

Attività svolte nell'ambito del progetto n_TOF

Gerardo Claps

INFN - LNF & ENEA Frascati

SOMMARIO

- ✓ *Rivelatori compatti basati su Timepix*
- ✓ *Misura dei prodotti carichi con GEMpix*
- ✓ *Misura della distribuzione di ^{10}B con Quad Timepix3 per la BNCT*
- ✓ *Caratterizzazione di un rivelatore al diamante basato su Timepix3*
- ✓ *Sistema combinato con camera GEMpix3 side-on e QUAD Timepix3*

Rivelatori compatti basati su Timepix

Rivelatori compatti basati su Timepix

GEMPIX con QUAD TIMEPIX1

TIMEPIX1 (Silicio)



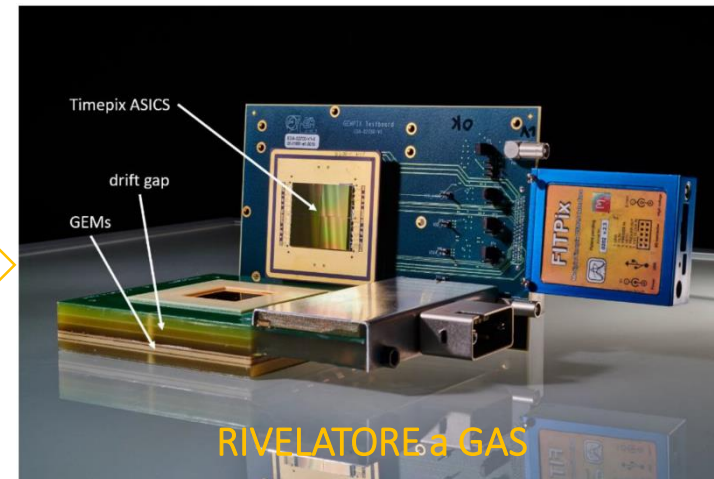
14x14 mm²

2x2 TIMEPIX1

QUAD TIMEPIX1 (Silicio)



2x2 TIMEPIX1 ASIC
+ triple GEM CAMERA



QUAD TIMEPIX3 (Silicio)



2x2 TIMEPIX3

TIMEPIX3 (Silicio)



TIMEPIX3 ASIC
+ DIAMOND

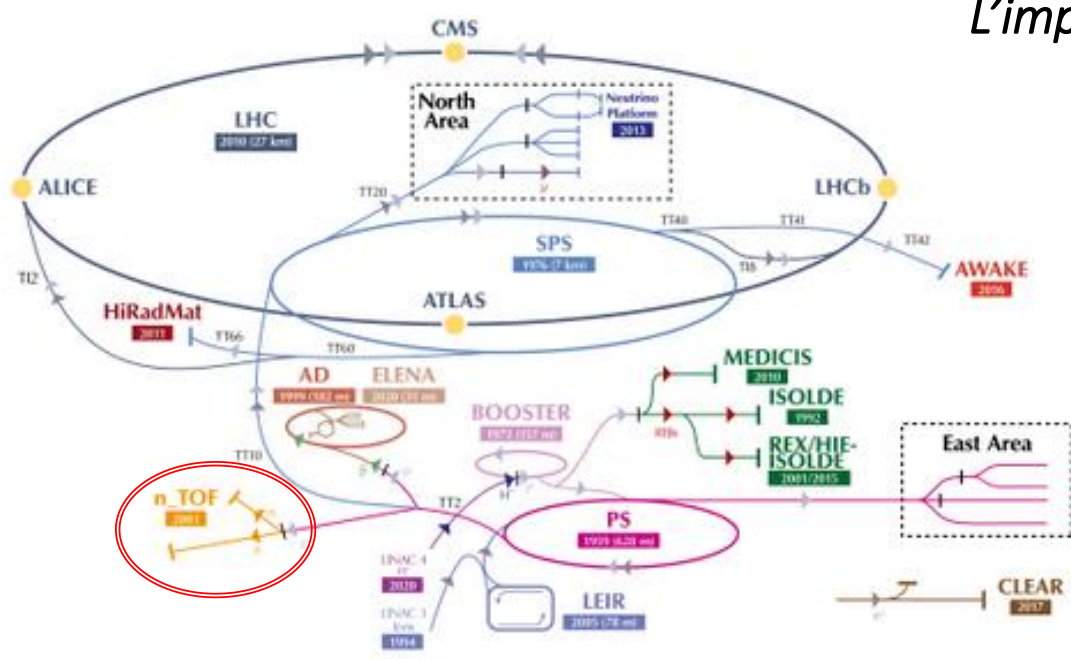
DIAMONDPIX



	Timepix (2006)	Timepix3 (2013)
Pixel arrangement	256 x 256	
Pixel size	55 x 55 μm ²	
Technology	250nm CMOS - 6Metals	130nm CMOS - 8Metals
Acquisition modes	1) Charge (iTOT) 2) Time (TOA) 3) Event counting (PC)	1) Time (TOA) AND Charge (TOT) 2) Time (TOA) 3) Event counting (PC) AND integral charge (iTOT)
Readout Type	1) Full-Frame	1) Data driven (DD) 2) Frame (FB)
Zero suppressed readout	NO	YES
Dead time per pixel	> 300μs readout time of one frame	> 475ns Pulse measurement time + packet transfer time
Minimum timing resolution	10ns	1.562ns ~600x 6.4x
On-chip Power pulsing (PP)	NO	YES
Minimum detectable charge	~750e-	>500e- 1.5x
Output bandwidth	1 LVDS ≤200Mbps 32 CMOS ≤3.2Gbps	1 to 8 SLVS @640Mbps DDR ≤5.2Gbps 1.6x

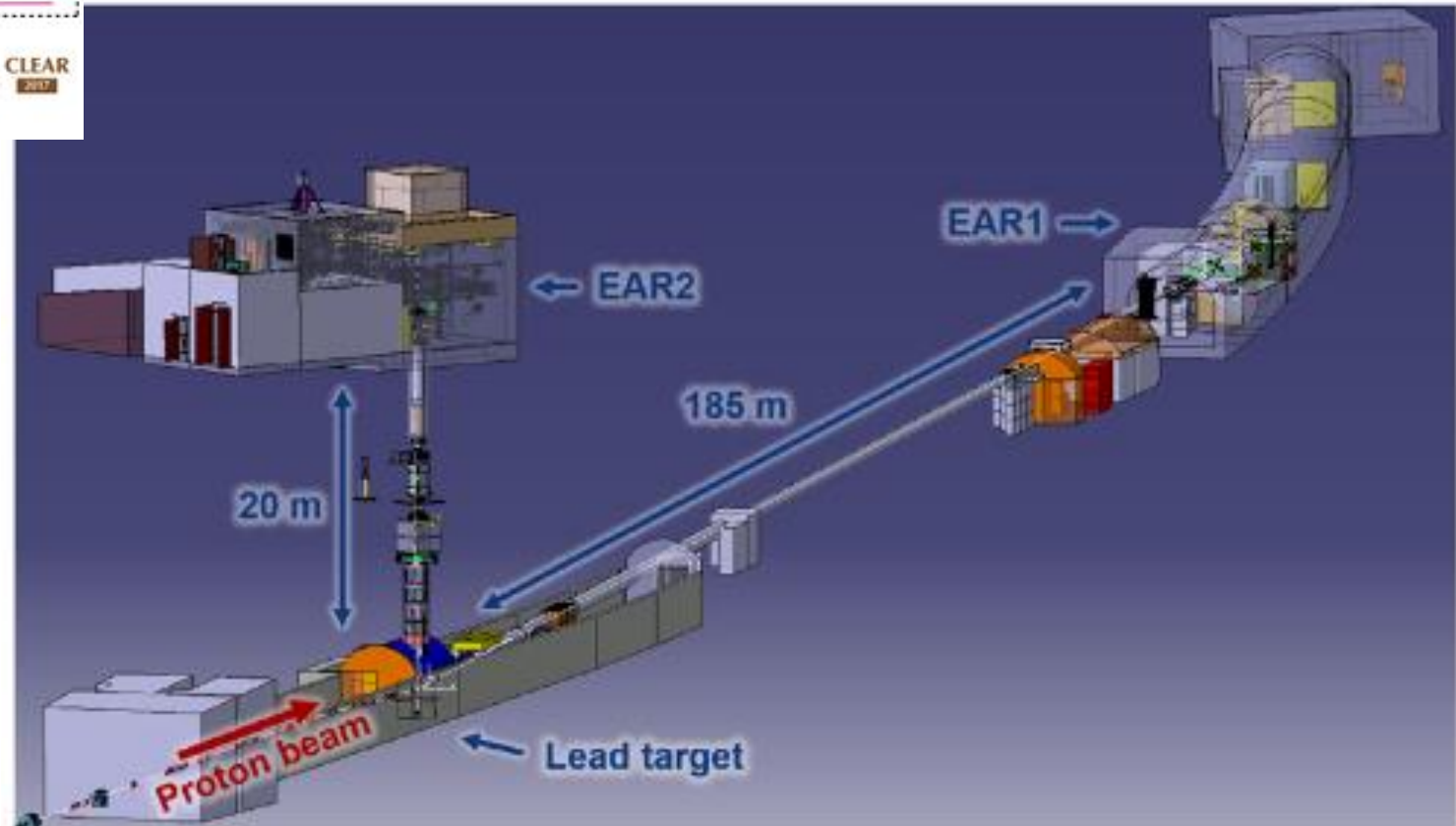
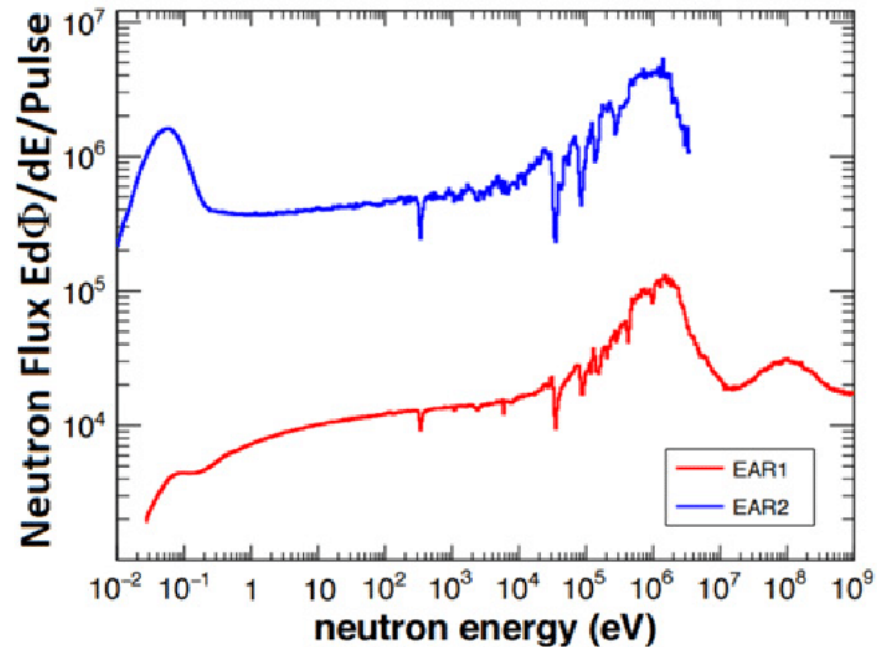
Misura dei prodotti carichi con GEMpix

L'impianto n_TOF al CERN



I neutroni sono prodotti attraverso il processo di spallazione da un fascio di protoni pulsati (con energia di 20 GeV/c) dal PS. Il bersaglio è di piombo, rivestito con uno strato moderatore di acqua borata per rallentare i neutroni veloci.

Ci sono due aree sperimentali situate a 20 m (EAR2) e 185 m (EAR1) dal bersaglio, più l'area del beam dump a 197 m oltre EAR1.



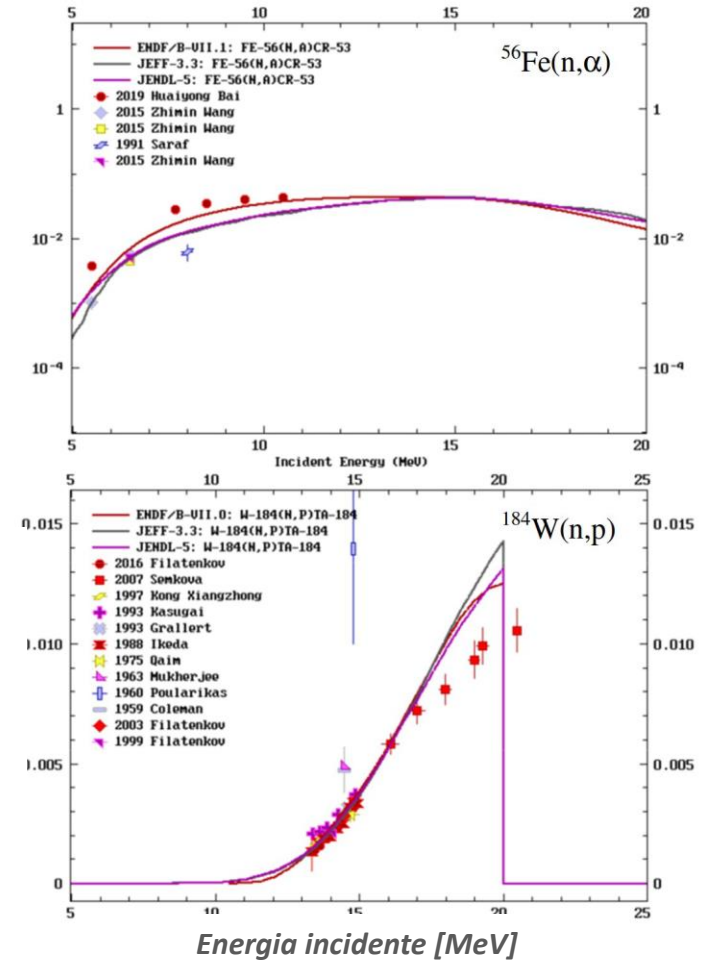
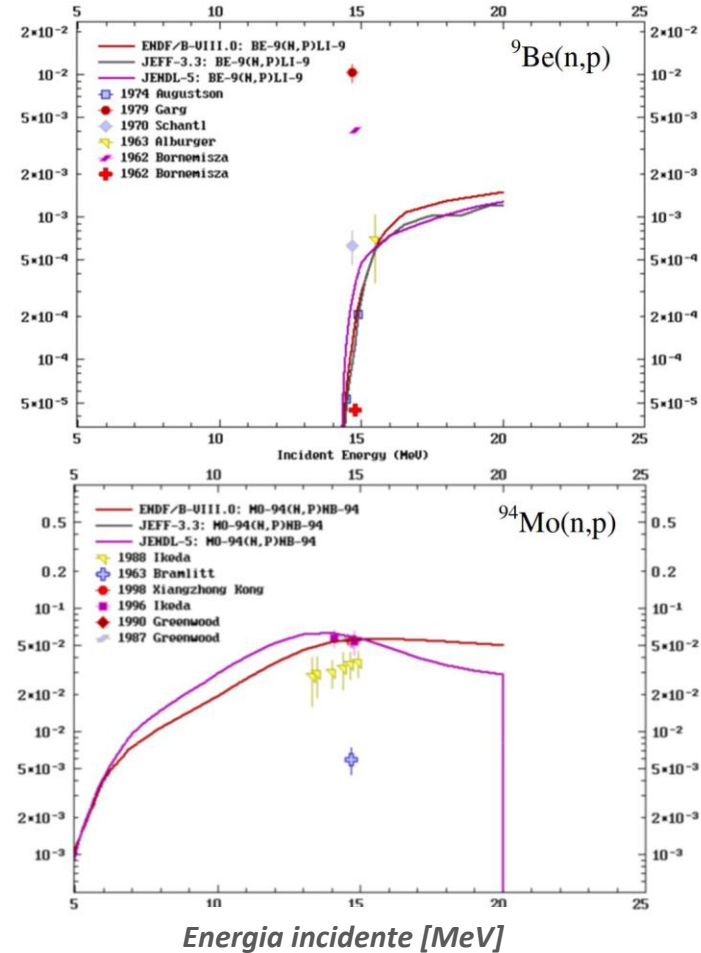
Misura dei prodotti di reazione con GEMpix presso l'impianto n_TOF: motivazioni e applicazioni

L'obiettivo della proposta su n_TOF è quello di misurare i prodotti da reazioni (n,cp) responsabili dei danni da radiazioni sui materiali strutturali dei futuri reattori a fusione, così come per altre applicazioni come l'astrofisica, la medicina nucleare e la fisica neutronica fondamentale.

In particolare, l'obiettivo è quello di misurare le sezioni d'urto di reazioni (n,cp) fino ad almeno 60 MeV di energia neutronica. I materiali di interesse per la fusione sono soprattutto **Be**, **Fe**, **Mo**, e **W**.

Per questo sono stati proposti due metodi innovativi: uno basato su un rivelatore anulare al silicio Neutron Transmutation Doped (NTD) ed uno basato su rivelatori Timepix (in particolare il GEMpix).

Il GEMpix è dedicato alla misura dei prodotti carichi di reazione in un range da 0.5 a 2 MeV dove i rivelatori al silicio sono limitati.

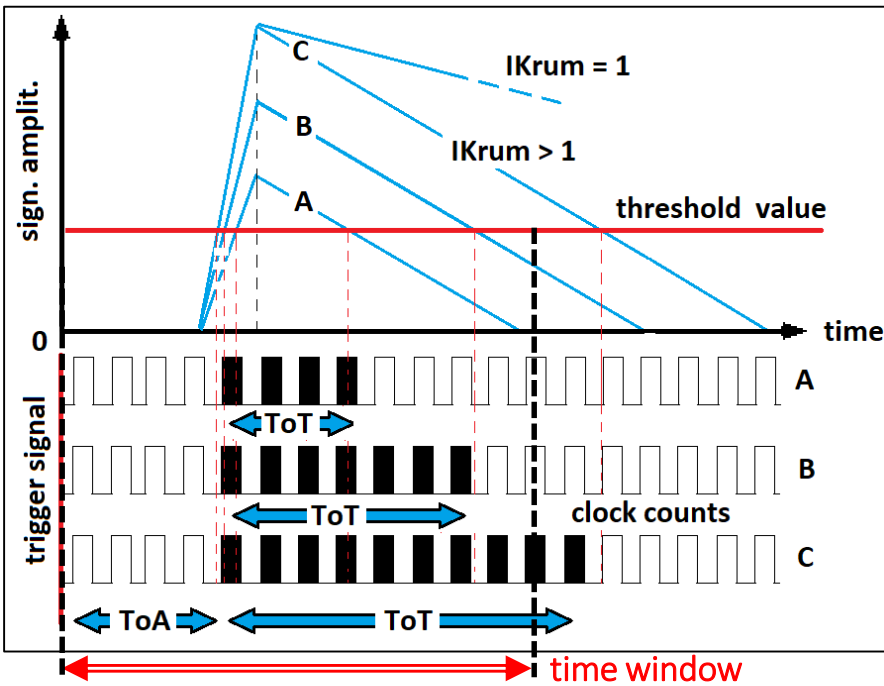
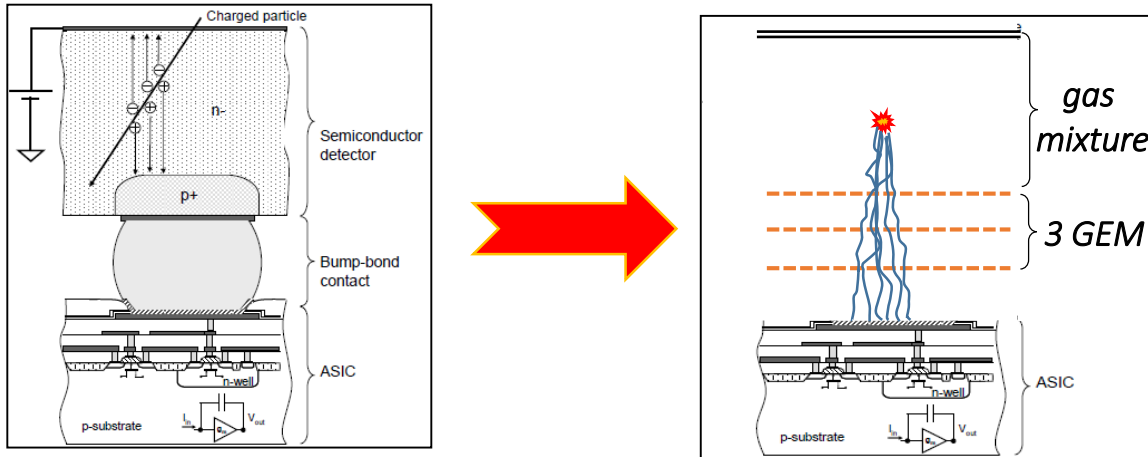


Altre reazioni di interesse per l'astrofisica sono ad esempio ${}^{14}\text{Ca}(n,p)$ e ${}^{16}\text{O}(n,\alpha)$

Allo scopo di validare la tecnica le misure vengono effettuate su bersagli noti come polietilene, allumina e carbonio.

GEMpix @ n_TOF per la misura dei prodotti di reazione in EAR1 (Settembre 2023)

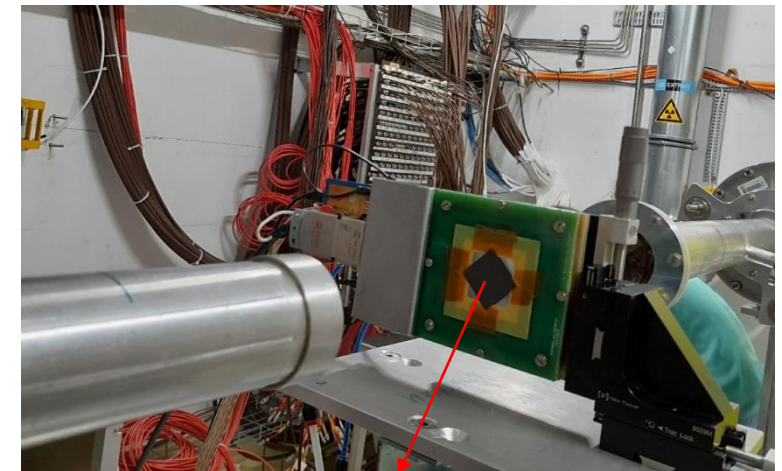
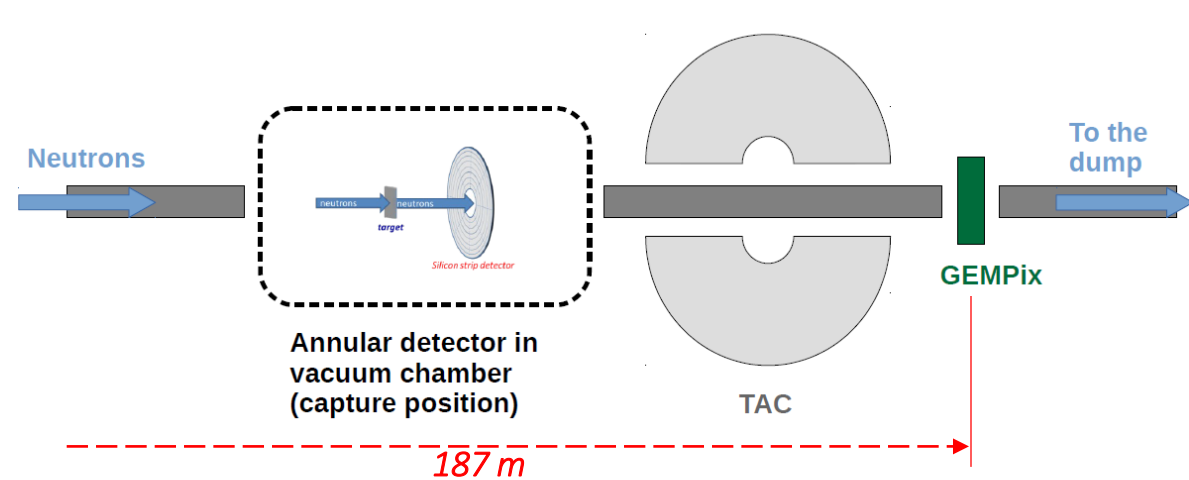
Rivelatore GEMpix



Il Timepix1 può acquisire in counting, carica (ToT) e tempo (ToA), separatamente.

La finestra di acquisizione limita le misure in ToT!

Installazione in EAR1

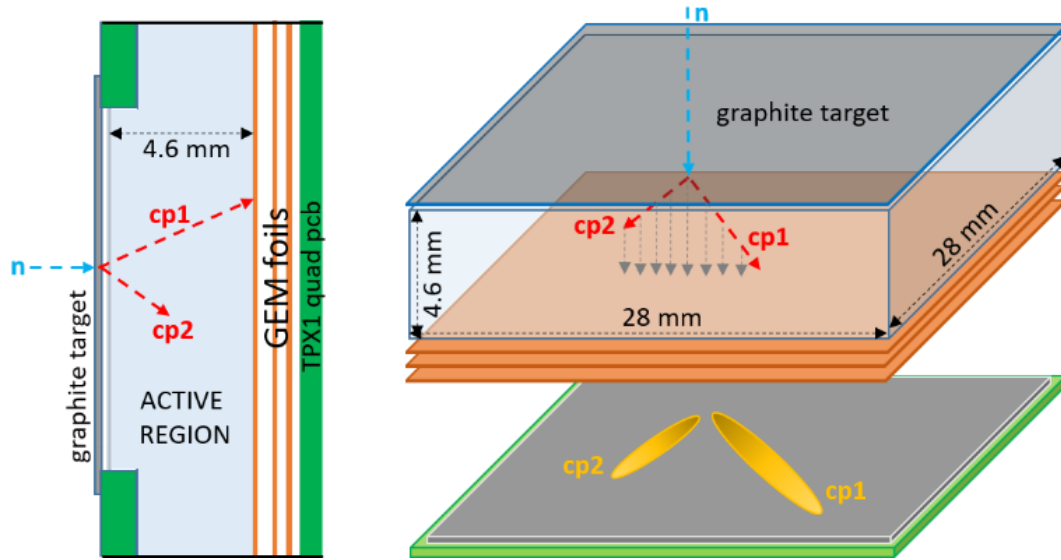


Bersaglio di Grafite da 500 μm

Allo scopo di validare la tecnica di misura con il GEMpix, sono stati utilizzati bersagli di allumina (Al_2O_3) da 400 μm e di Carbonio da 500 μm .

Col GEMpix è stato possibile effettuare misure su un range dello spettro neutronico di n_TOF (10keV – 20 MeV).

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



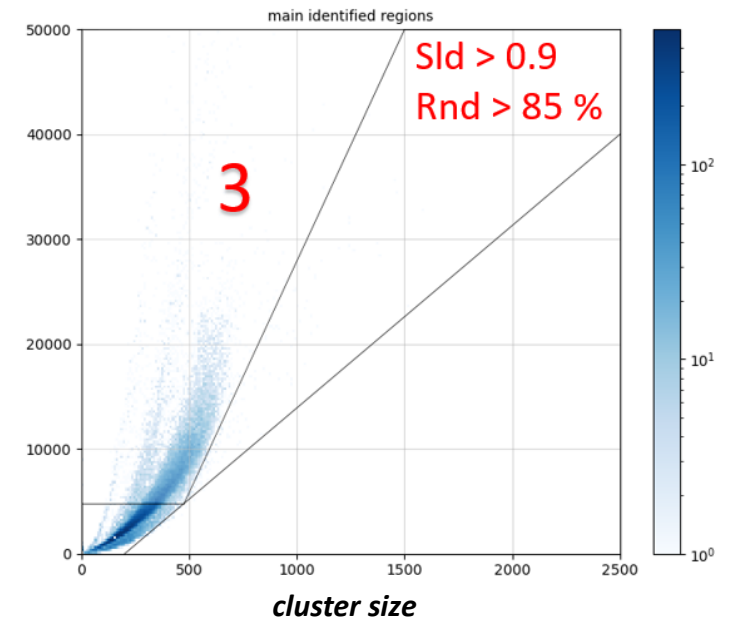
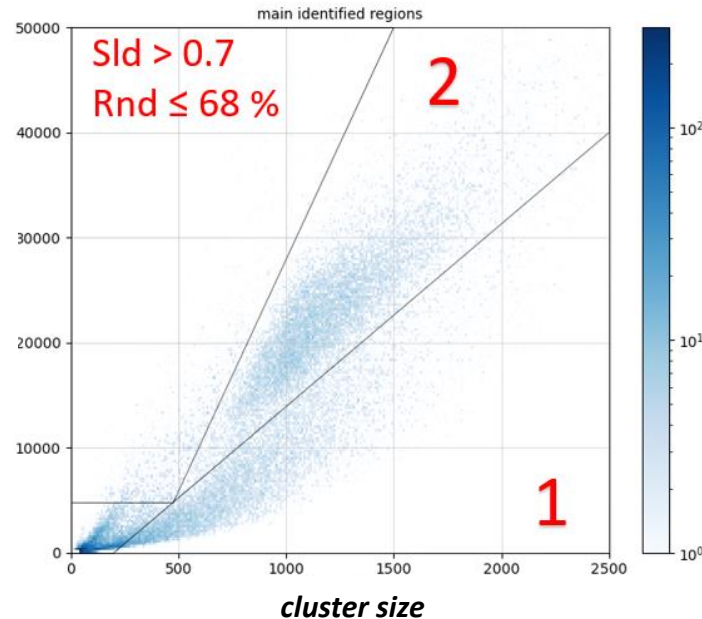
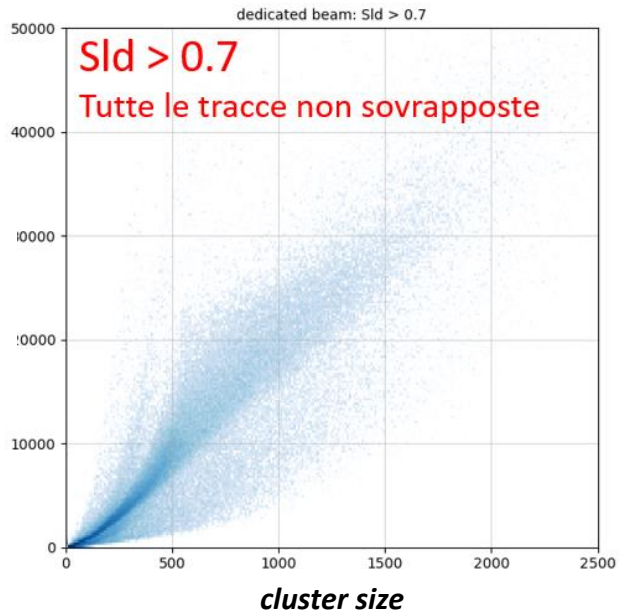
L'analisi di traccia è stata condotta tenendo conto dei seguenti parametri:

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.

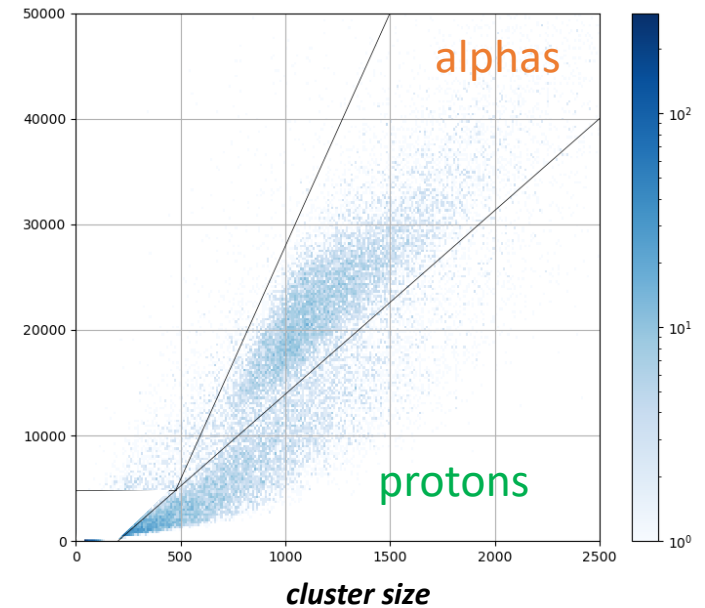
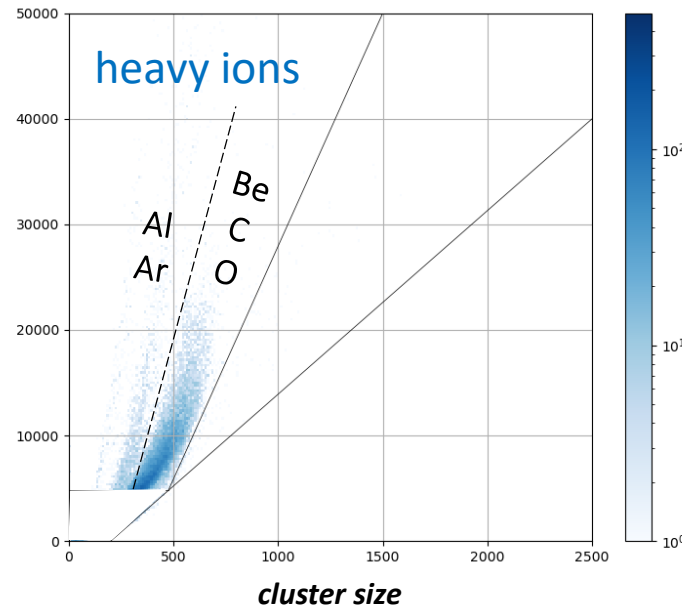
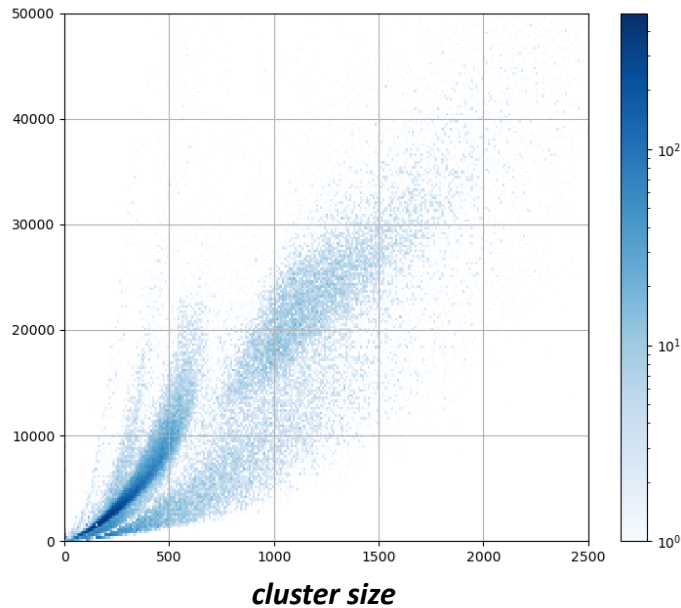
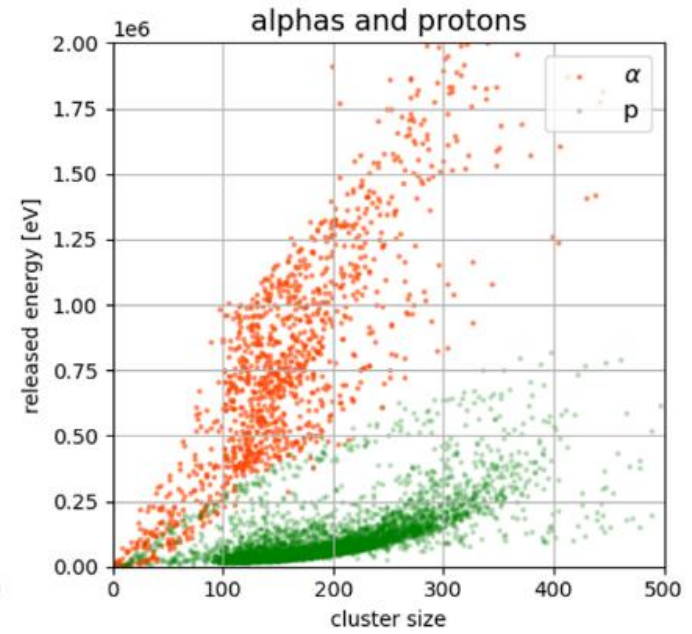
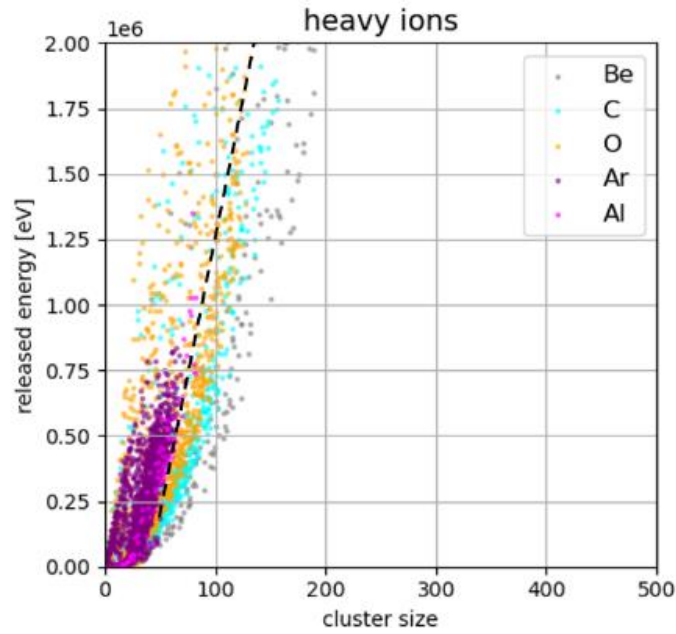
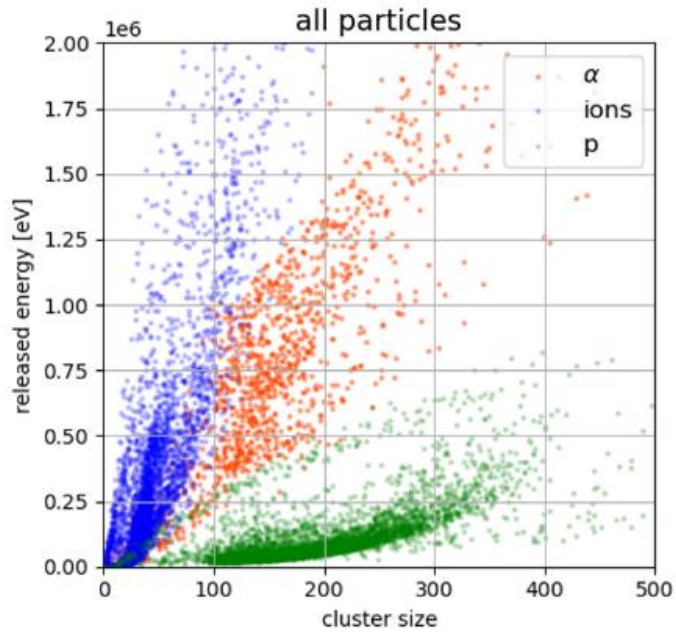
Cluster Size: somma dei pixel costituenti il cluster (dimensione del cluster)

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

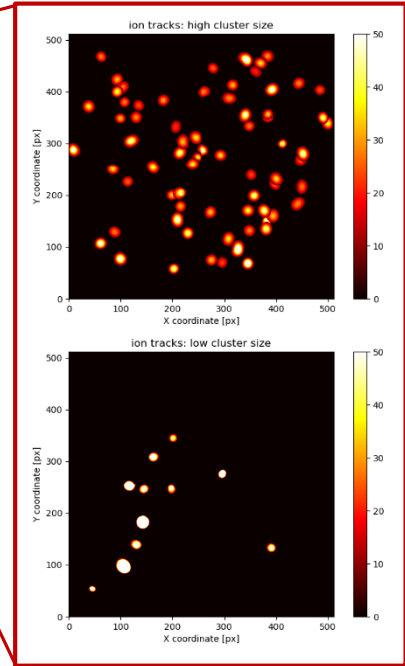
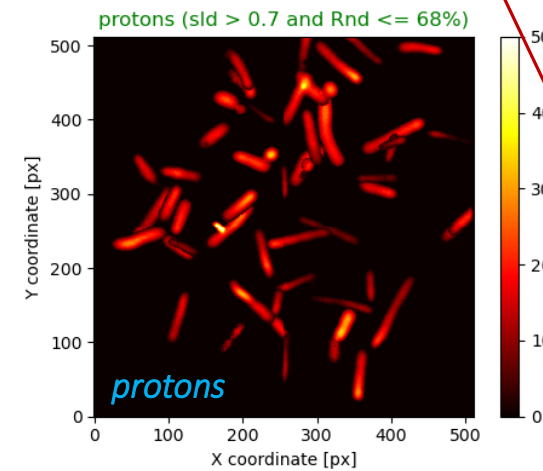
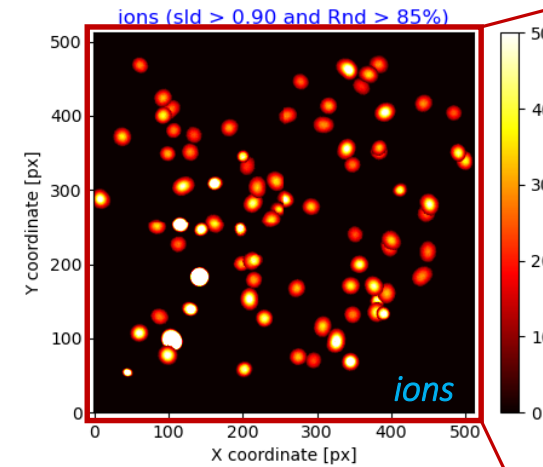
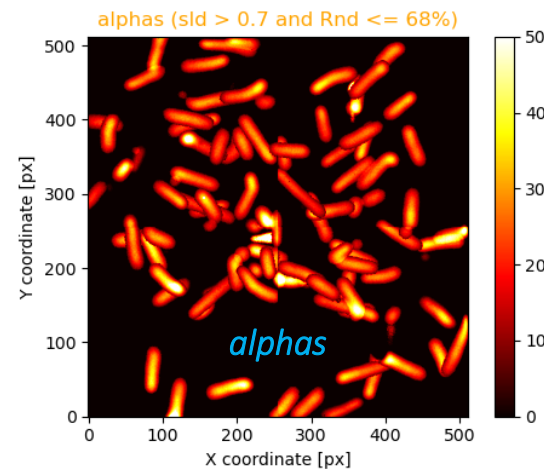
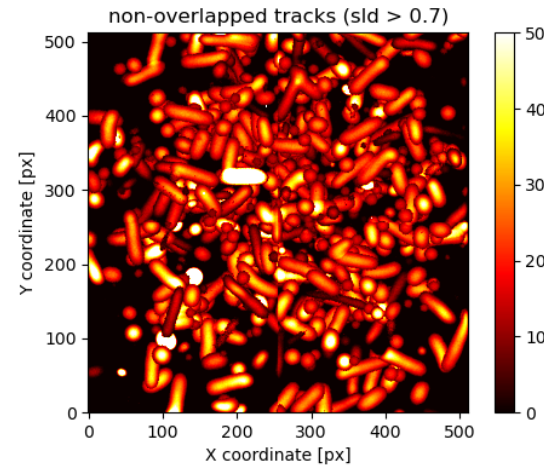
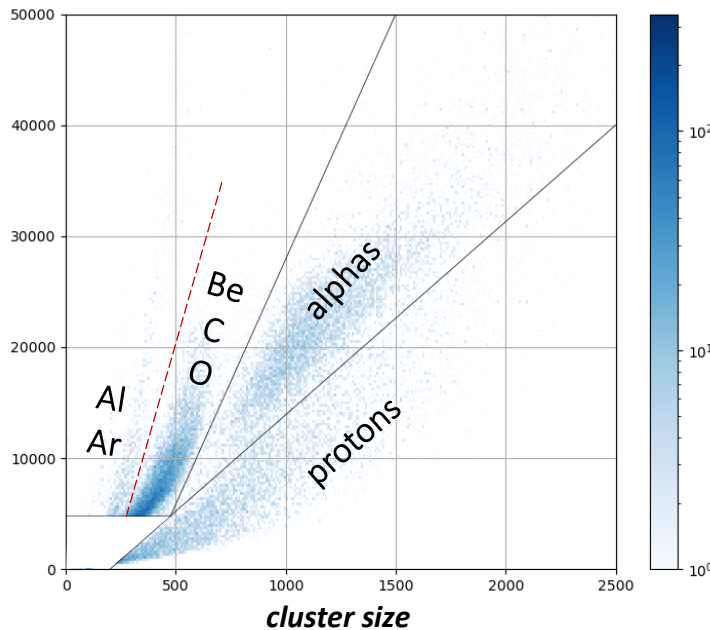
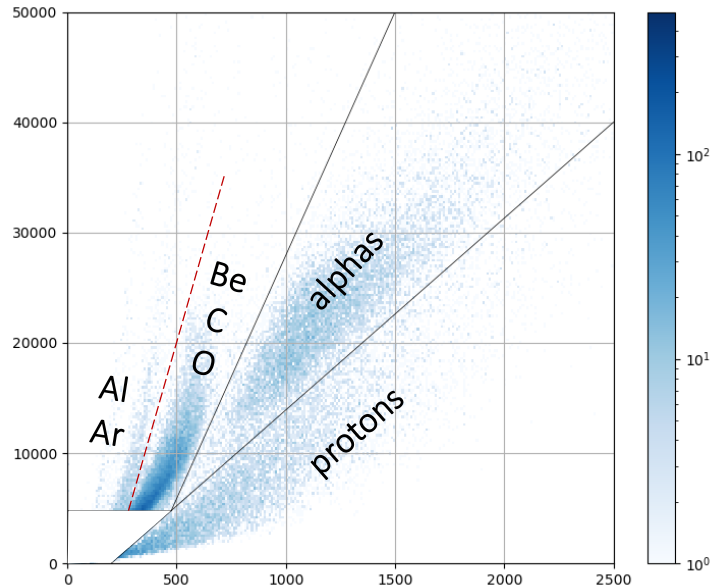
Roundness (Rnd): frazione tra Cluster Size e l'area della circonferenza di diametro pari alla distanza dei pixel più distanti nel cluster (consente di identificare i cluster di forma più circolare)



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



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



Si possono distinguere anche 2 famiglie di ioni

graphite	protons [%]	alphas [%]	heavy ions [%]	Total [%]
con bersaglio	4.7	6.4	7.7	18.8
senza bersaglio	4.4	5.8	6.9	17.1

La discriminazione delle particelle (protoni, alfa e ioni) avviene fino ad un **valore minimo di 0.1 MeV**

*Misura della distribuzione di ^{10}B con
Quad Timepix3 per la BNCT*

Misura della distribuzione di ^{10}B con Quad Timepix3



2008

Neutron autoradiography imaging of selective boron uptake in human metastatic tumours

S. Altieri^{a,b,*}, S. Bortolussi^{a,b}, P. Bruschi^a, P. Chiari^a, F. Fossati^a, S. Stella^a, U. Prati^c, L. Roveda^c, A. Zonta^d, C. Zonta^d, C. Ferrari^d, A. Clerici^d, R. Nano^e, T. Pinelli^{a,b}

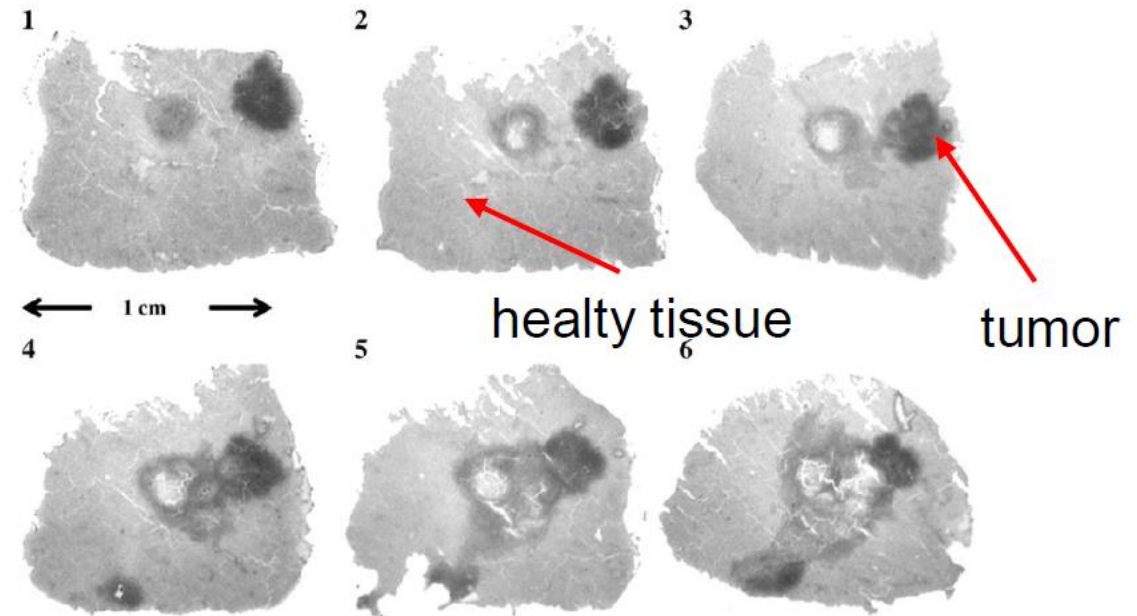
Sequenza di immagini di radiografie neutroniche di un nodulo di fegato umano tagliato ogni 40 μm . L'evoluzione del tumore e della necrosi sono chiaramente visibili man mano che ci si sposta in profondità nel nodulo (immagini da 1 a 6).

Immagine realizzate usando film CN85 non più in produzione.

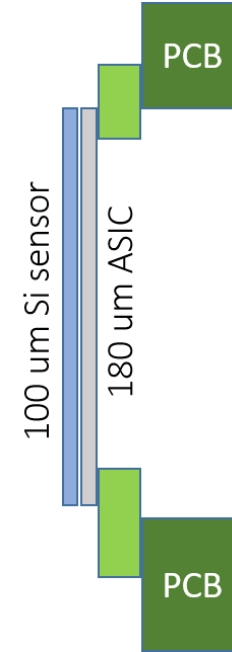
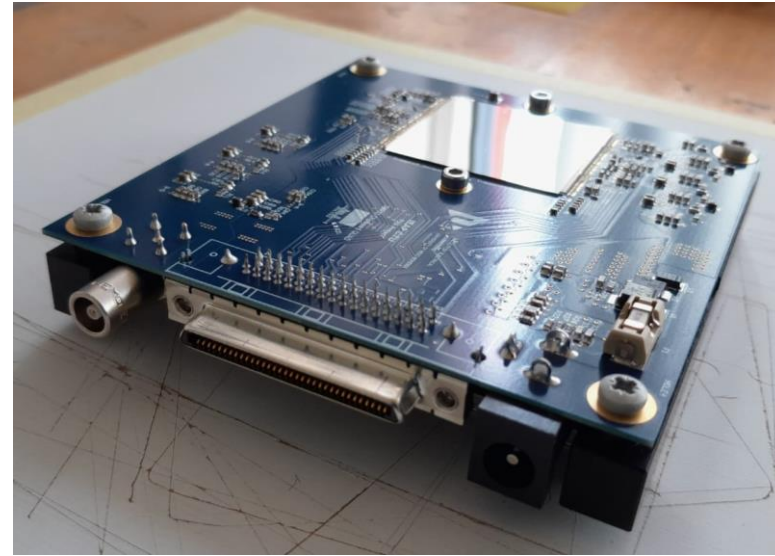
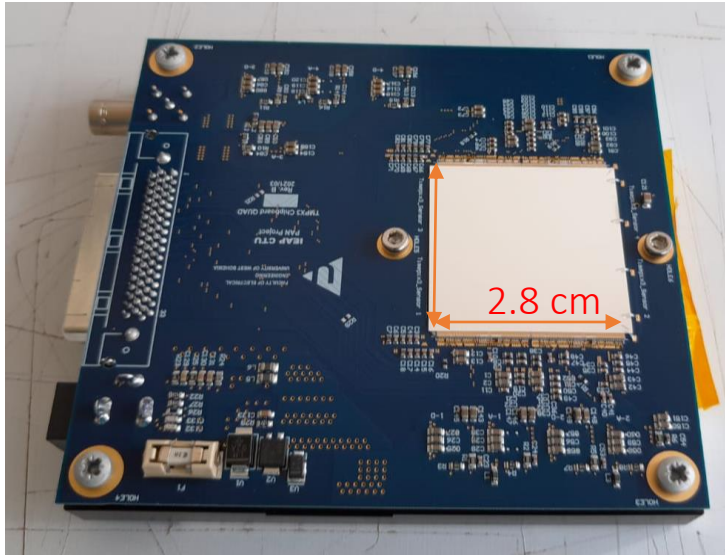
L'imaging adesso si può effettuare anche con il CR39 ma la procedura è lunga e la spettroscopia molto difficile.

I primi test sono stati effettuati presso il reattore TRIGA di Pavia nel 2000 per misurare la concentrazione di Boro in tessuti cancerogeni iniettati con l'agente di trasporto BPA.

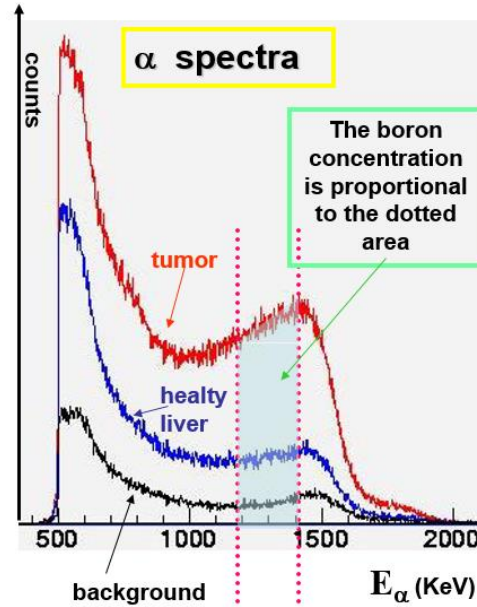
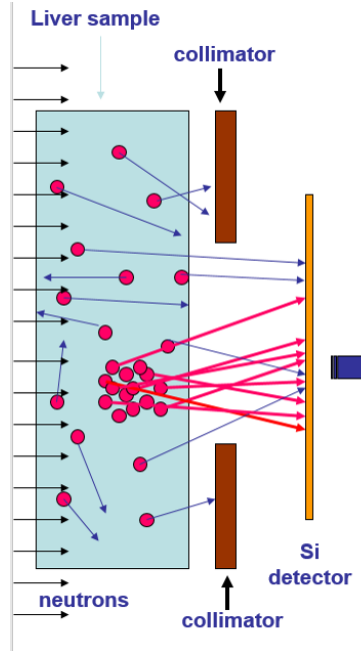
S. Altieri et al. / Applied Radiation and Isotopes 66 (2008) 1850–1855



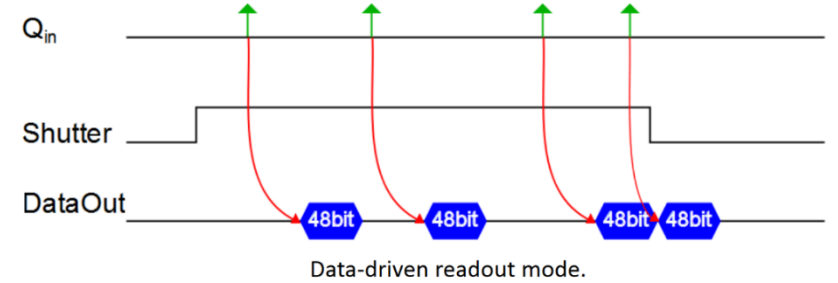
QUAD TIMEPIX3 CON SILICIO DA 100 μm per misure di concentrazione di ^{10}B su tessuti per BNCT



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



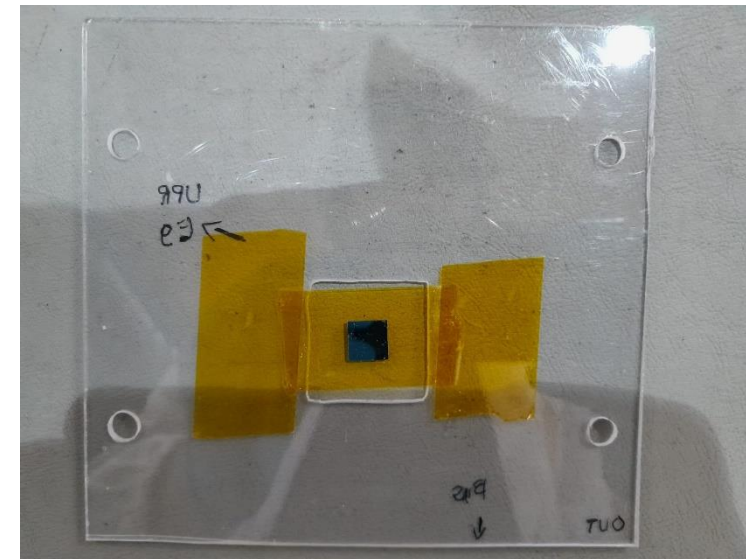
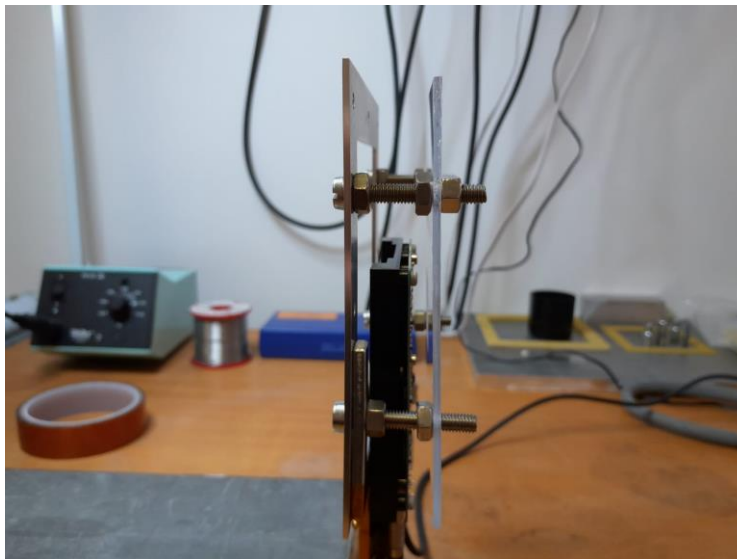
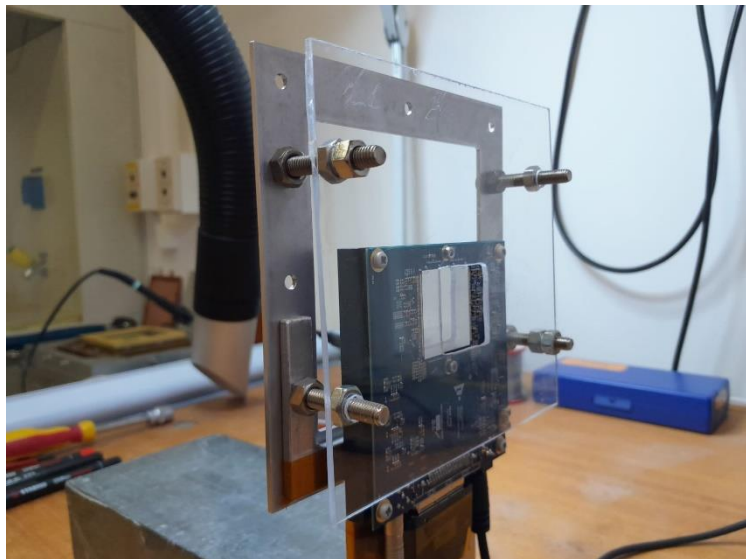
Modalità di lettura in data-driven



Il Timepix3 può acquisire *simultaneamente* in:

- ✓ Counting (medipix mode)
- ✓ Carica (Time over Threshold mode)
- ✓ Tempo (Time of Arrival mode), risoluzione 1.6 ns

QUAD TIMEPIX3 CON SILICIO DA 100 μm per misure di concentrazione di ^{10}B su tessuti per BNCT (Aprile 2024)



Questa misura è stata effettuata su un campione di Si con una concentrazione nota di ^{10}B certificata NIST (10^{15} atoms/cm 2)

Parametri per l'identificazione delle tracce:

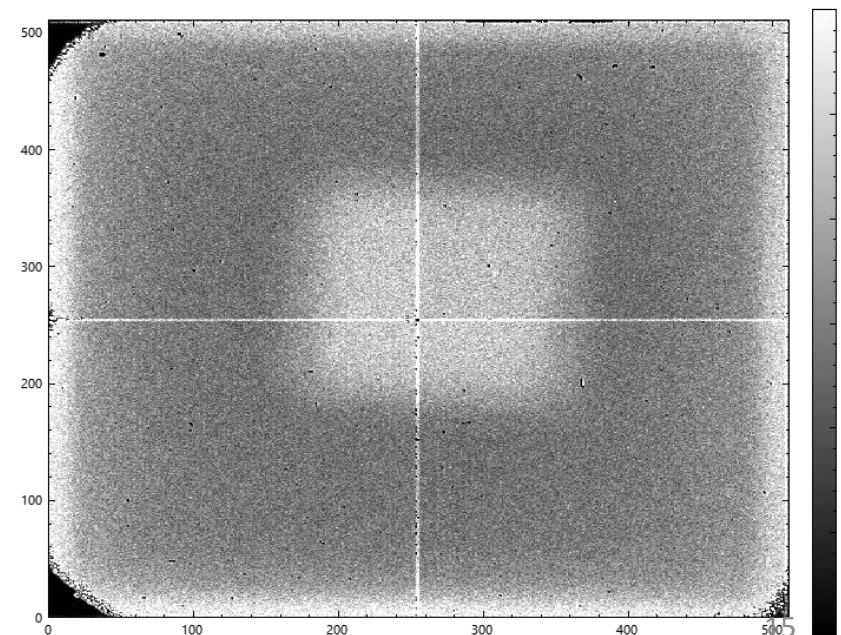
$1 < \text{cluster size} < 10$

$40 < \text{ToT volume} < 150$

$60\% < \text{Roundness} < 80\%$

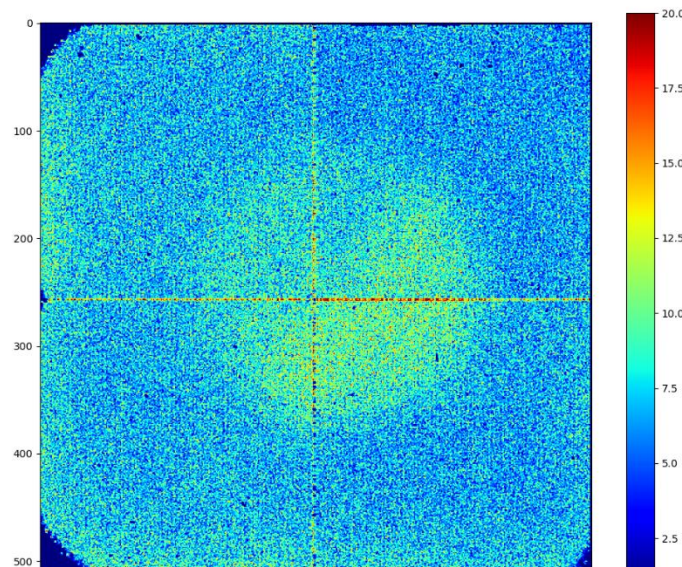
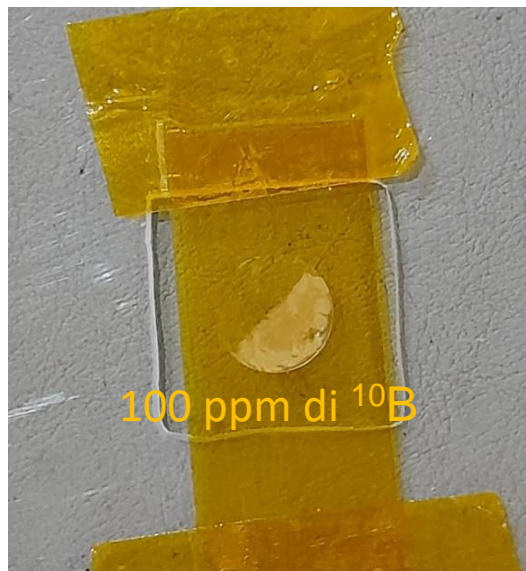
L'immagine è ottenuta dal cumulativo dei centroidi delle tracce selezionate

Rispetto alle prime misure effettuate col QUAD Timepix1, l'imaging del campione è notevolmente migliorata (tempo di irraggiamento: 15 min).



QUAD TIMEPIX3 CON SILICIO DA 100 μm per misure di concentrazione di ^{10}B su tessuti per BNCT (Aprile 2024)

campioni biologici (preparati di fegato spessi 60 μm)



Parametri di identificazione delle tracce:

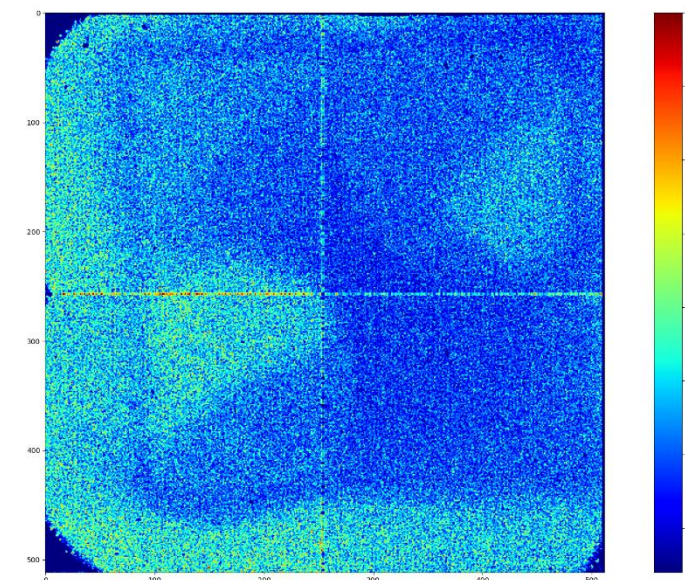
$2 < \text{cluster size} < 30$

$500 < \text{ToT volume} < 5000$ (energia $> 0.8 \text{ MeV}$)

$75 < \text{cluster height} < 1200$

$60\% < \text{Roundness} < 90\%$

In questo modo si sono selezionate energie delle alfa superiori a 0.8 MeV.



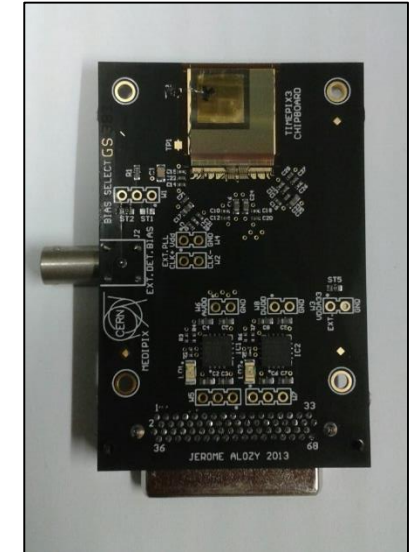
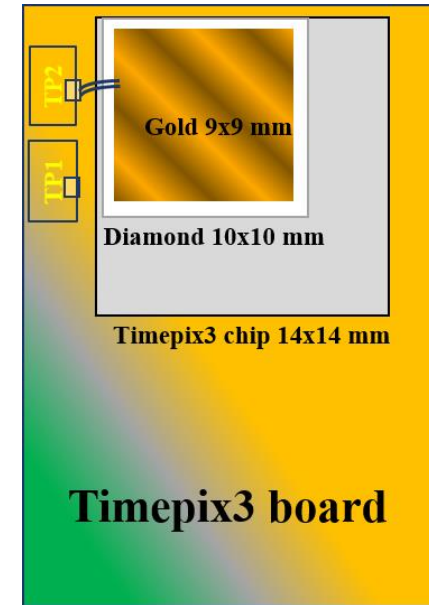
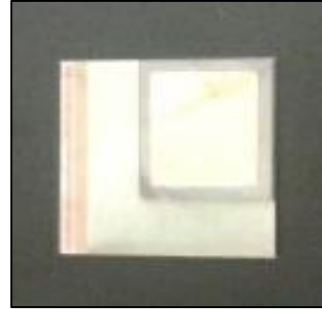
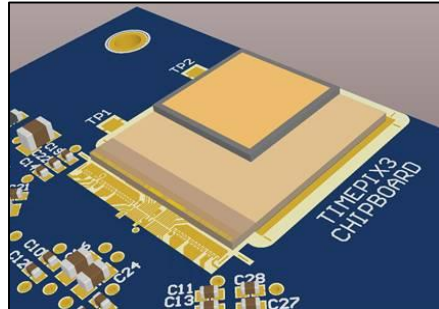
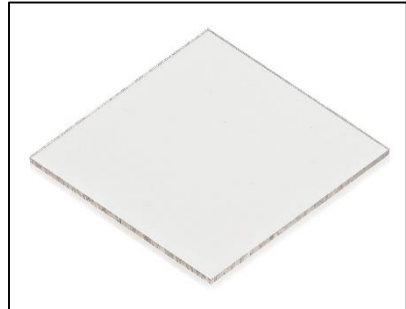
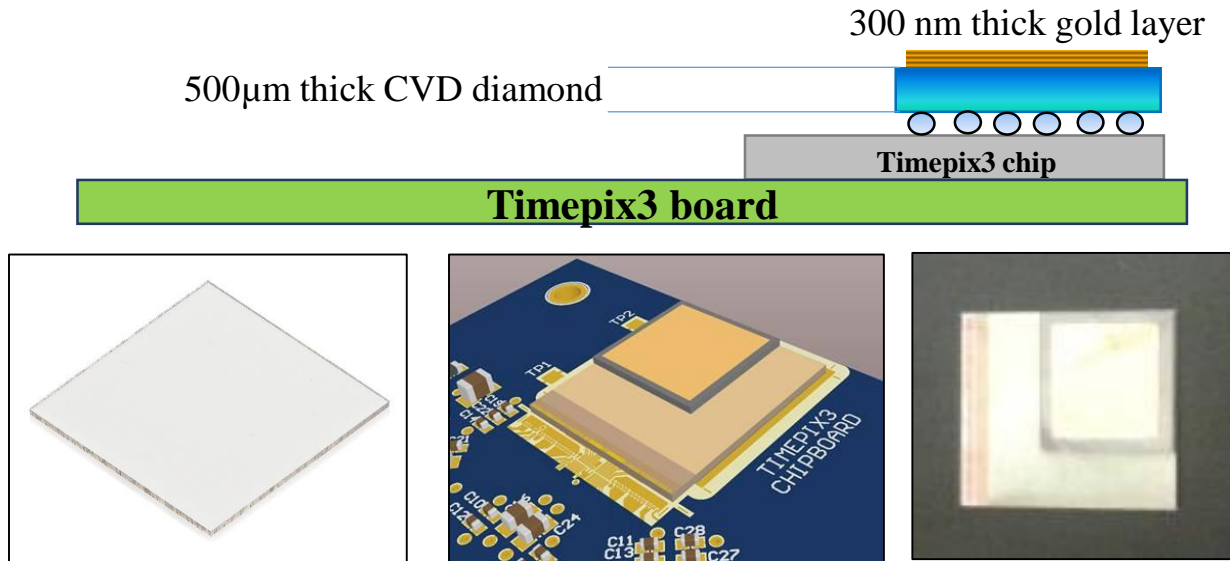
Le seguenti immagini si sono ottenute con irraggiamenti di circa 1 ora.

Sono chiaramente evidenti le aree corrispondenti ai campioni biologici.

Con le prossime analisi si potrà effettuare anche una stima della concentrazione di ^{10}B .

*Caratterizzazione di
un rivelatore al diamante basato su Timepix3*

Il rivelatore diamondpix per la rivelazione di neutroni veloci nella fusione nucleare

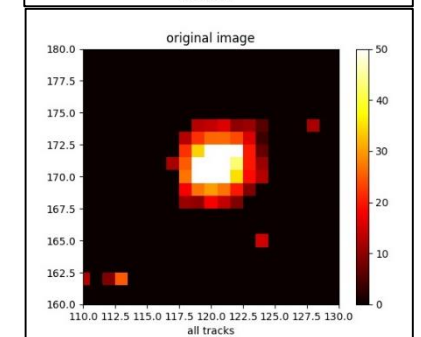
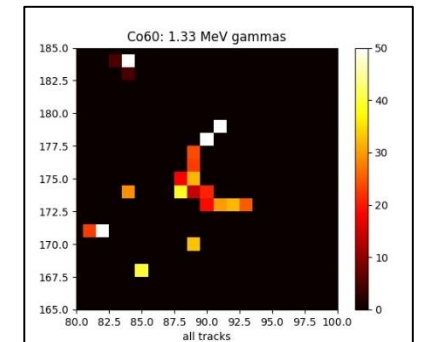
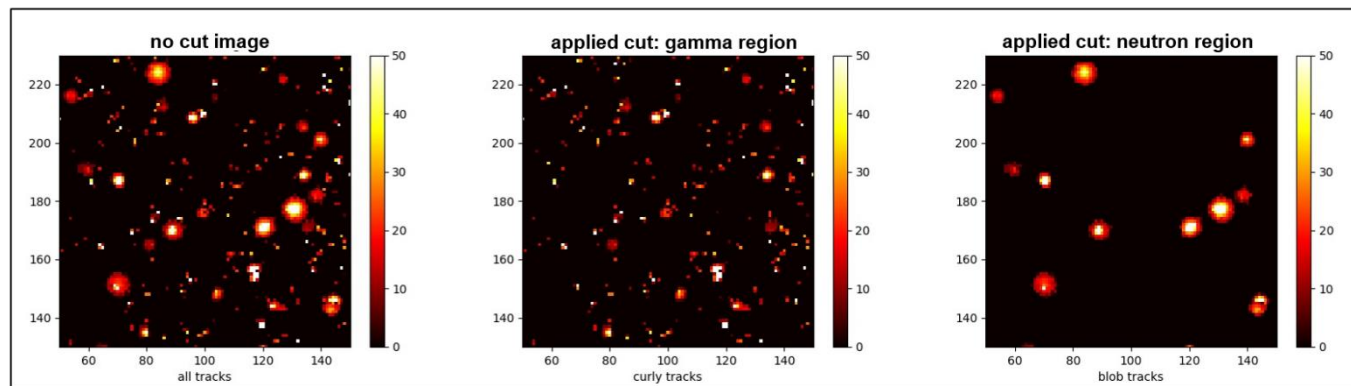
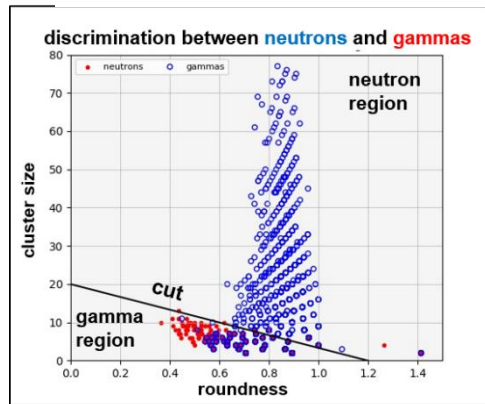


Un diamante policristallino CVD è stato accoppiato ad un ASIC Timepix3 tramite bump-bonding.

FNG facility, ENEA Frascati

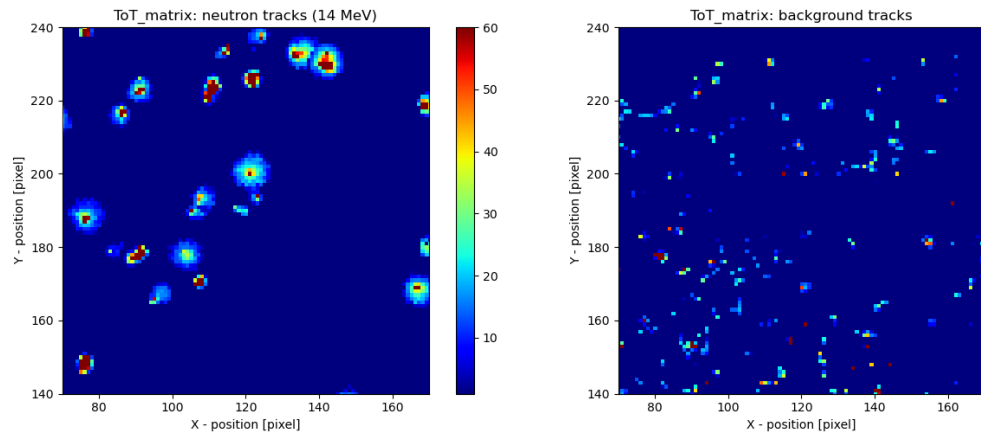
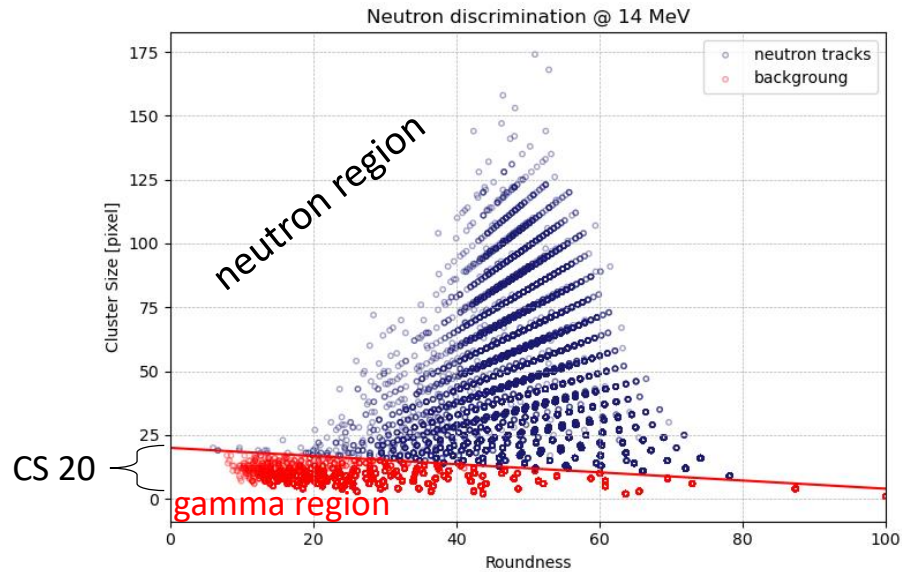
Neutrons discrimination against gammas

14 MeV neutrons

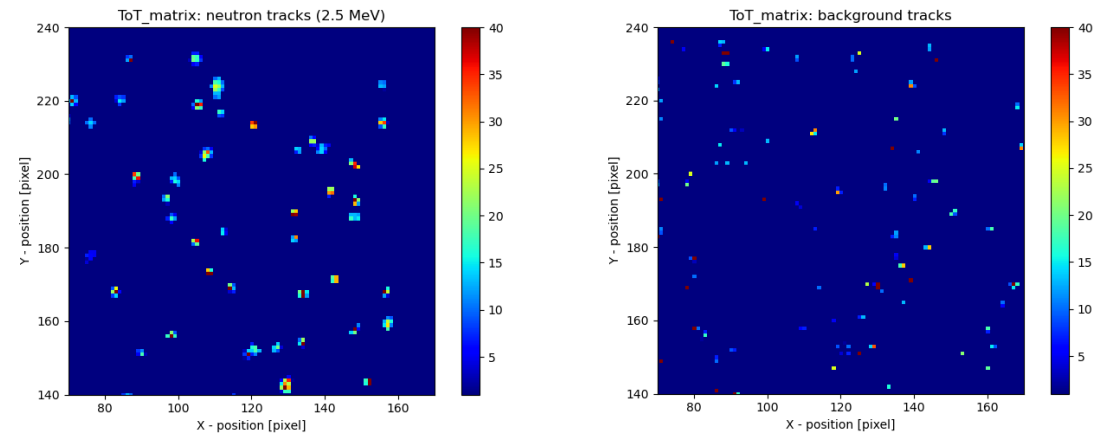
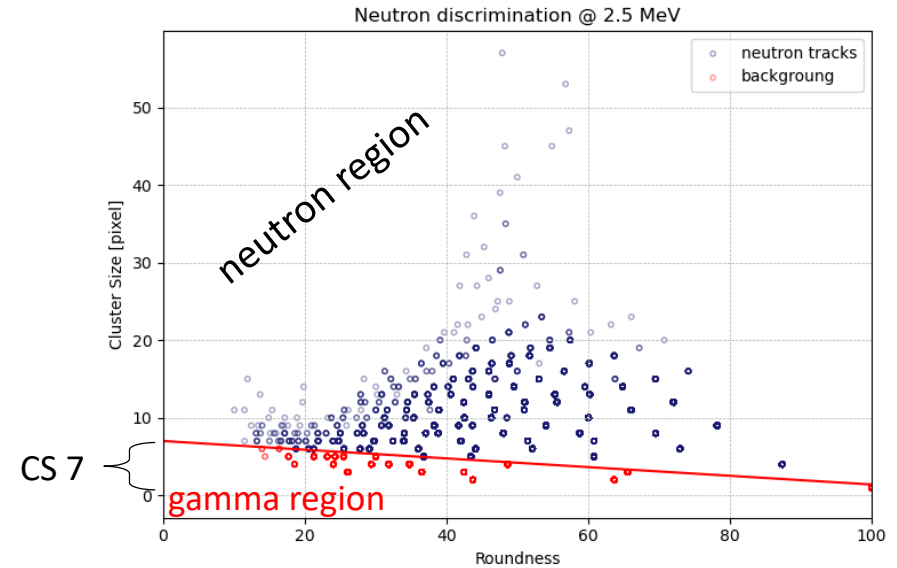


È stato realizzato un algoritmo che consente di selezionare le tracce in base ai parametri morfologici e alla carica rilasciata.

Misura dell'efficienza per neutroni a 14 e 2.5 MeV (facility FNG)



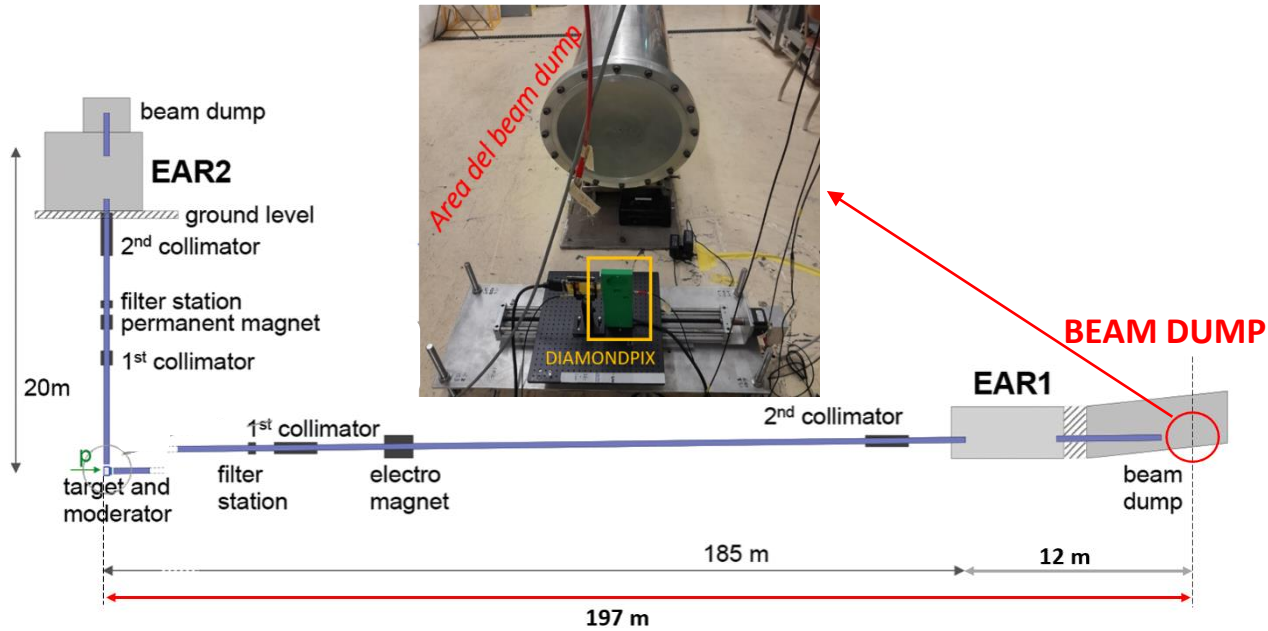
Effettuando uno scan sul flusso neutronico (da 6.0×10^8 to 1.6×10^{10} n/s) su FNG, è stato possibile effettuare una stima dell'efficienza a 14 MeV: **$2.5 \pm 0.1 \%$**



Effettuando uno scan sul flusso neutronico (da 2.1×10^8 to 2.5×10^8 n/s) su FNG, è stato possibile effettuare una stima dell'efficienza a 2.5 MeV: **$6.8 \pm 0.5 \%$**

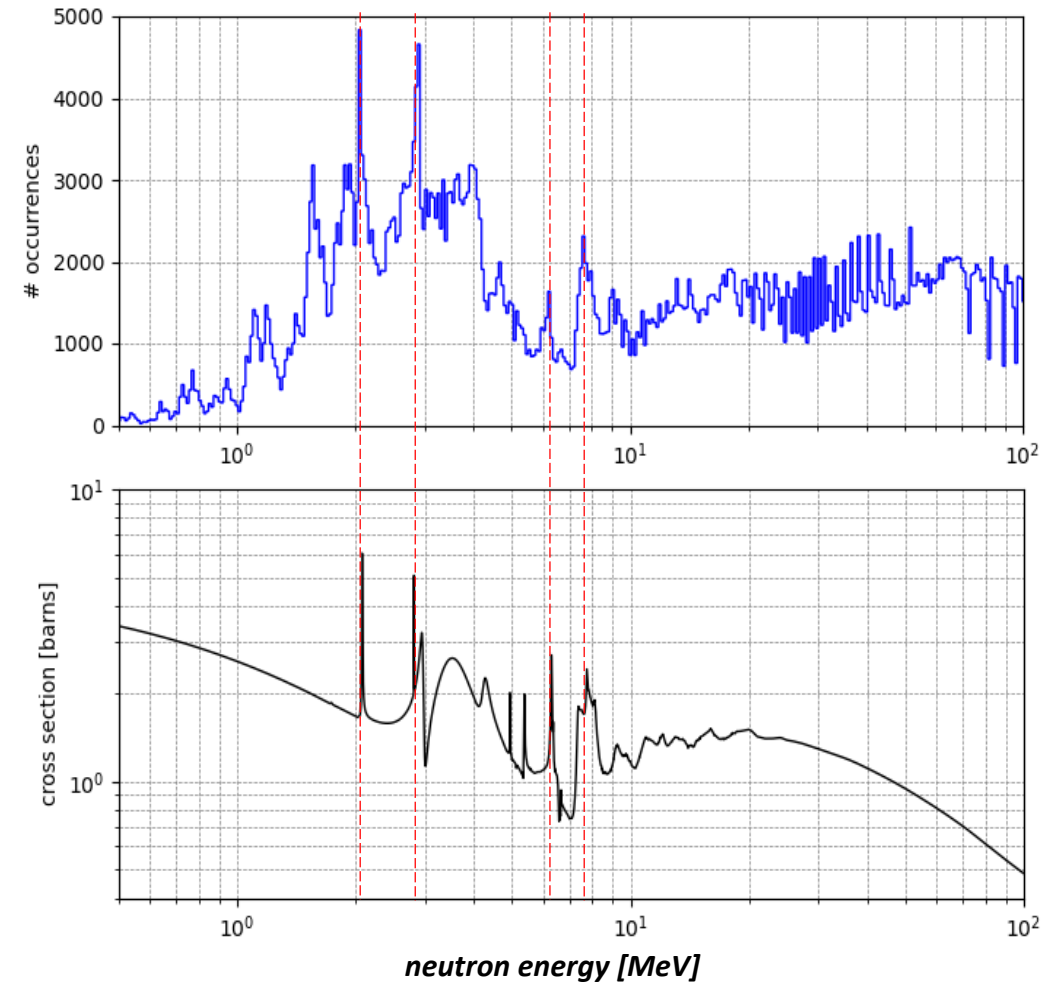
Misure in tempo di volo nella DUMP AREA dell'impianto n_TOF

Schema sperimentale dell'impianto n_TOF



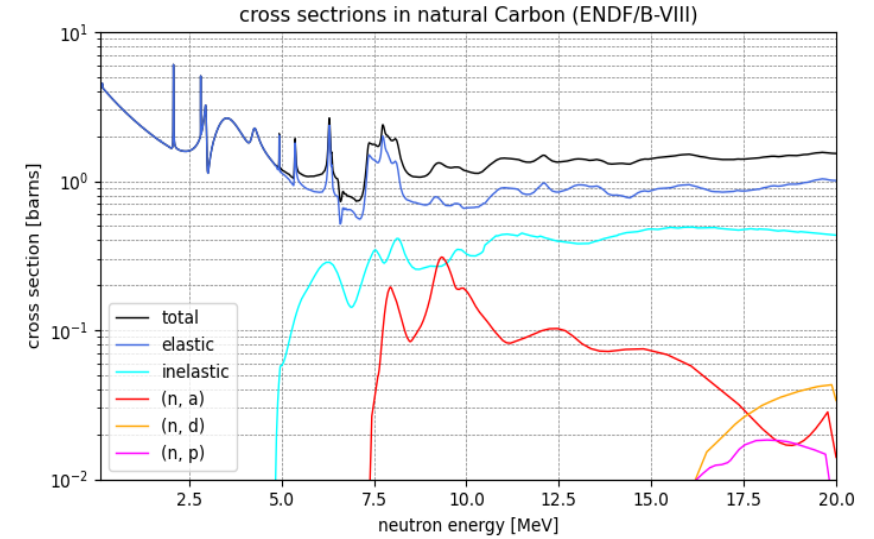
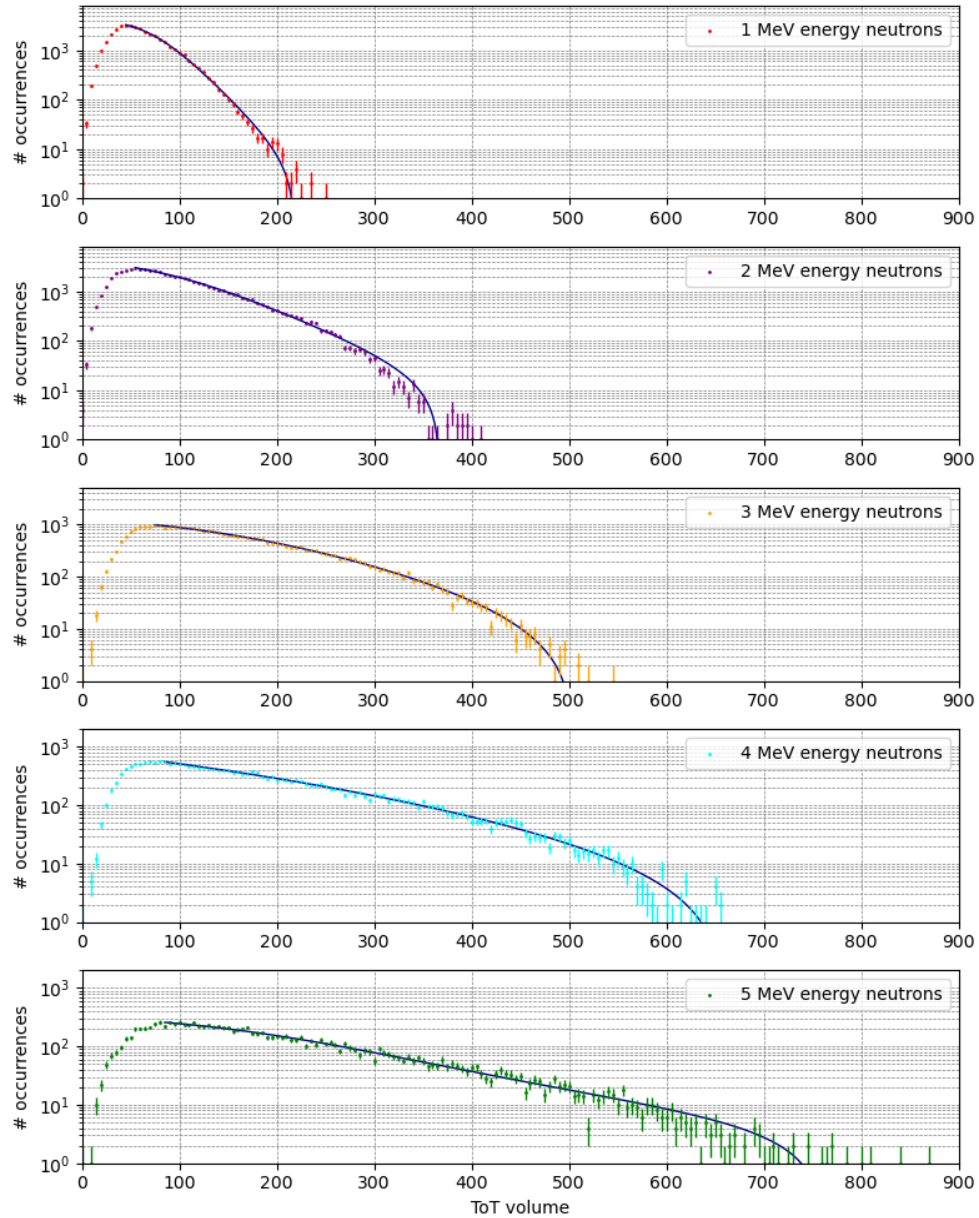
PARAMETRI DI ACQUISIZIONE

- TPX3 è stato gestito con il **modulo katherine**
- DATA-DRIVEN MODE
- MODO DI ACQUISIZIONE: ToT & ToA (carica e tempo)
- Finestra temporale di acquisizione: 150 ms (1 GeV – 10 meV)

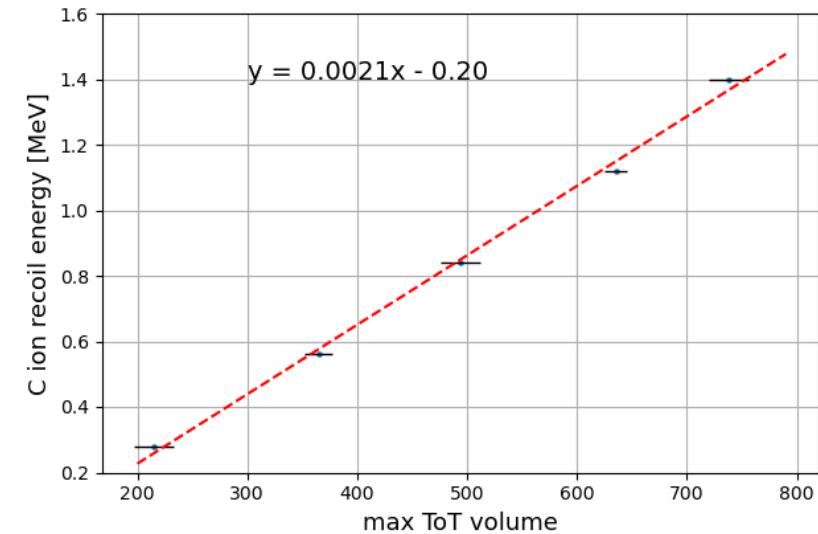


Alcuni dei picchi ottenuti con lo spettro in tempo di volo corrispondono alle **risonanze caratteristiche del carbonio**. Questo risultato conferma anche la corretta ricostruzione dello spettro neutronico e consente di selezionare correttamente le energie di interesse.

Calibrazione in energia presso l'impianto n_TOF

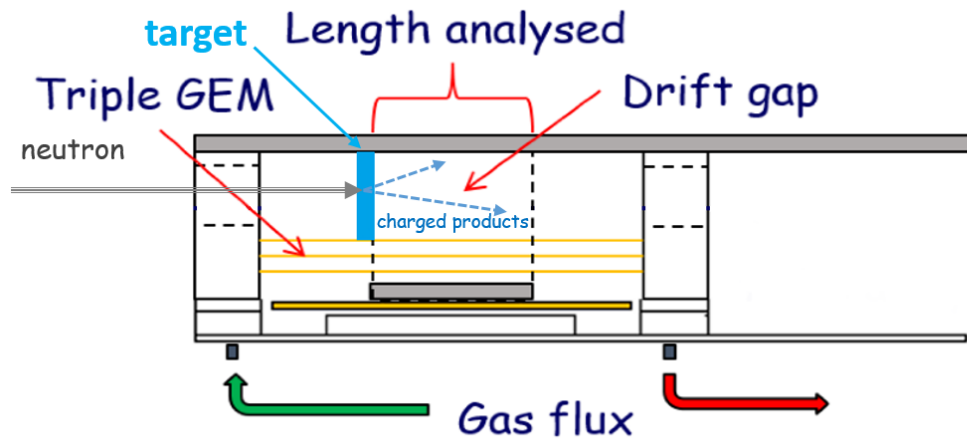
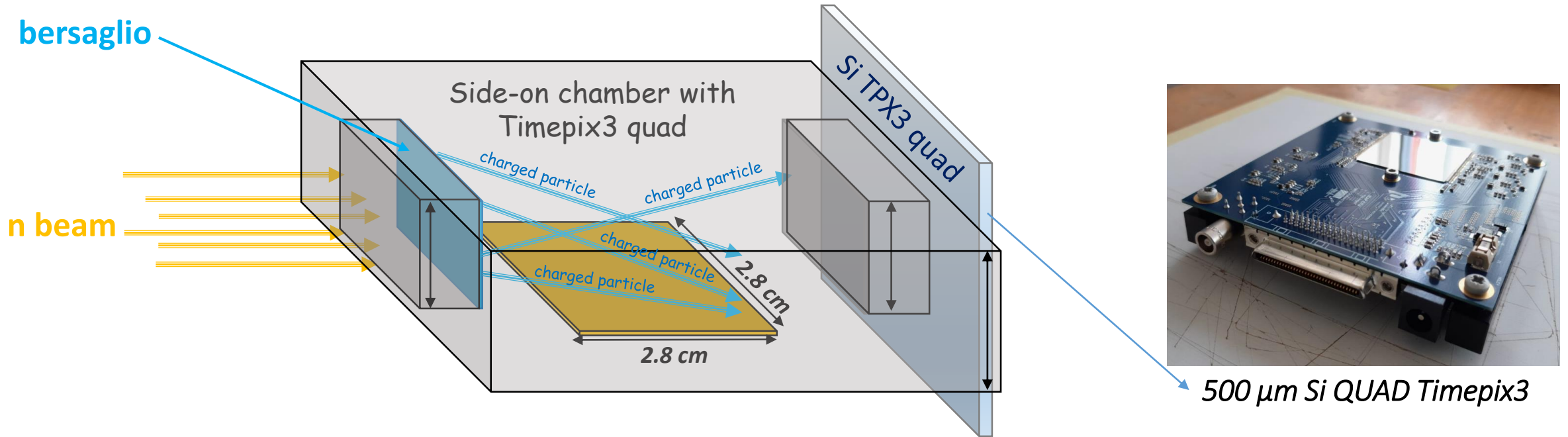


La curva di calibrazione è stata ottenuta dall'energia massima di rinculo degli ioni carbonio con energie dei neutroni minori di 5 MeV per evitare l'apertura di altri canali di reazione.



*Sistema combinato con
camera GEMpix3 side-on e QUAD Timepix3*

Sistema combinato con GEMpix3 SIDE-ON e QUAD TIMEPIX3 da 500 μm

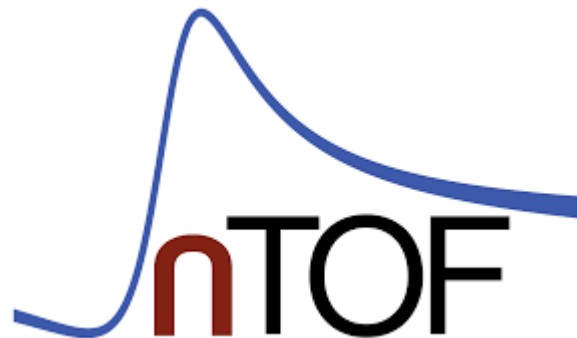


Side-on GEM detector con lettura quad TPX3:

- Alta risoluzione spaziale (512×512 pixels da 55×55 μm^2)
- Possibilità di ricostruzione 3D delle tracce
- Volume di gas più grande (2.8×2.8×2 cm^3)

Conclusioni

- I primi risultati ottenuti con GEMPIX per la misura dei prodotti di reazione di bassa energia (0.5 – 2.0 MeV) stanno fornendo risultati incoraggianti: non solo si identificano alpha e protoni ma anche ioni fino ad energie di 0.1 MeV.
- Per prodotti di reazione di più alta energia si sta caratterizzando un nuovo quad Timepix3 al Si di spesso 500 μm . In più si realizzerà un nuovo GEMPIX con lettura QUAD TPX3 che consentirà di associare tempo e carica ad ogni traccia permettendo di sfruttare al meglio le misure in tempo di volo.
- L'attività sulla BNCT continuerà in collaborazione con il laboratorio LENA di Pavia per studiare ulteriormente la distribuzione di B nei tessuti soprattutto a basse concentrazioni.
- Il lavoro effettuato sul diamante dimostra come rivelatori di questo tipo possano essere utilizzati efficacemente nello studio di processi DD o DT in ambiti diversi rispetto alla fusione a confinamento magnetico come avviene ad esempio con i laser di alta potenza.
- Di recente il nostro gruppo ha partecipato alla misura di neutroni da 2.45 MeV prodotti dall'interazione di un laser di alta potenza su bersagli plastici deuterati presso la facility ELI Beamlines. In questo caso, oltre al diamante, si è utilizzato anche un QUAD TPX3 con convertitore plastico. I dati sono in fase di analisi.
- La capacità del GEMPIX di misurare ioni può essere sfruttata in altri processi che comportano la produzione di ioni su bersagli colpiti da laser di alta potenza.



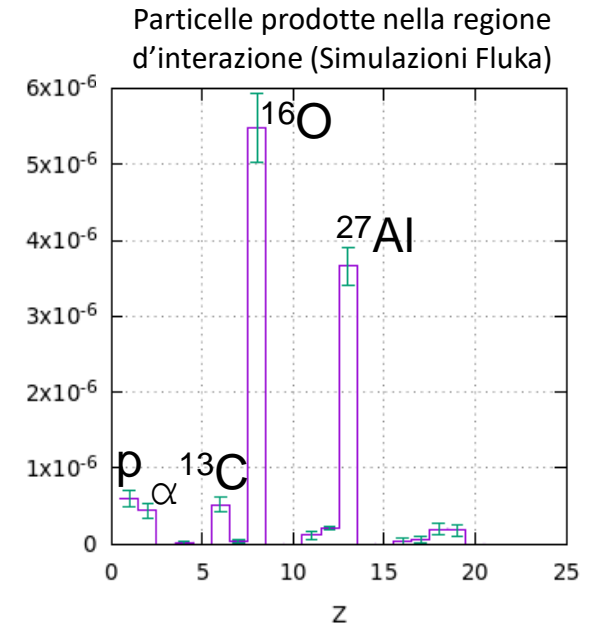
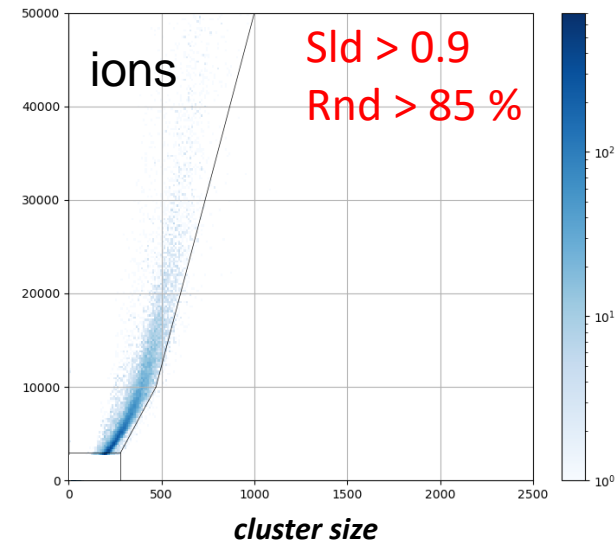
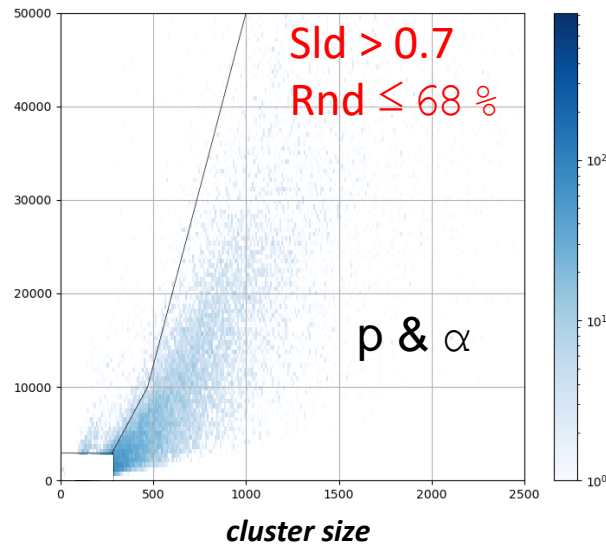
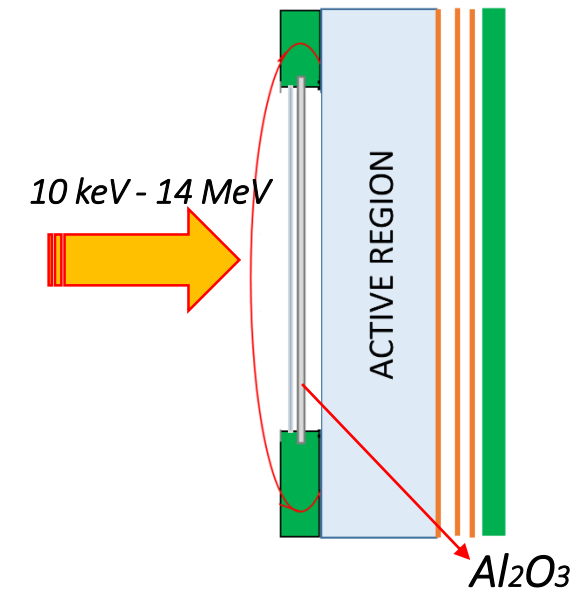
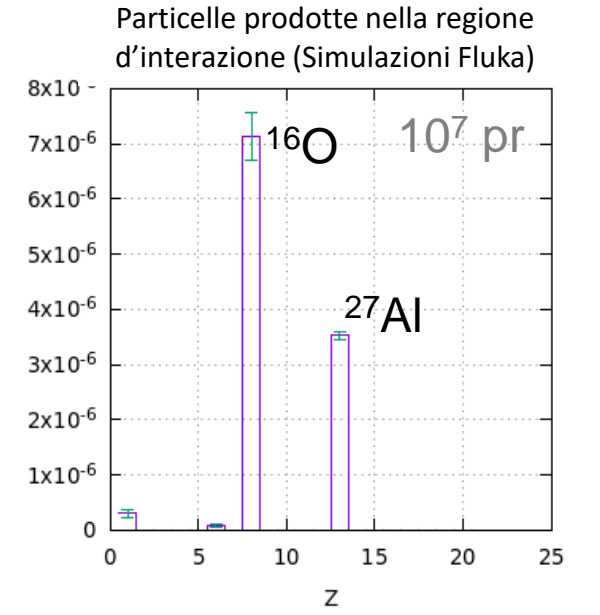
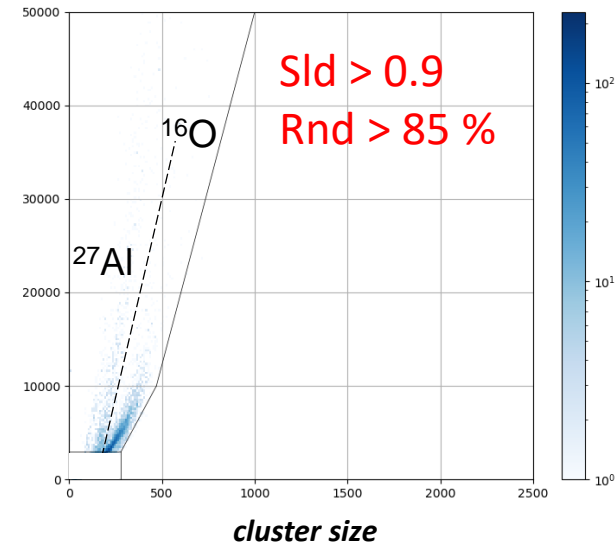
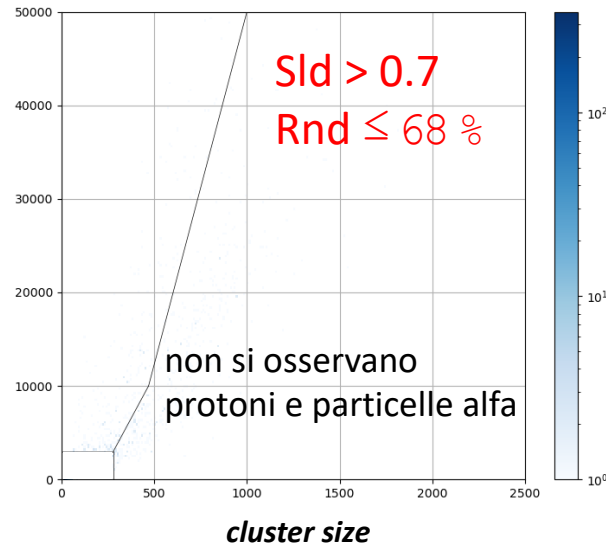
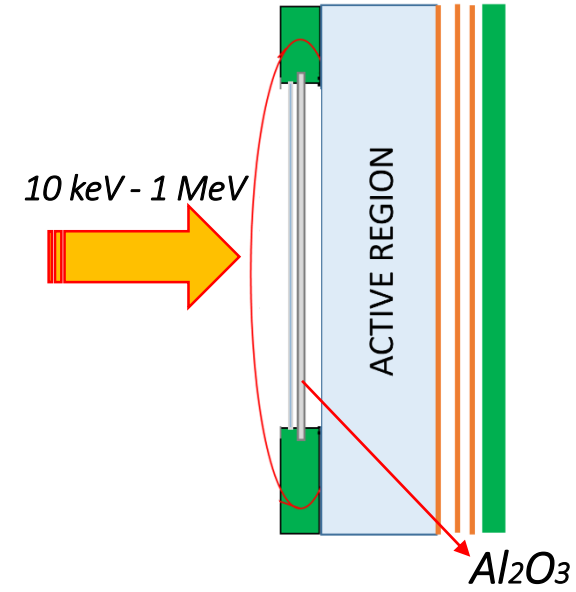
GRAZIE PER L'ATTENZIONE!!!

ANAGRAFICA

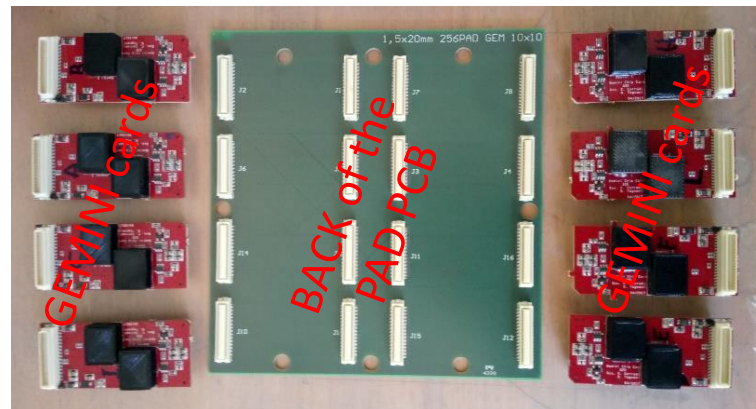
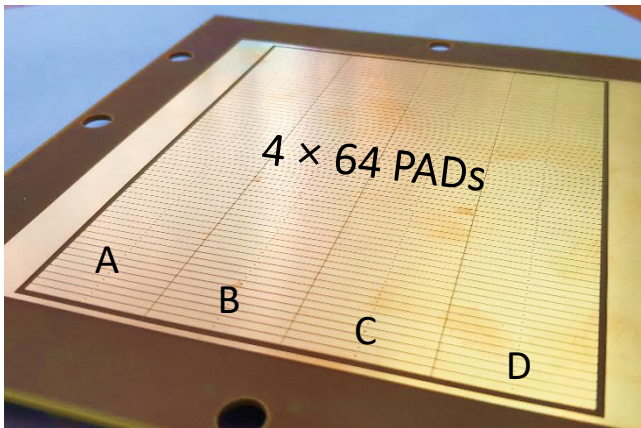
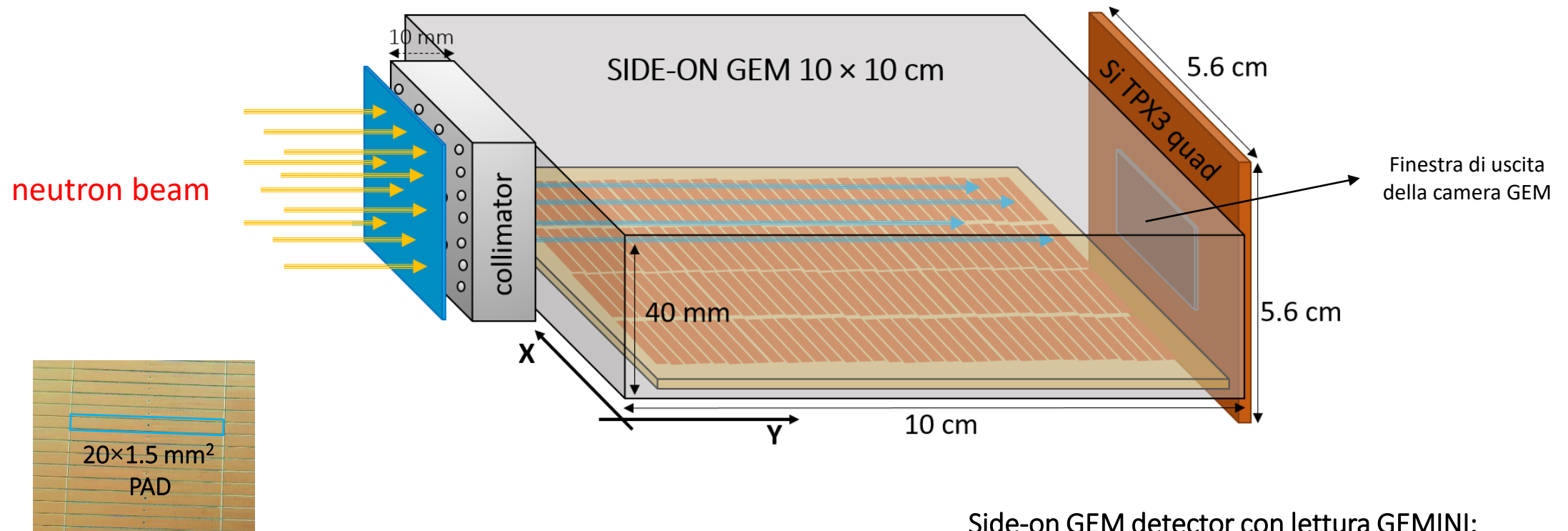
Nome	Contratto	Qualifica	Ente appartenenza	%	Commissione di afferenza
Gerardo Claps	Associazione scientifica con incarico di ricerca	Ricercatore confermato	ENEA Frascati	50	CSN III
Nicholas Terranova	Associazione scientifica	Ricercatore confermato	ENEA Frascati	50	CSN III
Antonino Pietropaolo	Associazione scientifica	Ricercatore confermato	ENEA Frascati	20	CSN V
Antonella Tamburrino	Associazione tecnologica	Assegno di Ricerca ENEA	ENEA Frascati	80	CSN III
Silvia Tosi	Associazione scientifica	Dottoranda	Università degli Studi Roma Tre	100	CSN III

BACKUP SLIDES

GEMpix @ n_TOF per la misura dei prodotti di reazione bersaglio di Allumina (Al_2O_3)



Sistema combinato con GEM 10x10 cm SIDE-ON e QUAD TIMEPIX3 da 500 um



Side-on GEM detector con lettura GEMINI:

- ✓ Bassa risoluzione spaziale, almeno lungo la coordinata X (4×64 pad da 1.5×5 mm²)
- ✓ Volume di gas più grande (10×10×4 cm³)
- ✓ Possibilità di ricostruire il picco di Bragg completo per le particelle più energetiche