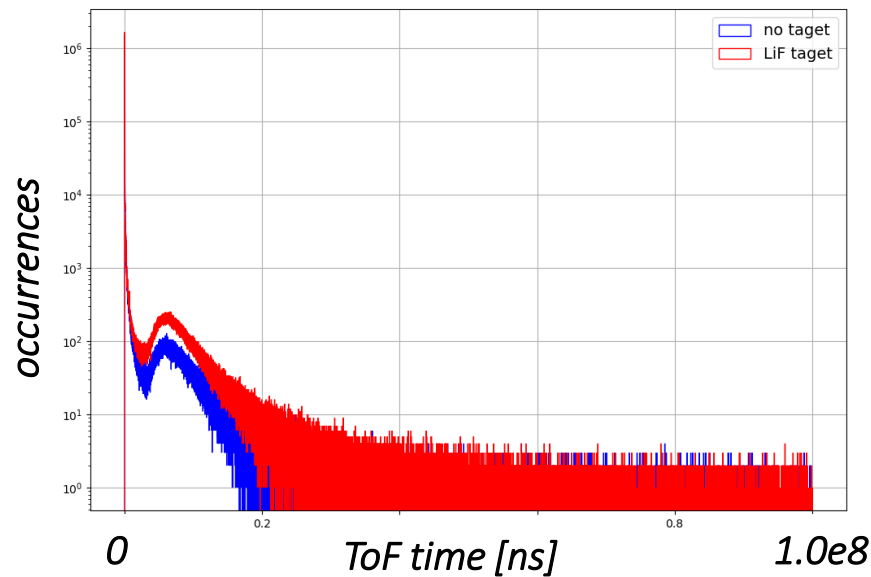


Il test è stato effettuato utilizzando campioni di mylar ( $1.6 \mu\text{m}$ ) depositati con LiF arricchito al 95% di  $^6\text{Li}$  ( $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) spesso  $400 \text{ nm}$ .

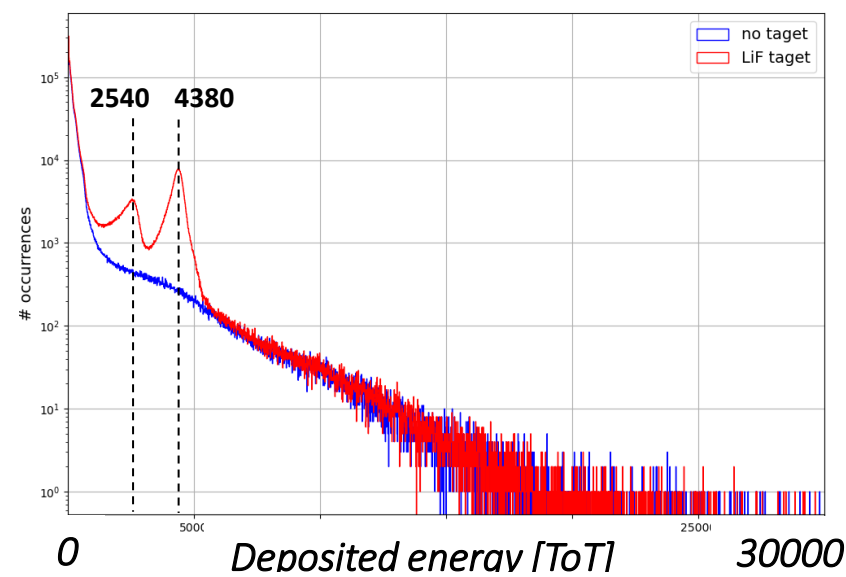
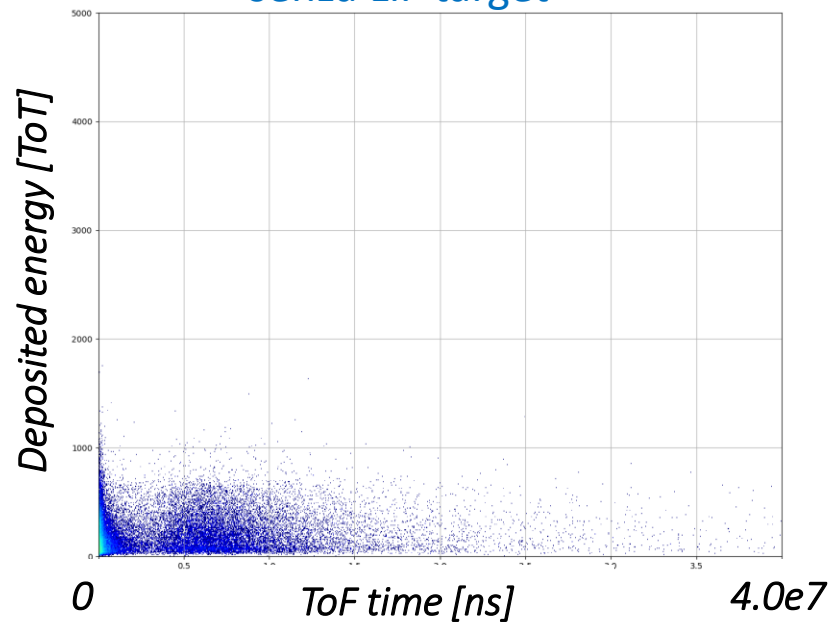
Il corretto funzionamento del QUAD si è ottenuto applicando un delay hardware di  $2.5 \mu\text{s}$  rispetto al gamma flash e decentrando il detector rispetto al fascio.

#### 4. Attività con QUAD Timepix3 a stato solido: misure su LiF (31 Ottobre – 11 Novembre 2024)

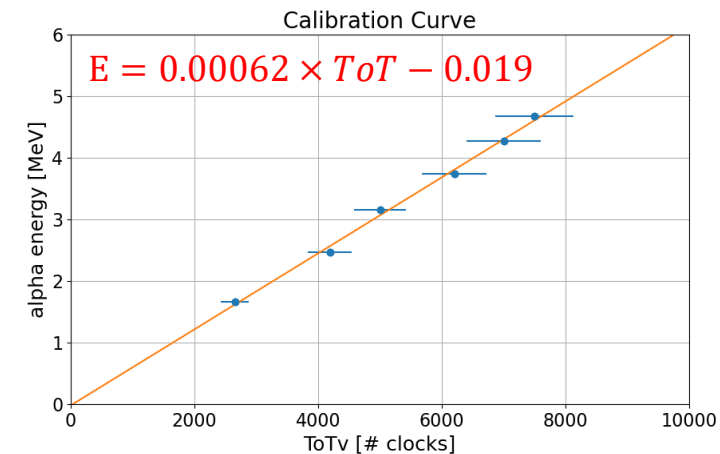
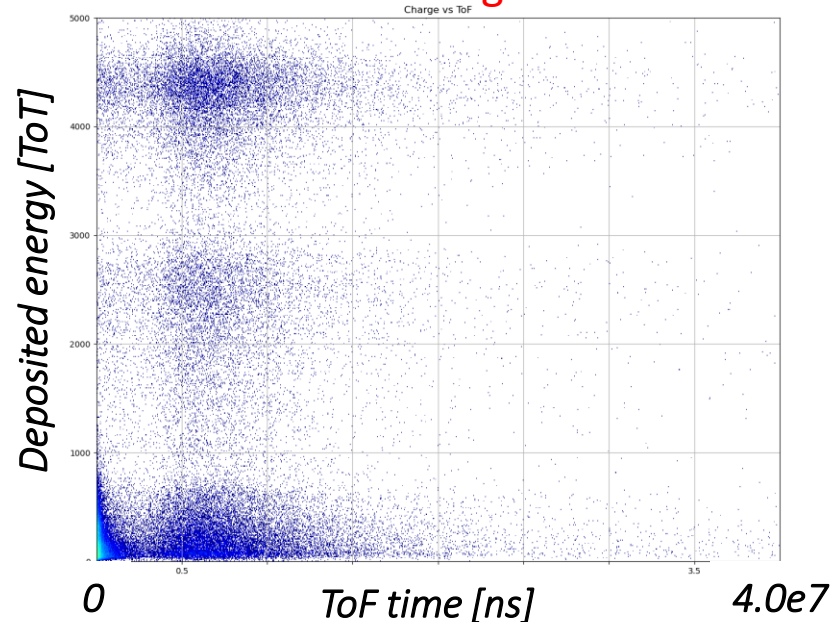
4000 Triggers, campione di LiF su tutta la superficie



senza LiF target



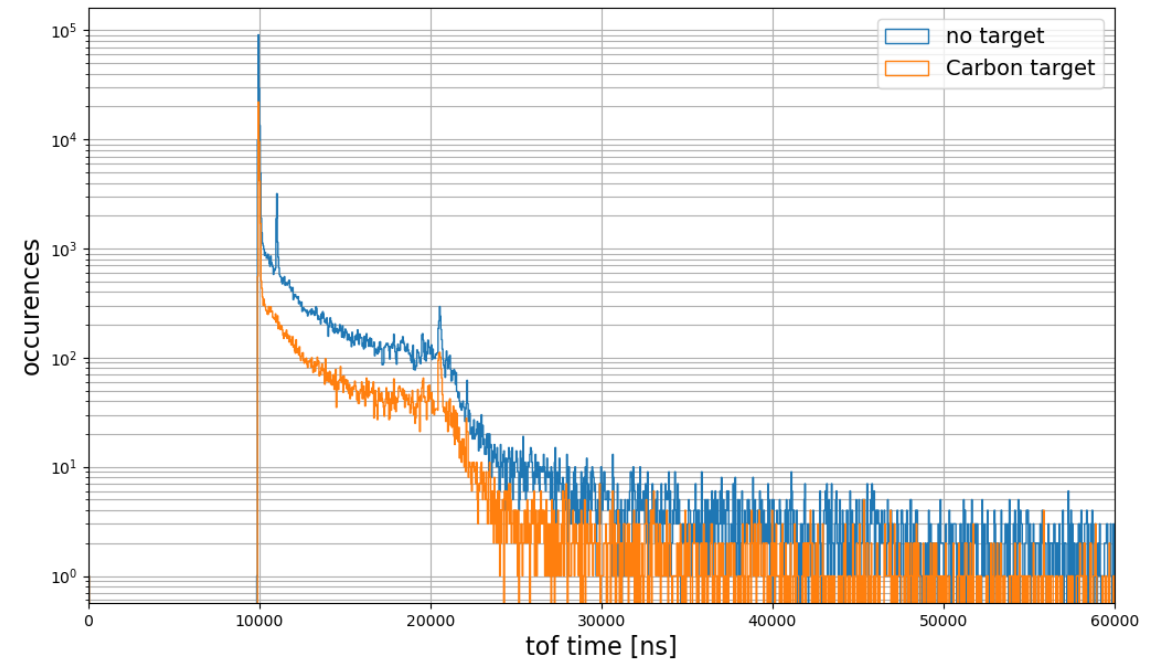
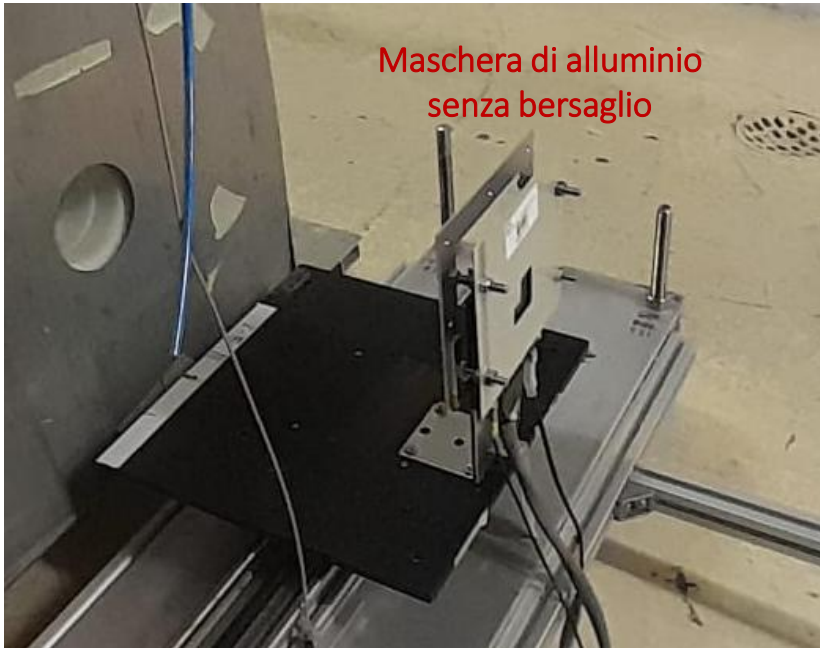
con LiF target



Si evidenzia chiaramente la presenza dei contributi di alfa e tritoni dovuti al LiF

In più, applicando la retta di calibrazioni, i valore delle energie stimate in corrispondenza dei picchi risultano sono circa 1.5 e 2.7 MeV, compatibili con le energie dei prodotti del  ${}^6\text{Li}$ .

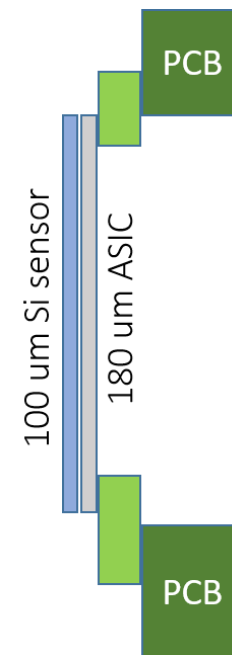
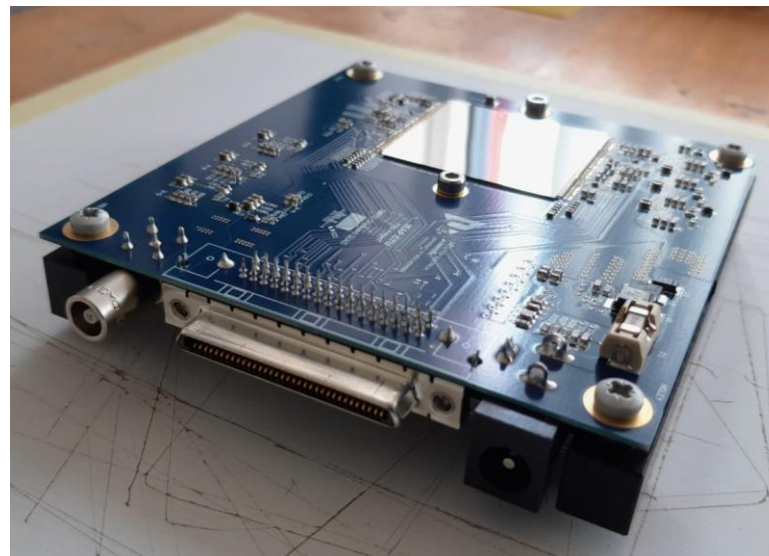
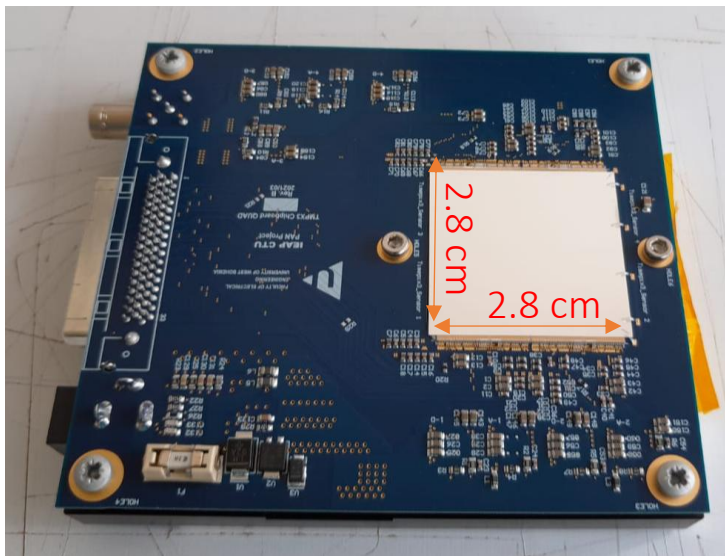
#### 4. Attività con QUAD Timepix3 a stato solido: misure su Carbonio (19 Marzo – 2 Aprile 2025)



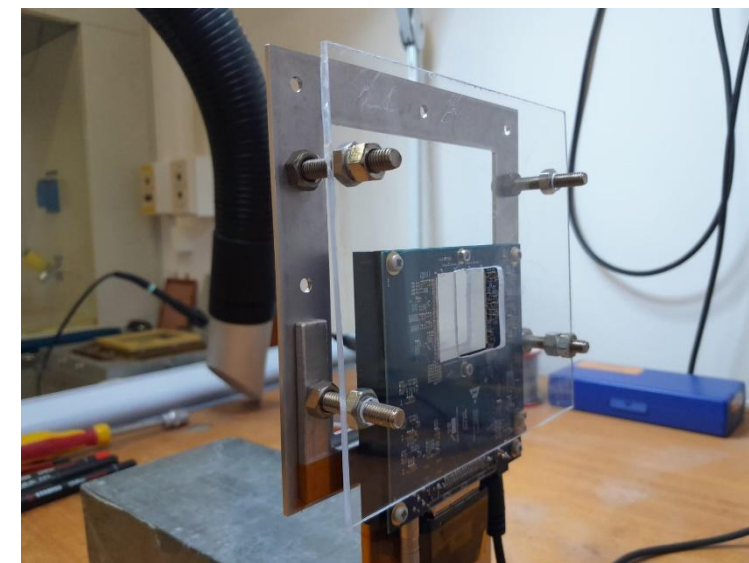
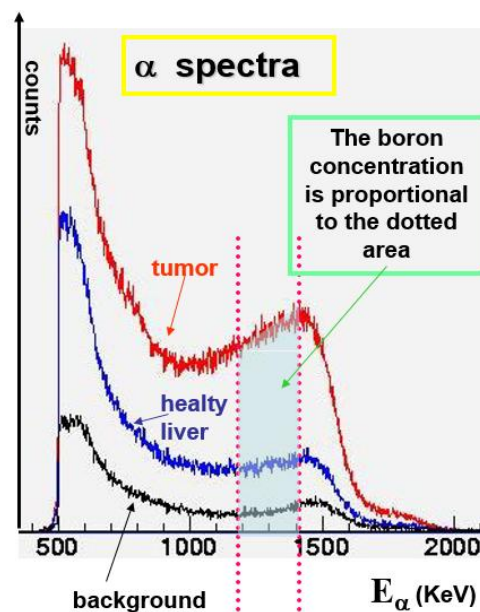
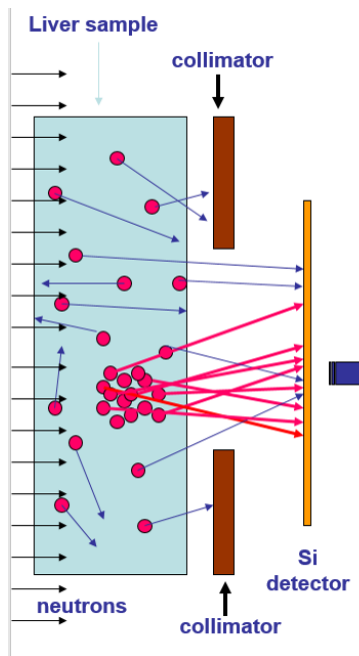
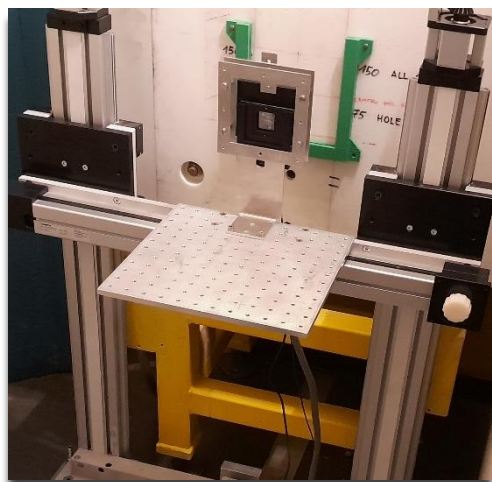
Il QUAD TPX3 acquisisce su un intervallo di 150 ms associando ad ogni traccia il tempo di volo. In questo l'acquisizione avviene su tutto lo spettro neutronico.

Il detector ha funzionato correttamente e l'analisi dei dati è ancora in corso allo scopo di identificare i prodotti carichi del Carbonio così come fatto per il LiF.

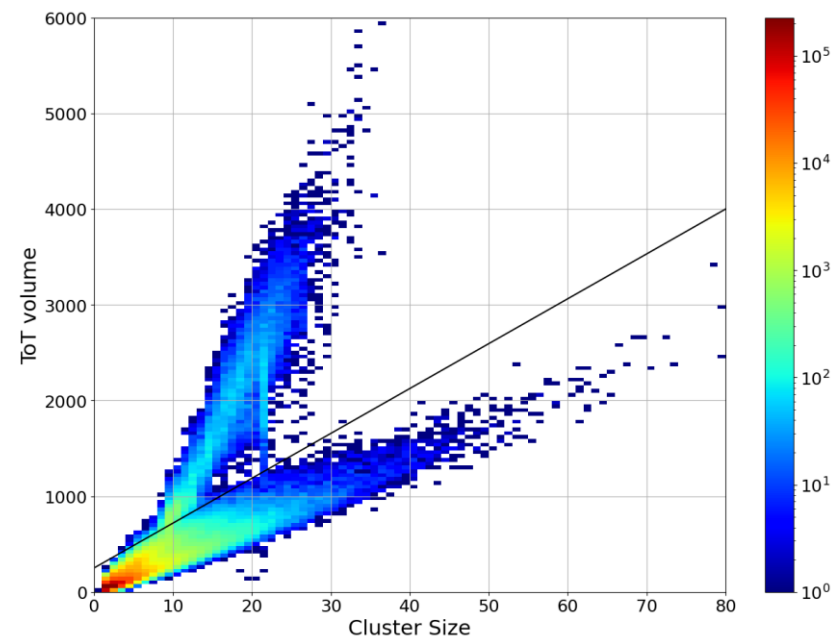
#### 4. Attività con QUAD Timepix3 a stato solido: misure di concentrazione di 10B per BNCT (Aprile 2024)



Al momento si dispone di un QUAD Timepix3 con Si da 100  $\mu\text{m}$ , il quad è stato montato su una scheda "forata" per cui si riduce l'effetto del background proveniente dal PCB

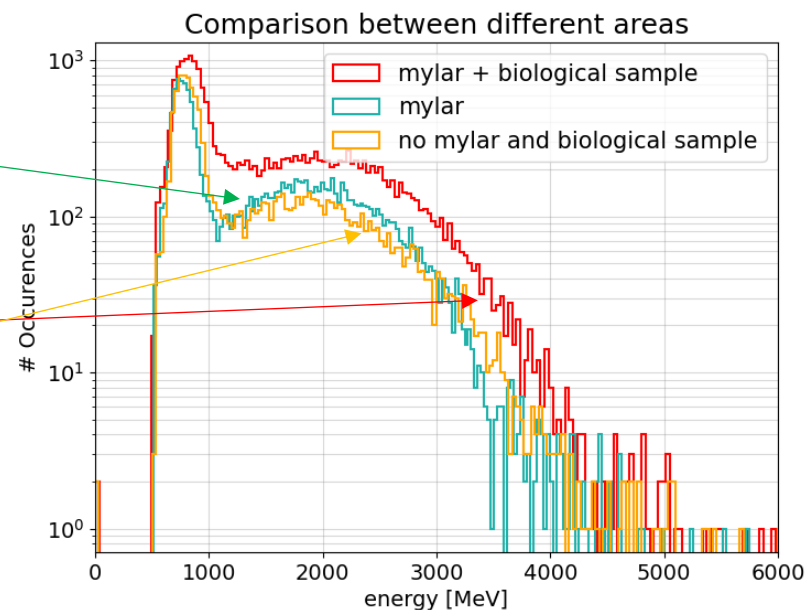
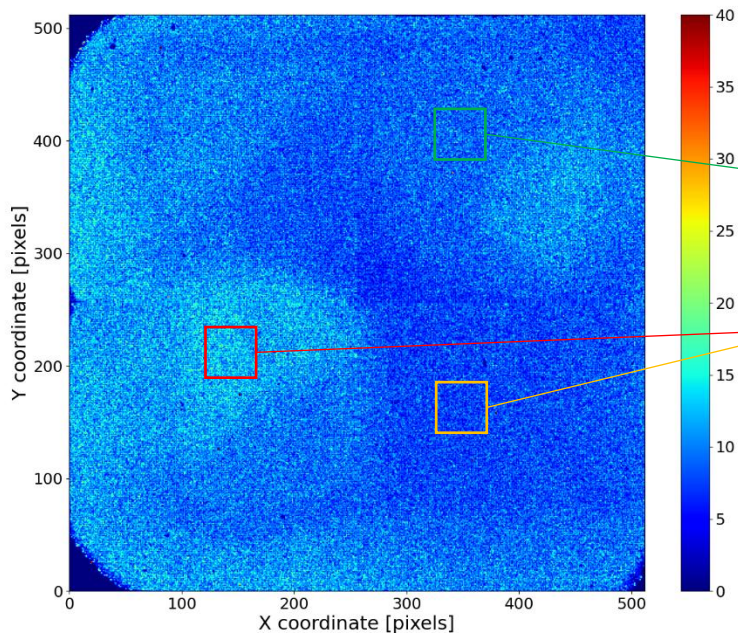


#### 4. Attività con QUAD Timepix3 a stato solido: misure di concentrazione di $^{10}\text{B}$ per BNCT (Aprile 2024)



Selezionando le tracce con  $\text{CS} > 5$ , è stato possibile individuare nel piano ToT vs CS un semipiano dove si osserva chiaramente il contributo di protoni, alfa e ioni dal background dovuto soprattutto ai gamma.

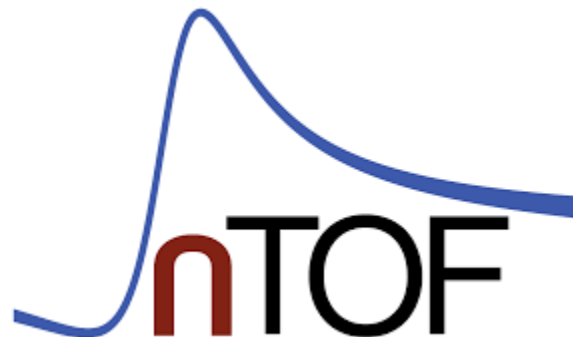
L'immagine dei centroidi delle particelle del semipiano "campioni" evidenzia la presenza delle zone ricoperte dai campioni biologici (tessuti di fegato) spessi da 60 a 100  $\mu\text{m}$  e aventi una concentrazione di  $^{10}\text{B}$  di 50 ppm.



Il confronto delle distribuzioni di energia rilasciata (in ToT) su 3 diverse aree mostra il contributo dovuto alla presenza del campione. La differenza rispetto all'area col mylar fornisce una misura della concentrazione.

## *Attività previste entro il 2025*

- ✓ L'analisi dati relativa alle misure effettuate col GEMpix head-on del 2023 verranno completate integrando le ultime simulazioni che tengono conto della forma reale del fascio e forniscono i contributi di tutti i componenti costituenti il detector.
- ✓ Il GEMpix side-on con lettura TPX1 ha funzionato correttamente ed ha permesso di testare la configurazione side-on con bersaglio interno. Il segnale dovuto del bersaglio in esame (LiF) fornisce un contributo fino al 30% per energie più alte. Una simile analisi verrà ripetuta con bersaglio di Carbonio nella medesima configurazione.
- ✓ Le informazioni ottenute da queste misure saranno utili alla realizzazione della nuova camera GEMpix Side-on con lettura TPX4 (non più TPX3). La sua realizzazione è prevista entro la fine del 2025.
- ✓ Le misure effettuate col QUAD TPX3 al silicio da 500 mm saranno oggetto di analisi nei prossimi mesi con lo scopo di identificare i prodotti carichi del Carbonio. Stiamo valutando la possibilità di utilizzarlo in camera da vuoto in modo da poterlo posizionare fuori fascio senza perdita di efficienza.
- ✓ Le misure presso il LENA di Pavia verranno completate in modo da effettuare una calibrazione in concentrazione con tessuti aventi quantità note di  $^{10}\text{B}$ . Il risultato potrebbe essere oggetto di un proposal su n\_TOF nell'ambito BNCT e per altre applicazioni.



*GRAZIE PER L'ATTENZIONE!*