



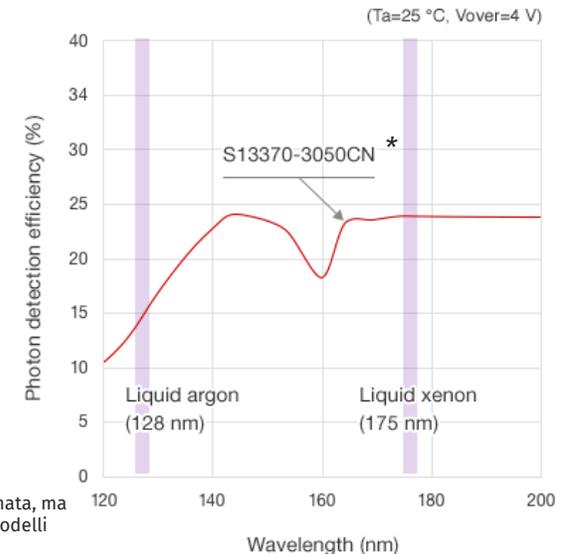
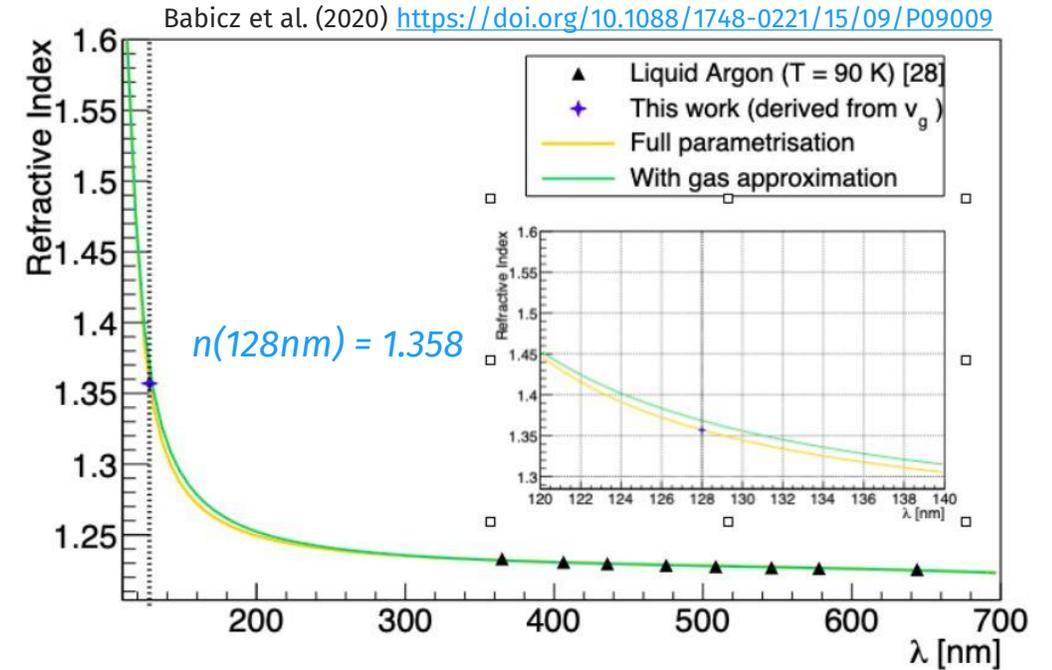
# IMAGING CON LENTI IN LAr: STATO DELLE SIMULAZIONI

Meeting annuale collaborazione nazionale DUNE  
Bologna, 11-12 Novembre 2021

Matteo Vicenzi, Lea Di Noto, Alessio Caminata, Simone Copello, Bianca Bottino, Marco Pallavicini

# Sfide per l'imaging VUV...

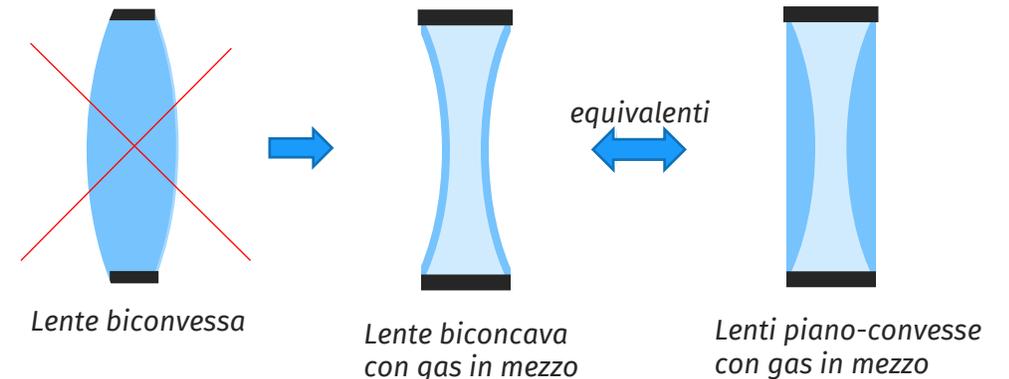
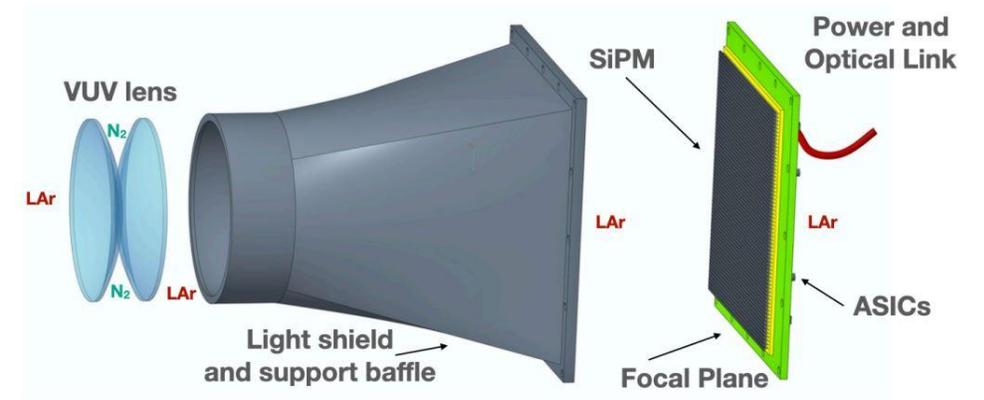
- **Trasmittanza a 128 nm:** pochi materiali trasparenti VUV ( $\text{MgF}_2$ , ...), incognita costruttiva e compatibilità con LAr.
- **Efficienza SiPM:** bassa a 128nm (~10-15%), anche per i modelli VUV.
- **Indici di rifrazione:** Materiali tipici (~1.4) sono simili a LAr. Difficoltà a progettare l'ottica.
- **Fuoco:** Il fuoco sarà fisso, ma è necessario coprire tutto il range di distanze atteso (~1 m).



\* PDE riportata qui da Hamamatsu è sovrastimata, ma l'andamento è comunque indicativo di altri modelli (<https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.096>)

# ...e ipotesi di soluzione

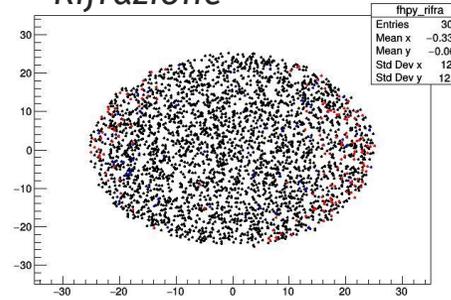
- **Doping Xe-LAr: luce 175nm, sufficienti ~10ppm di Xe.**
  - Maggiore disponibilità di materiali: *UV-grade Fused Silica*
  - Maggiore efficienza quantica per i SiPM (~20-25%)
  - Maggiore resa in luce (?), ...
- **Lenti a “gas”:** al posto di una lente biconvessa, lenti biconcave a “gas”. L’interfaccia che compie lavoro ottico è quella con il gas interno.
- **Sistema complementare:** lenti presbiti, visibilità a piccole distanze coperta da lente sul lato opposto.



# Focale e parametri

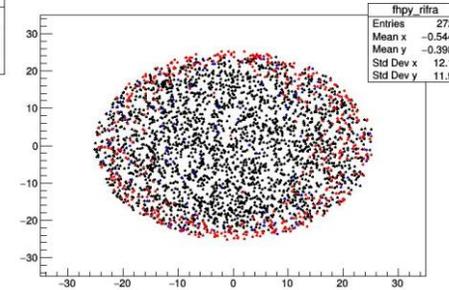
- Guardare lontano predilige lunghezze focali grandi:
  - Maggiore dinamica nella profondità di campo accessibile
  - Richiede curvature minori quindi meno riflessioni e riflessioni totali (più luce/diametro efficace maggiore)
- Fissata la focale, variare la distanza lente-sensore ( $b$ ) permette di scegliere la messa a fuoco
  - Se  $b$  aumenta, si focalizza vicino, ma si riduce la profondità di campo.

Rif. Totale  
Riflessione  
Rifrazione

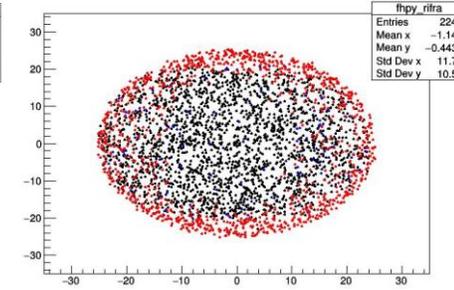


$f = 89 \text{ mm}$

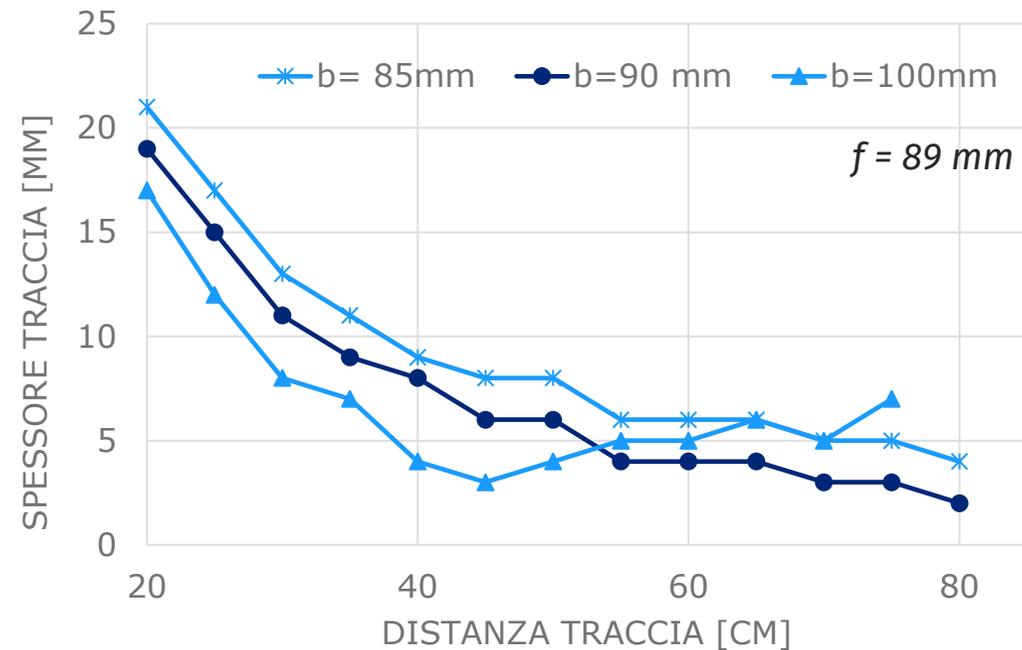
Diametro: 50mm



$f = 70 \text{ mm}$

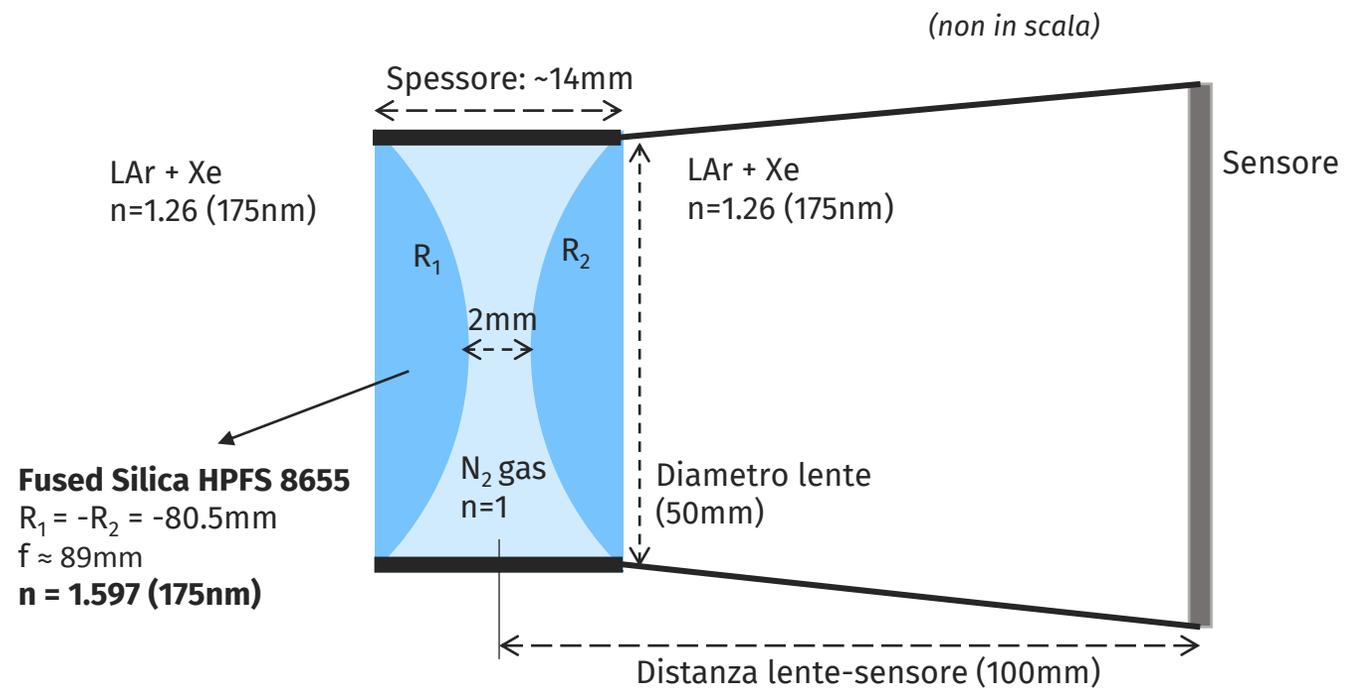


$f = 61 \text{ mm}$

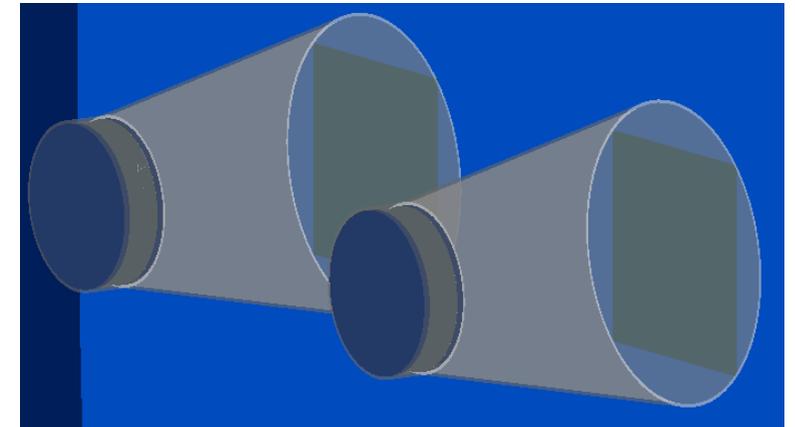
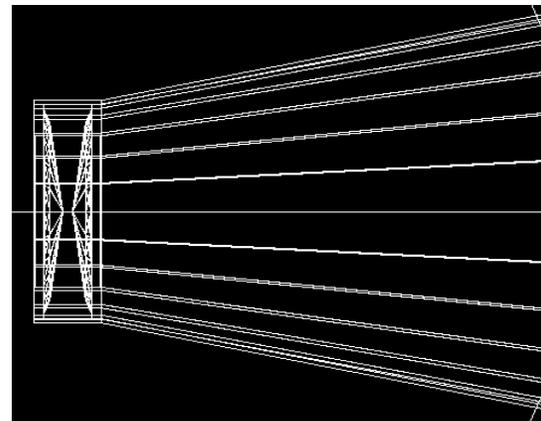


# Geometria

- LAr+Xe (175nm,  $n=1.26$ ): Fused Silica con trasmissione  $>99\%/cm$
- Lenti biconcave a «gas» ( $N_2$ ): il lavoro ottico avviene all'interfaccia tra  $n=1.59$  e  $n=1$
- Simulazione ottica GEANT4 (riflessione e rifrazione), a partire dai depositi di energia di EDepSim/Fluka.



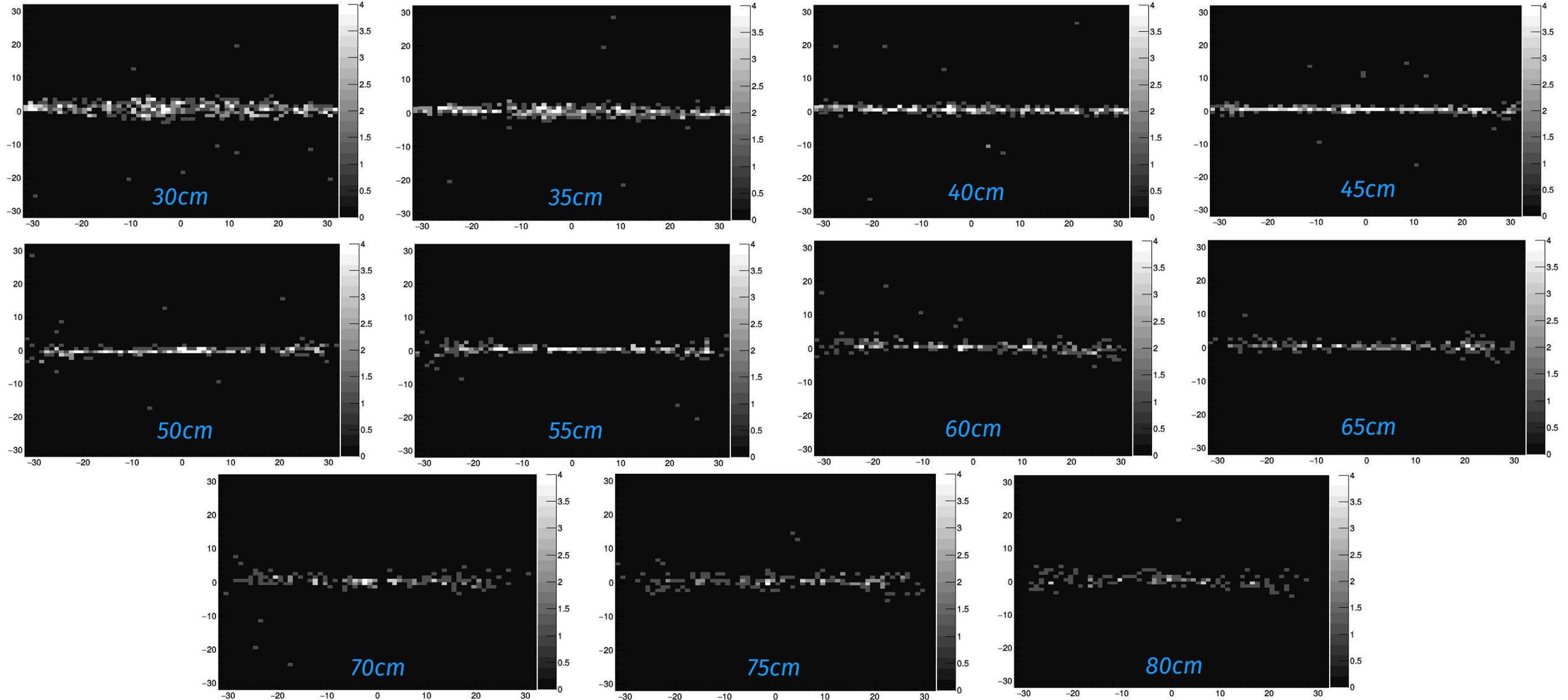
Implementazione in GEANT4:



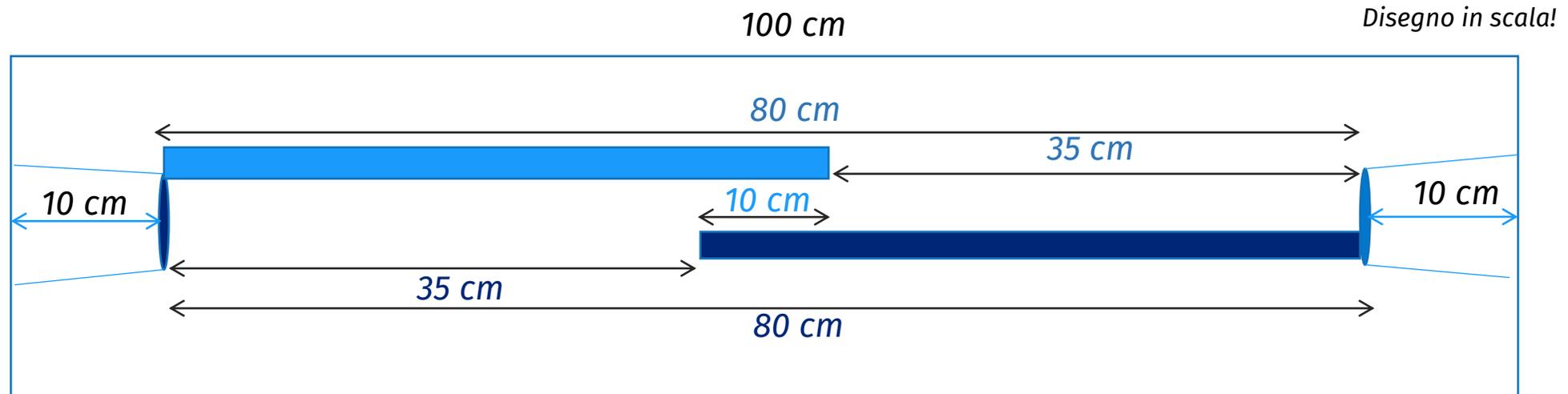
# Tracce a diverse distanze

Traccia di 40cm  
175 nm  
LY: 40000 ph/MeV

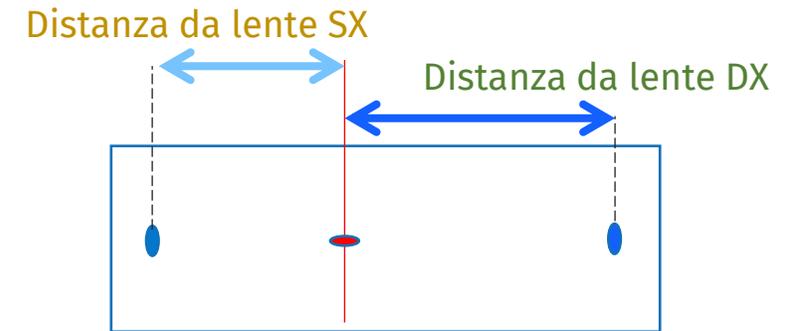
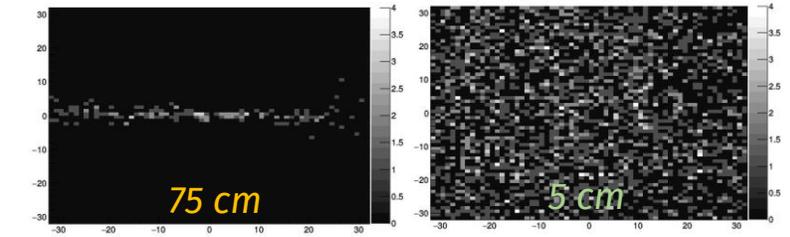
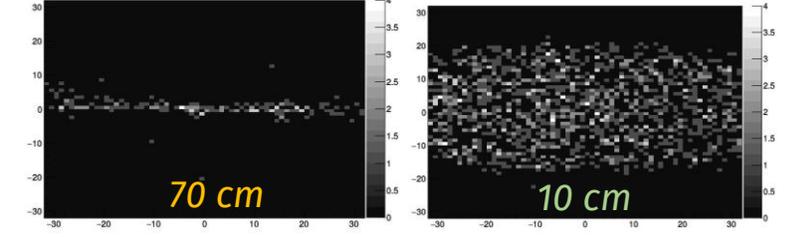
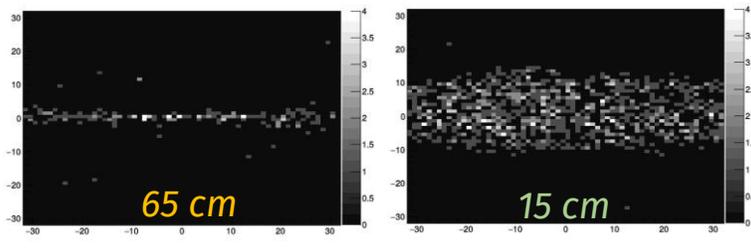
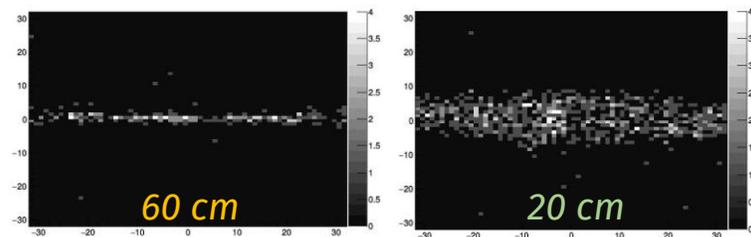
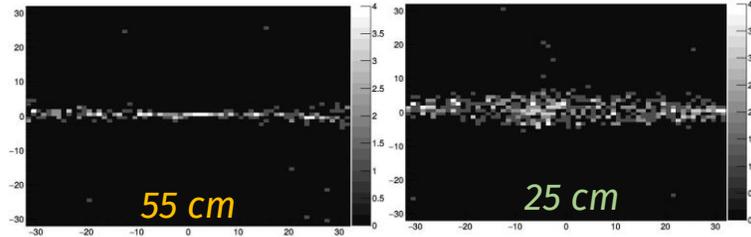
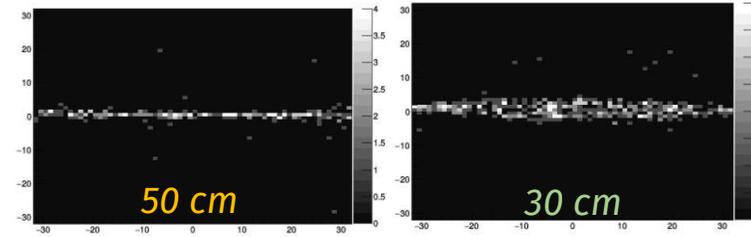
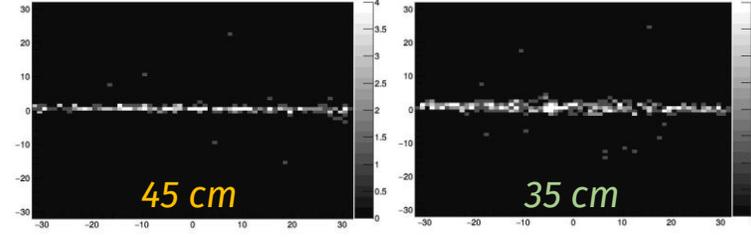
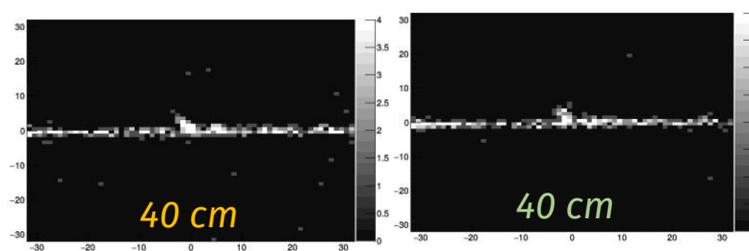
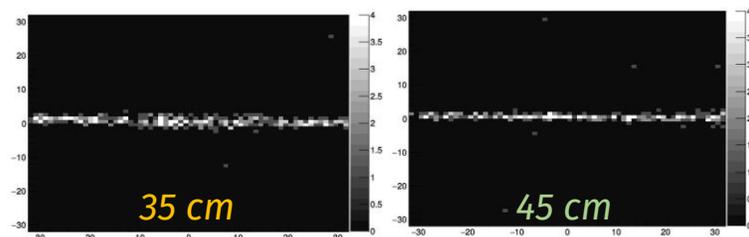
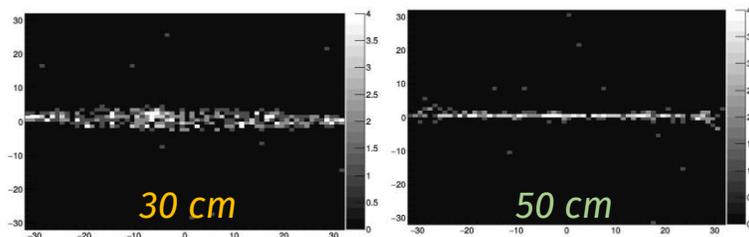
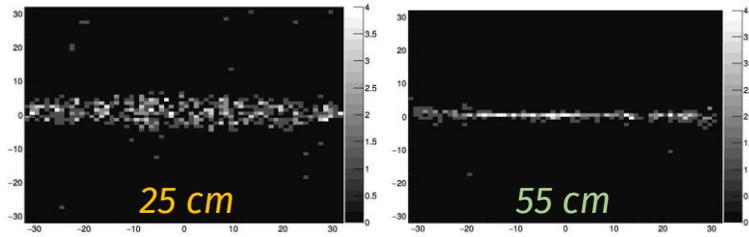
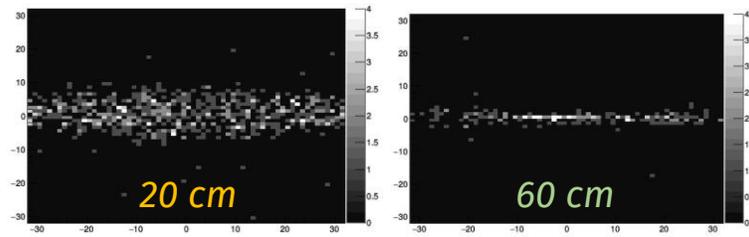
Sensore 64x64  
SiPM 1mm<sup>2</sup>  
SiPM QE: 20%



# Configurazione: lenti complementari



- **Profondità di campo:** traccia «accettabile» tra 35cm (spessore < 5mm) e 80cm (inizia a mancare luce, traccia si sfalda) dalla lente.
- Due lenti possono essere accoppiate una di fronte all'altra: permettono di coprire, con parziale sovrapposizione al centro, 80 cm in un modulo di 1 metro.

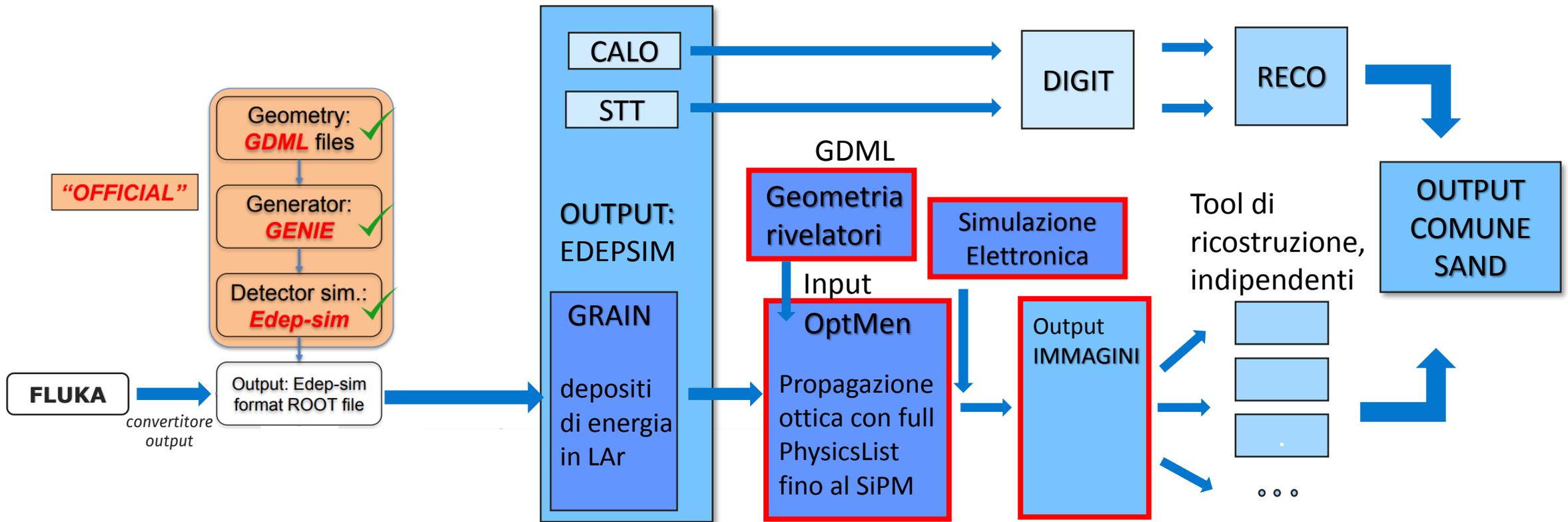


Sensore 64x64  
SiPM 1mm<sup>2</sup>  
SiPM QE: 20%

Traccia di 40cm  
175 nm  
LY: 40000 ph/MeV

# Simulazione

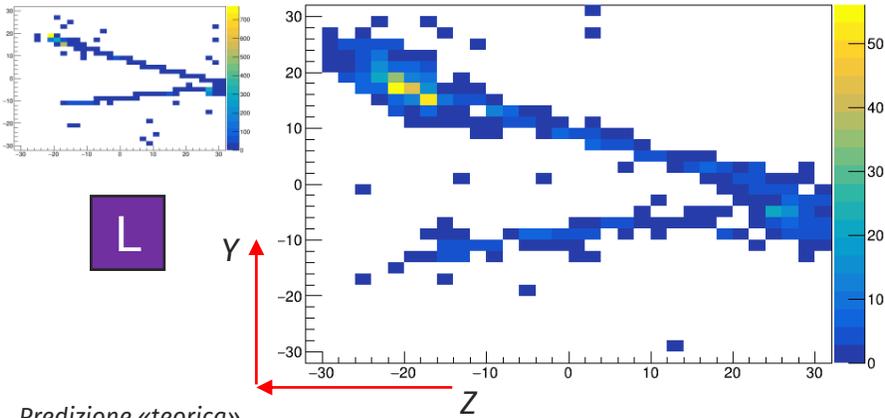
- Pacchetto di simulazione ottica Geant4 («OpticalMeniscus»), inglobato nel framework di simulazione di SAND.
- **Input:** file di output di EdepSim/Fluka, geometria interna di GRAIN con sensori (maschere/lenti)
- Sviluppato nel «LAR Optical System WG» (Credits ai developers: V. Pia, V. Cicero, N. Tosi, M. Pozzato, M. Vicenzi, L. Di Noto)



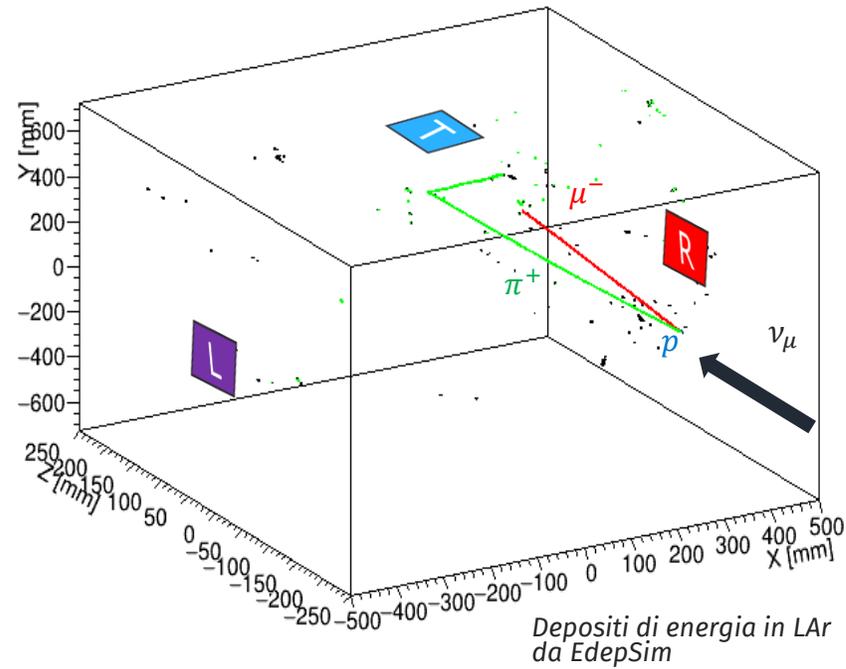
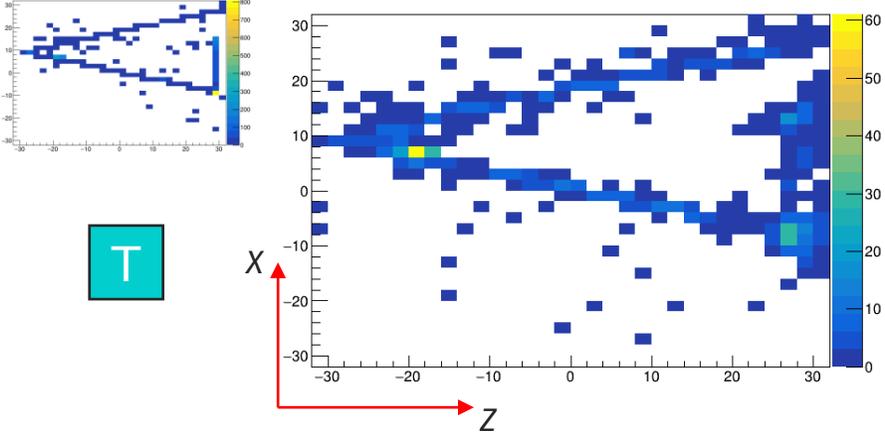
# Evento di neutrino

- $\nu_\mu$  CC in LAr. Sensori: 32x32, pixel da 2mm, 20% QE.

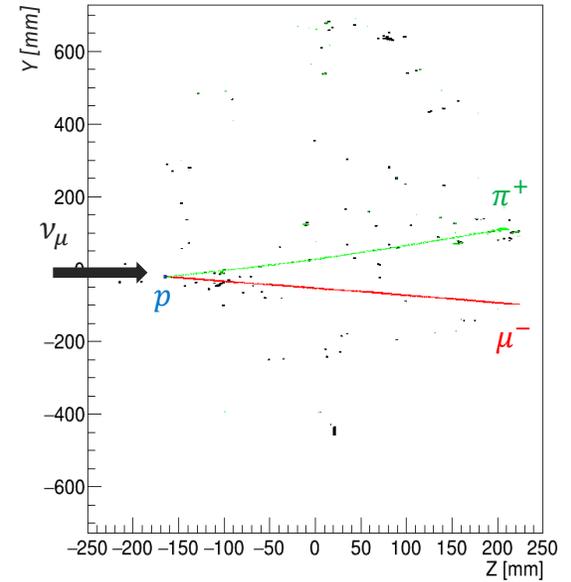
Predizione «teorica»



Predizione «teorica»



ZY projection



- La lente più vicina (<20cm) ha un campo di vista minore e sfoca la traccia,

Predizione «teorica»

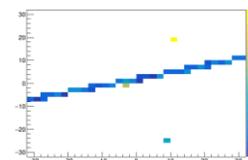
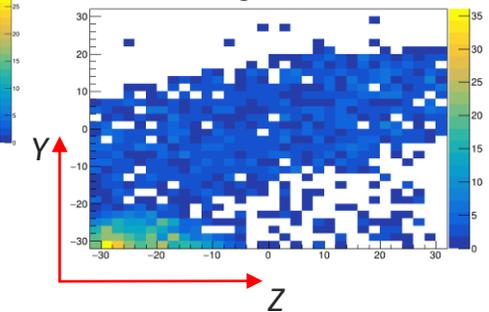


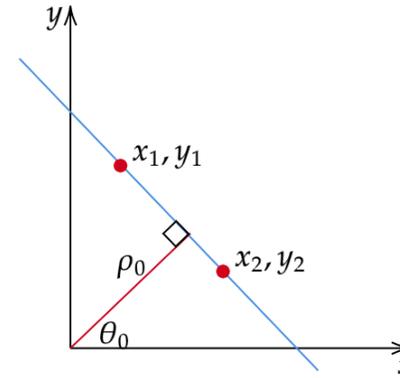
Immagine al sensore



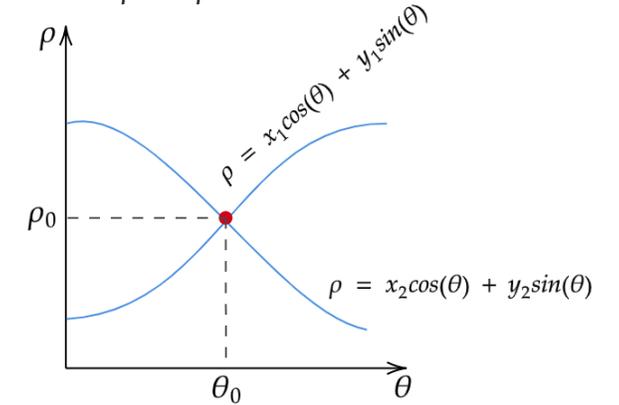
# Ricostruzione

- Sviluppo di algoritmi di ricostruzione per individuare tracce 2D, attraverso la **trasformata di Hough**.
- Risultati preliminari incoraggianti, ma limitati a seconda della qualità dell'immagine e della finezza dei dettagli.

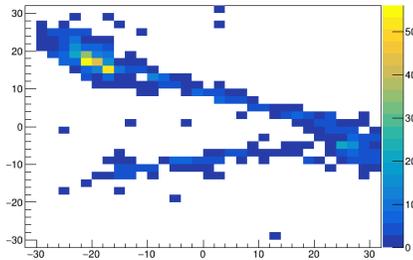
Spazio fisico



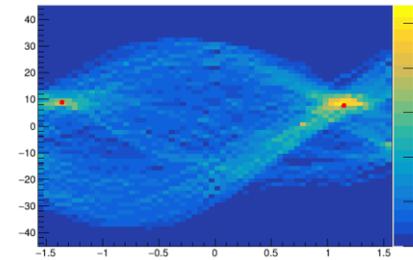
Spazio parametrico



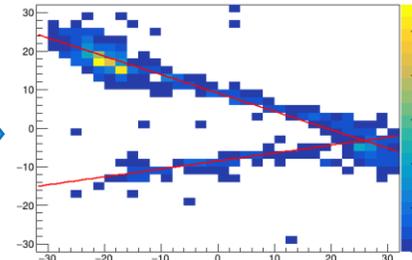
Spazio fisico



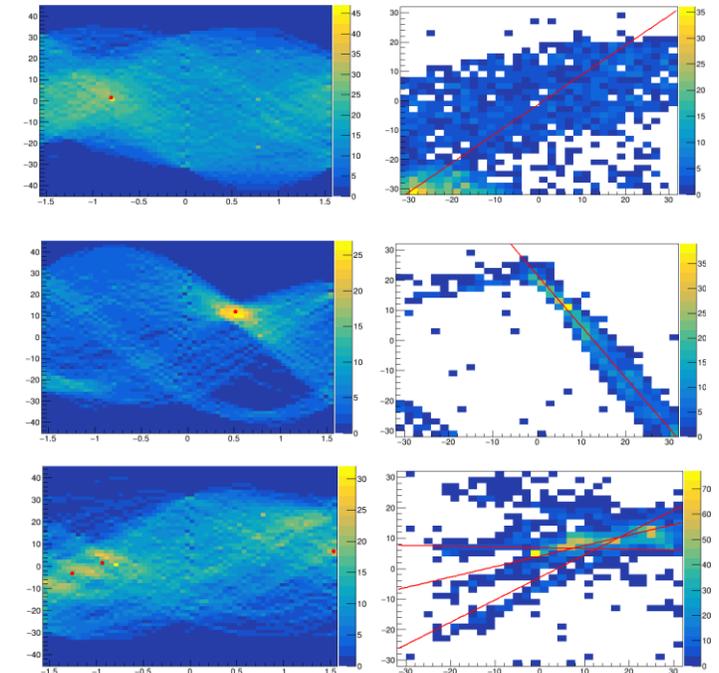
Spazio parametrico



Spazio fisico + «fit»

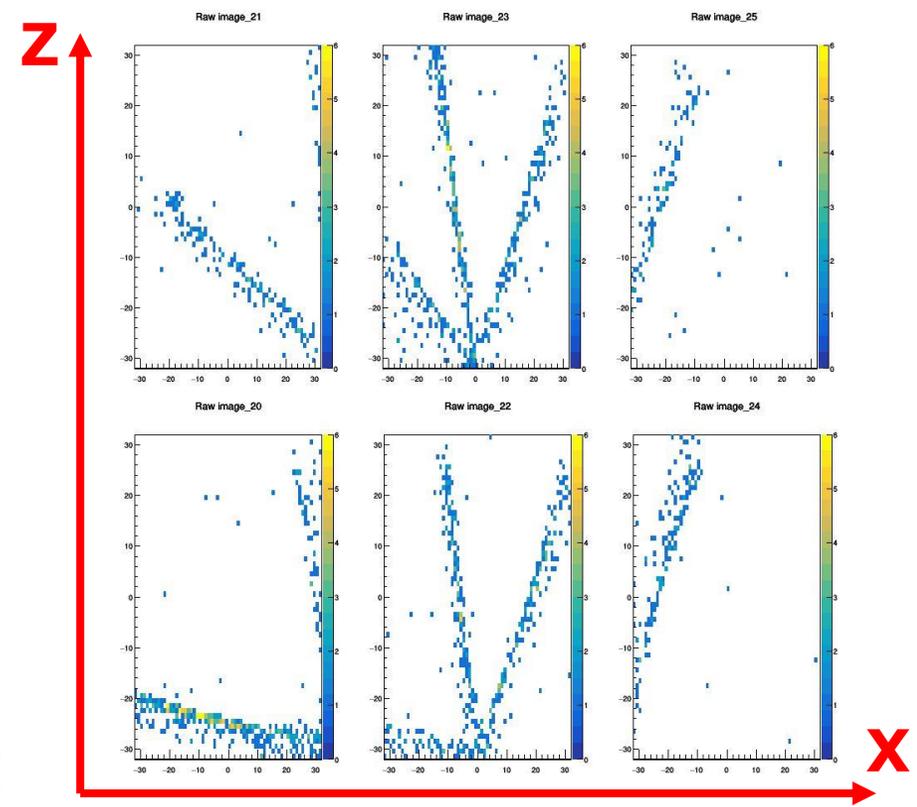
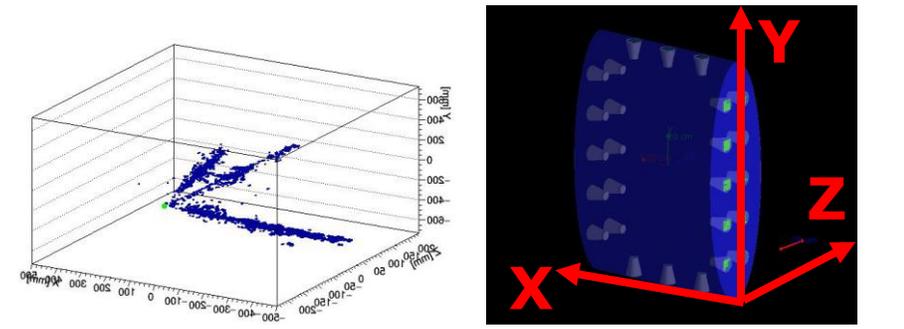
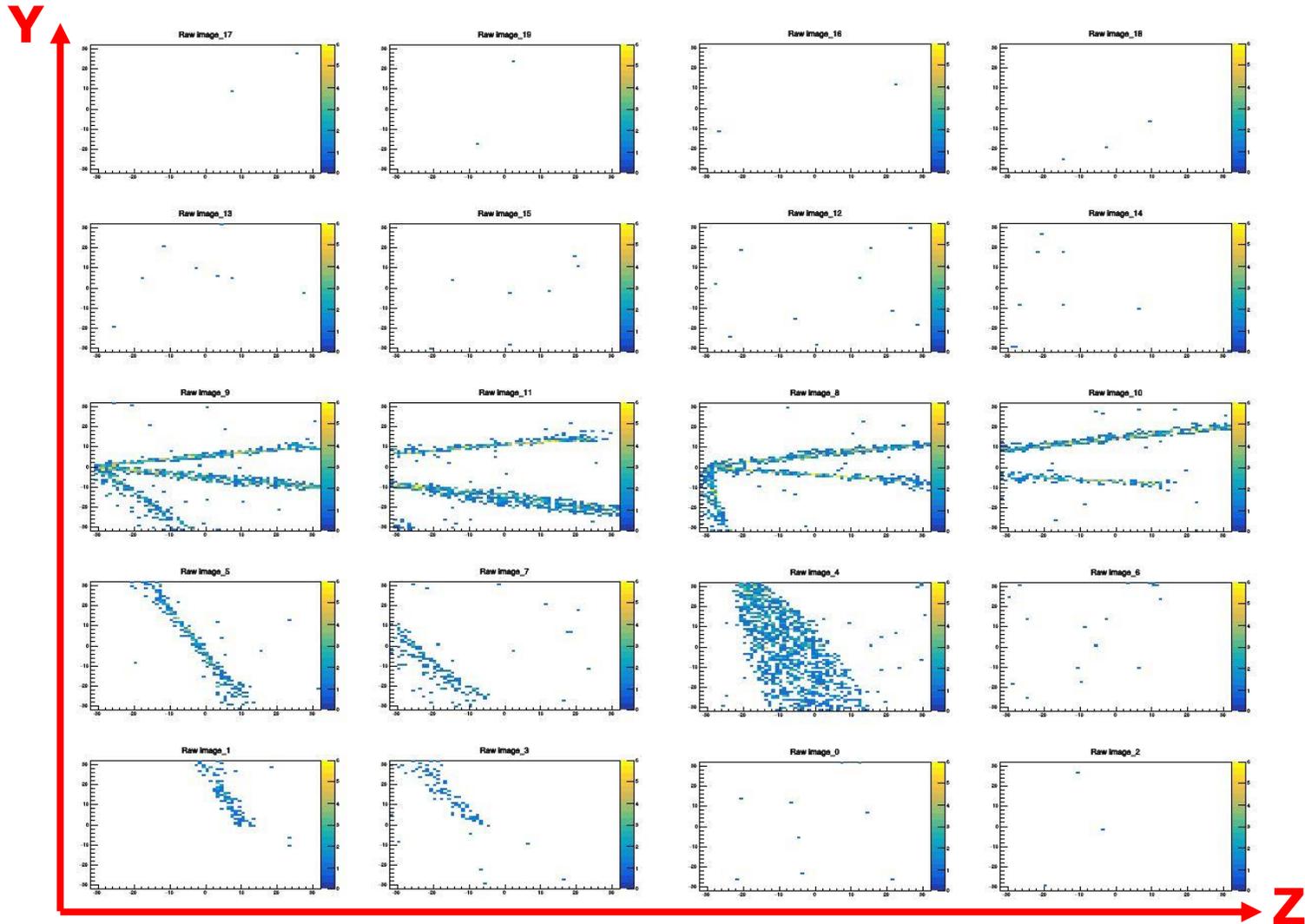


Esempi di ricostruzioni problematiche:



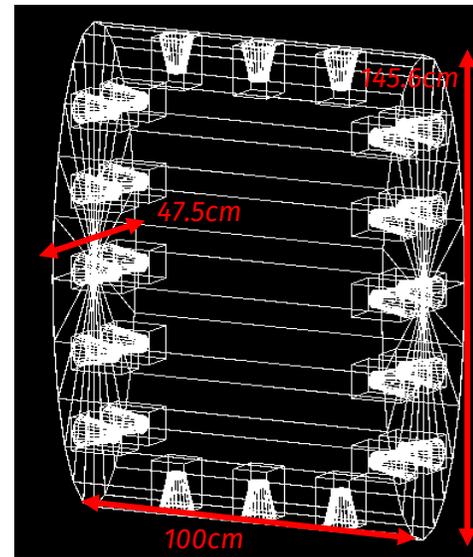
Trasformata di Hough: nello spazio parametrico, le rette appaiono come punti di accumulazione: trovare le rette = trovare i **massimi locali**

# Esempio: evento $\nu_\mu$ CC in GRAIN

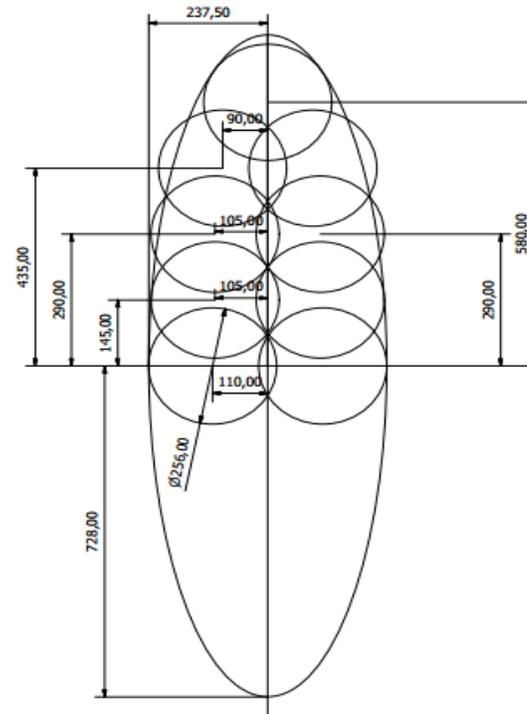


# Geometria in GRAIN

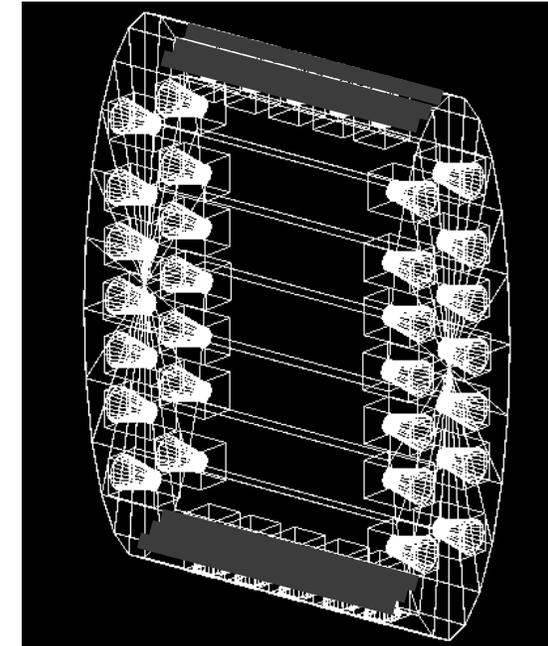
- Il posizionamento dei sensori era stato pensato con il precedente disegno di GRAIN (due moduli distinti, L~100cm)
  - Non copre però bene tutto il volume, non tiene conto di tubi, aperture, etc..
- Studio per migliorare la copertura: intersecare i campi di vista dei sensori, eliminazione delle viste superflue
- Obiettivo: studio sistematico di eventi in GRAIN



Vecchia geometria:  
26 sensori  
32x32, 2mm



Nuova geometria:  
28 sensori  
32x32, 2mm



# Prossimi passi

- **Algoritmo di ricostruzione:**

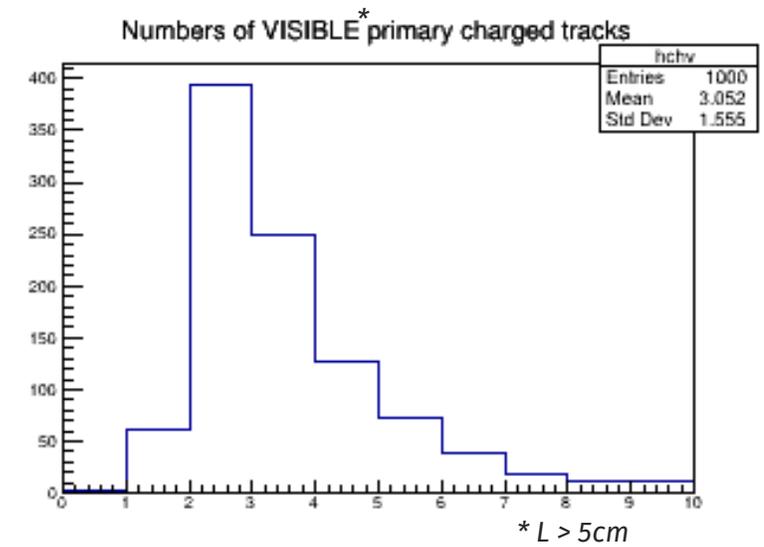
- Miglioramento dell'algoritmo di ricerca della tracce
- Rigetto automatico di viste non adeguate
- Passaggio 2D → 3D, determinazione del vertice

- **Studio di eventi in GRAIN**

- Studio topologia eventi in GRAIN (numero, lunghezza tracce)
- Studio efficienza di ricostruzione per canale/topologia
- Studio miglioramento rispetto alle informazioni disponibili con il solo tracciatore
- ....

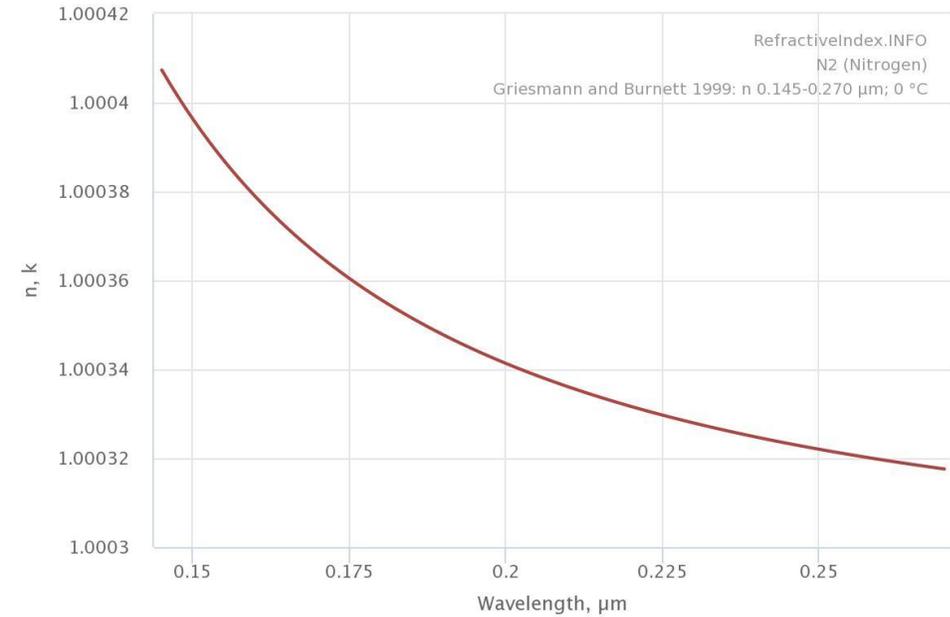
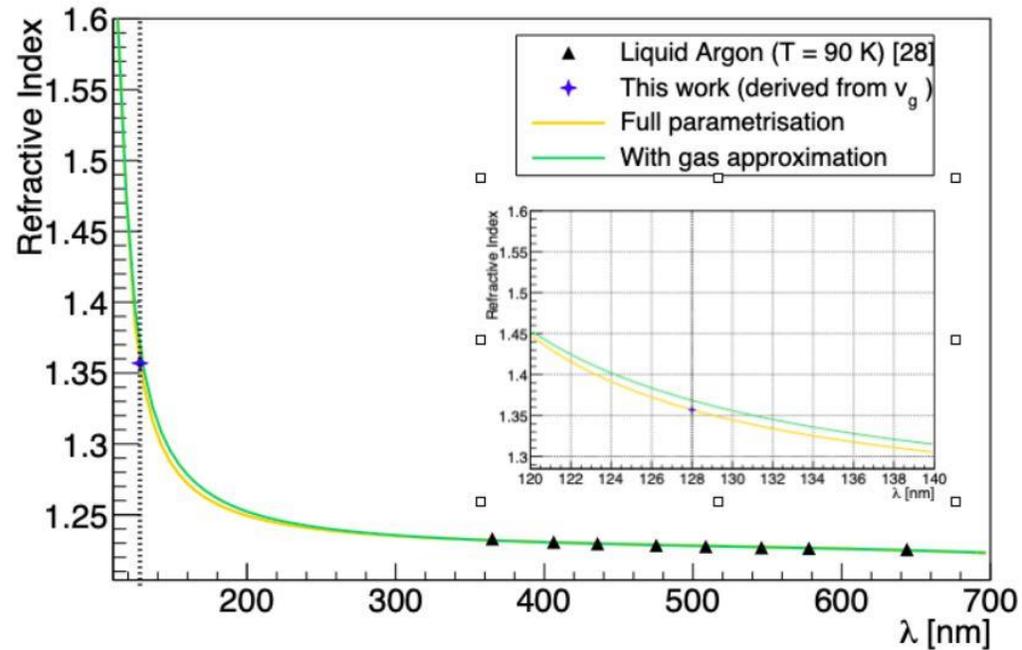
- **Geometria e posizionamento**

- Ottimizzazione delle copertura del volume con i campi di vista
- Indagine sull'incrementare a **130cm** la distanza da coprire (nuovo design di GRAIN)



# Back-up

# Indici di rifrazione



- Argon liquido: estrapolazione da misure nel visibile e misura di velocità di gruppo a 128nm, per T=90K:

$$n(175\text{nm}) = 1.261$$

$$n(128\text{nm}) = 1.358$$

- Azoto: misure nel VUV, ma a T=273 K (0°C):

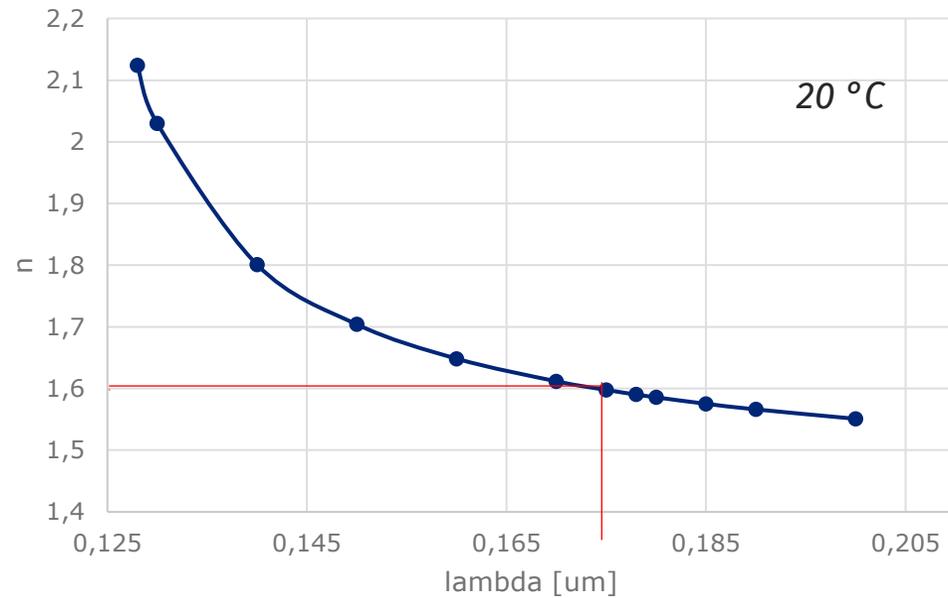
$$n = 1$$

Babicz et al. (2020) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/P09009>

Griesmann and Burnett (1999) <https://doi.org/10.1364/OL.24.001699>

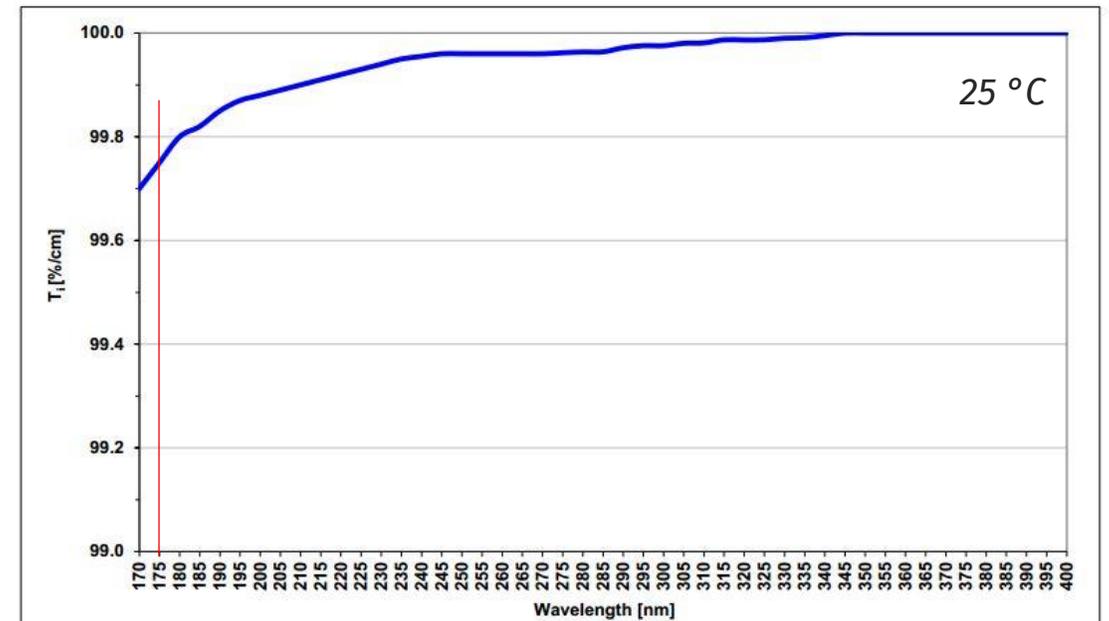
# Fused Silica HPFS 8655

## Indice di rifrazione



$$n(175\text{nm}) = 1.597$$

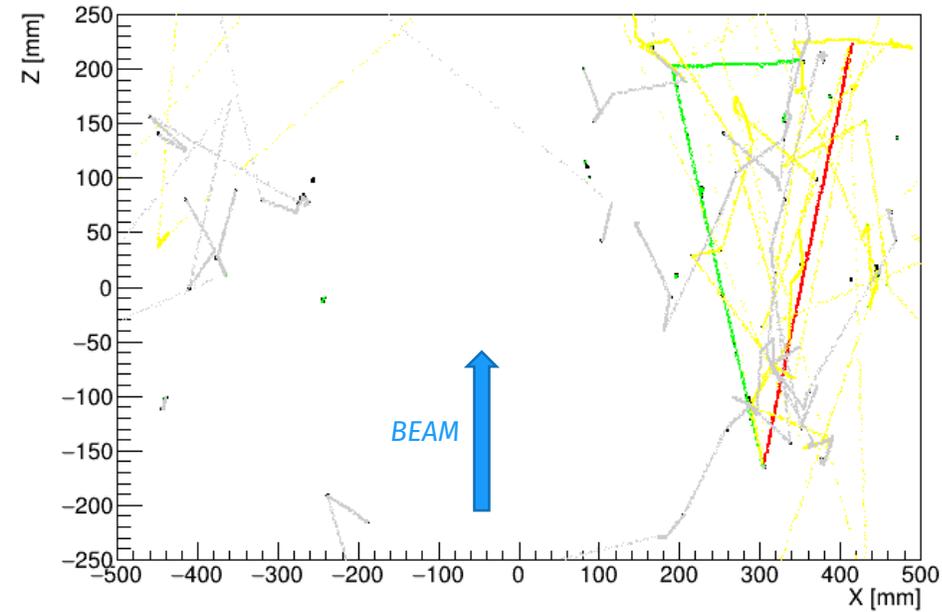
## Trasmissione



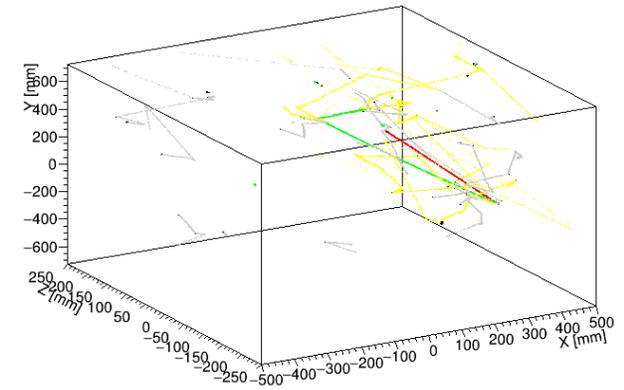
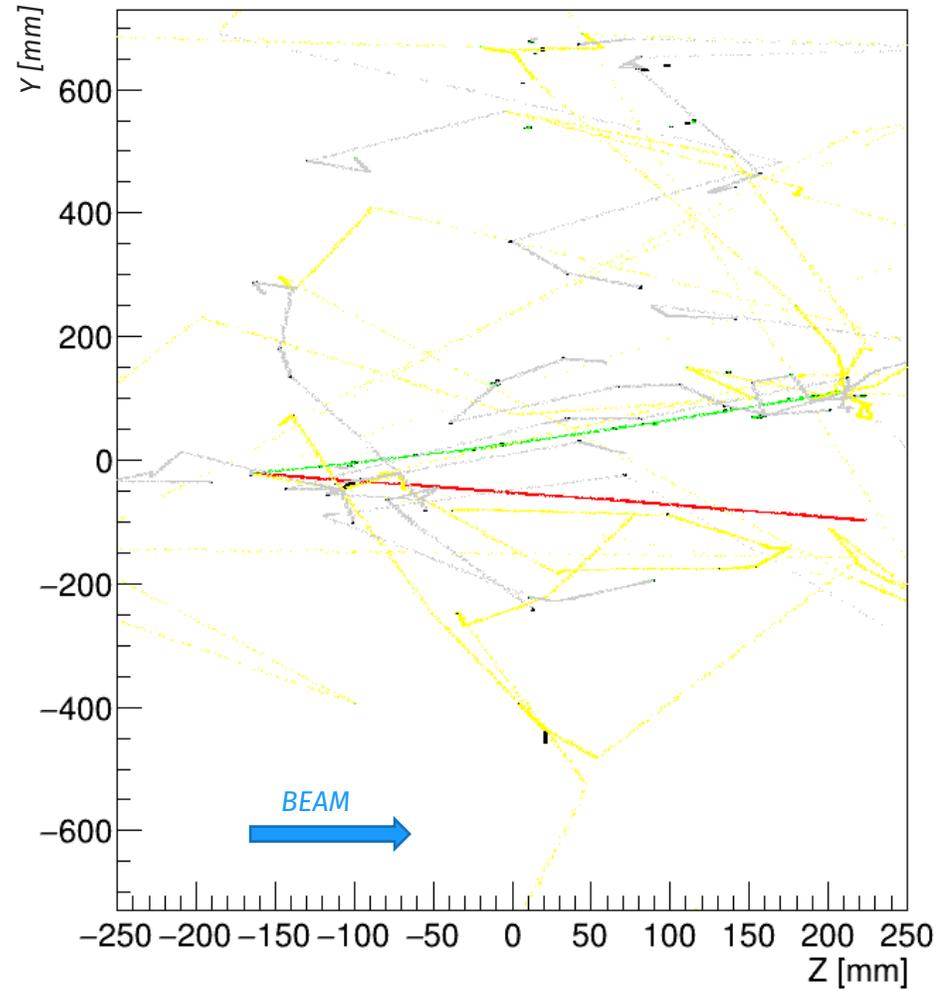
$$T(175\text{nm}) > 99.6\%/\text{cm}$$

# Event Display: event 0

XZ projection



ZY projection

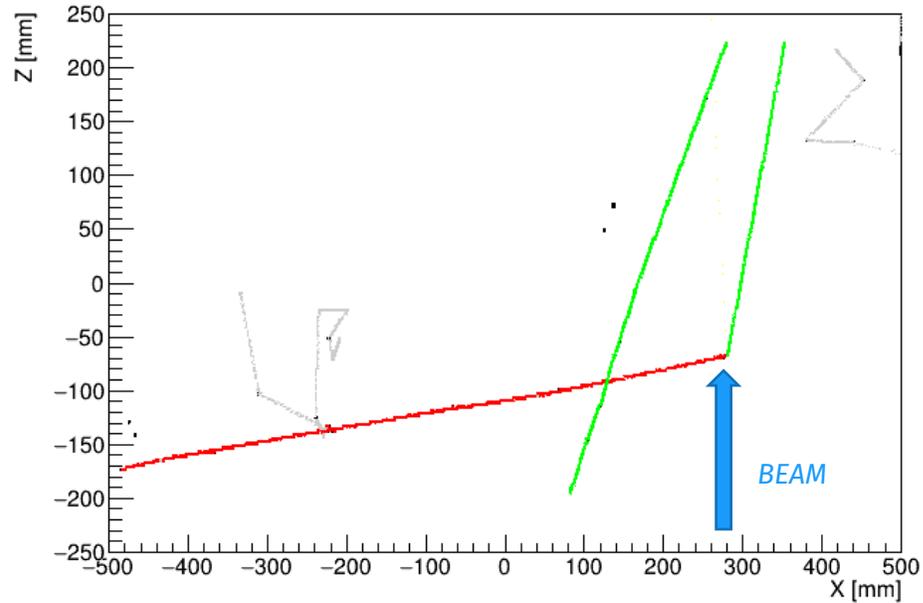


**Legenda:**

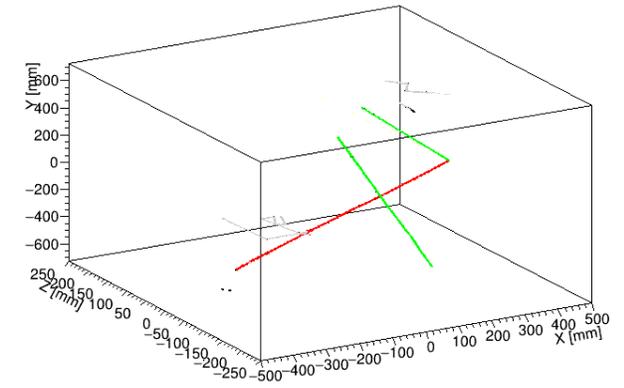
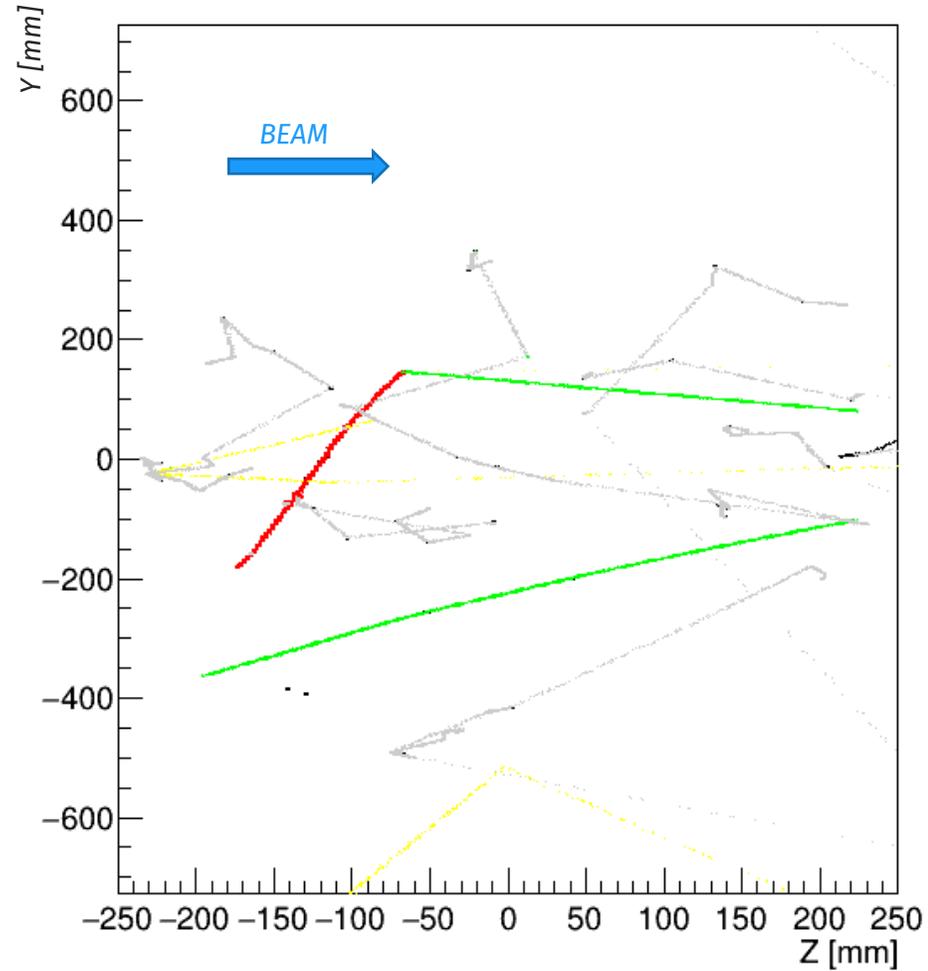
- $n, \pi^0$ : **giallo**
- $\pi^+, \pi^-$ : **verde**
- $\gamma$ : **grigio**
- $\mu^-, \mu^+$ : **rosso**
- $p$ : **blu**
- $e^-, e^+$ : **nero**

# Event Display: event 6

XZ projection



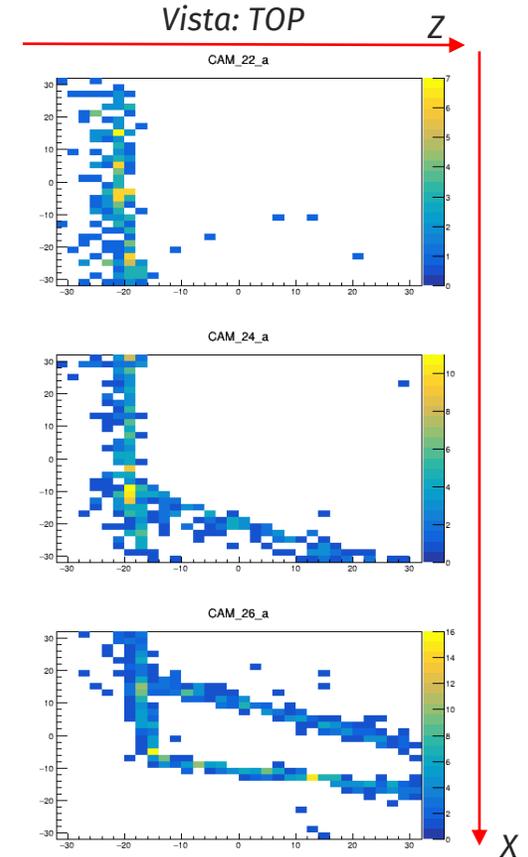
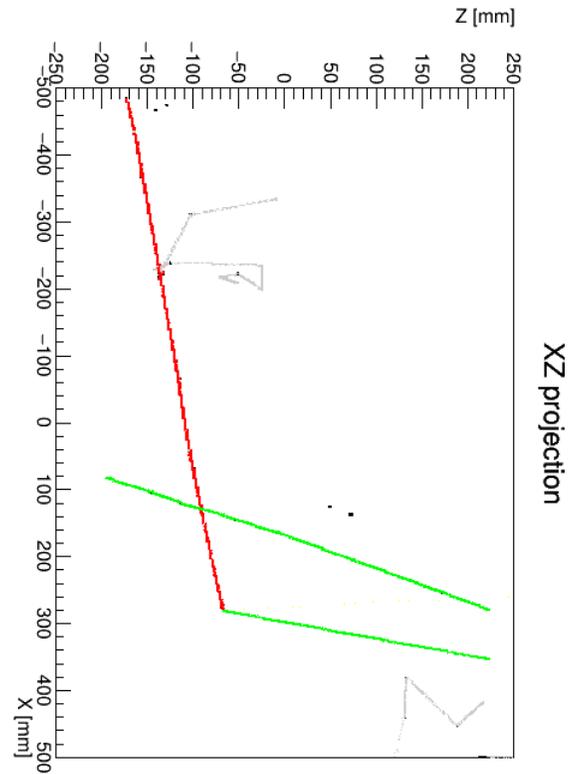
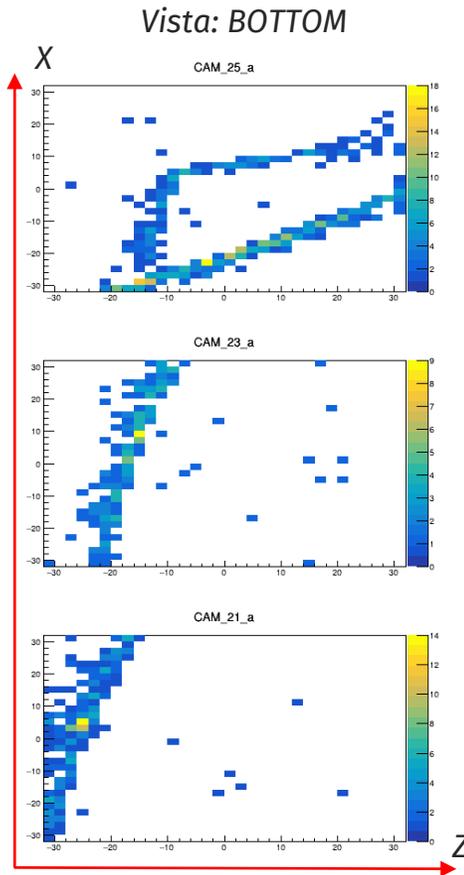
ZY projection



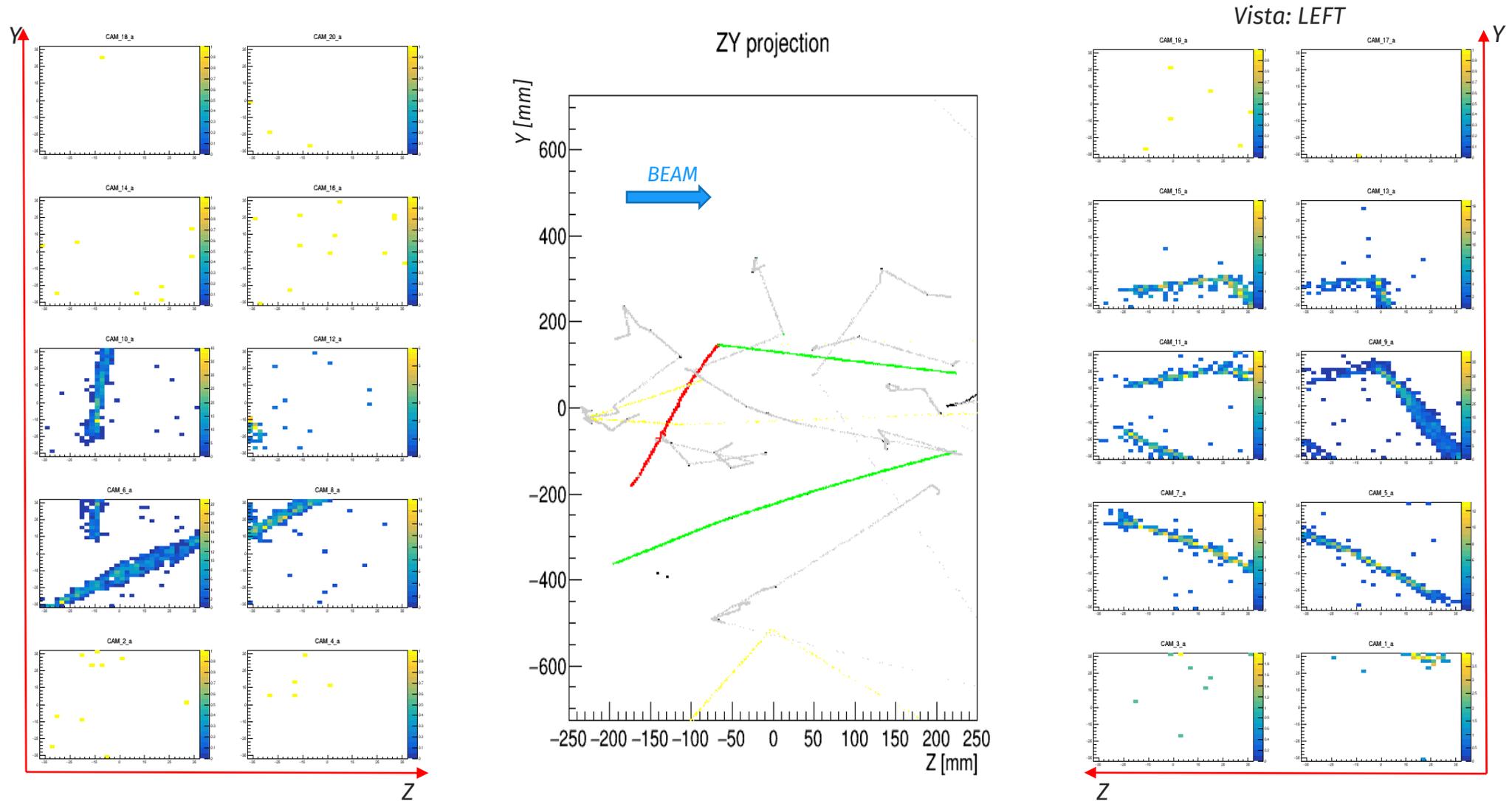
**Legenda:**

- $n, \pi^0$ : **giallo**
- $\pi^+, \pi^-$ : **verde**
- $\gamma$ : **grigio**
- $\mu^-, \mu^+$ : **rosso**
- $p$ : **blu**
- $e^-, e^+$ : **nero**

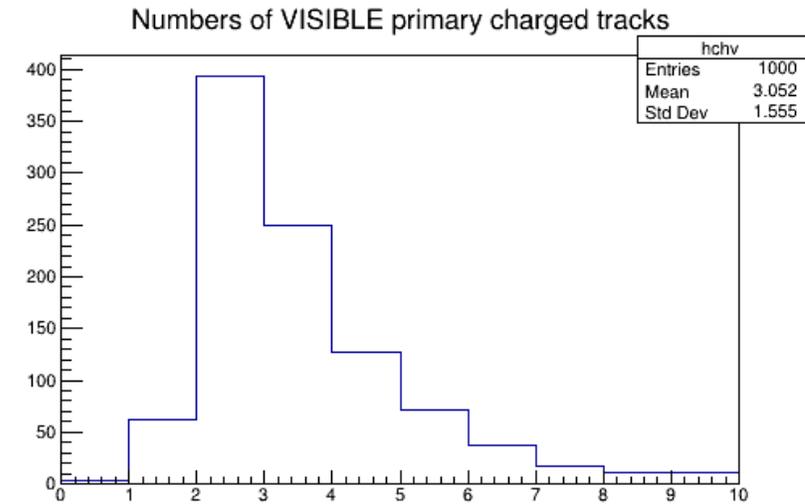
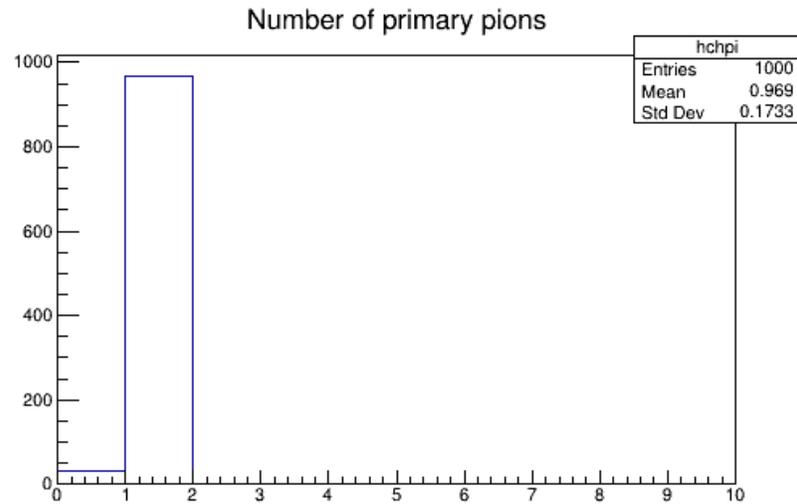
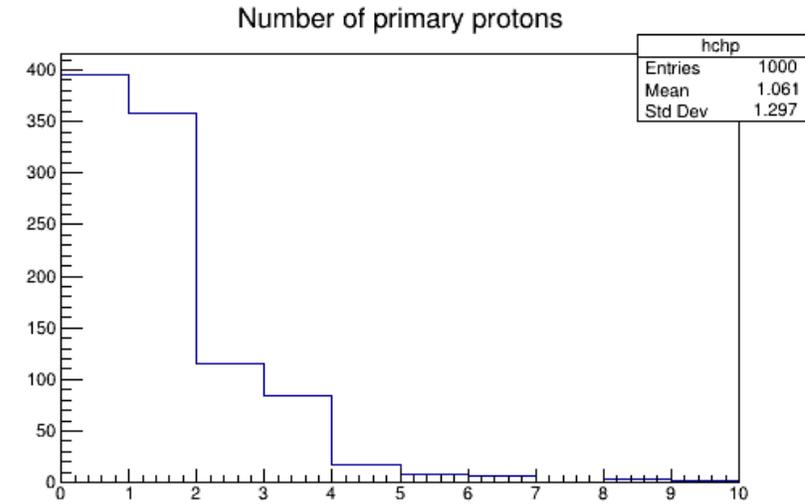
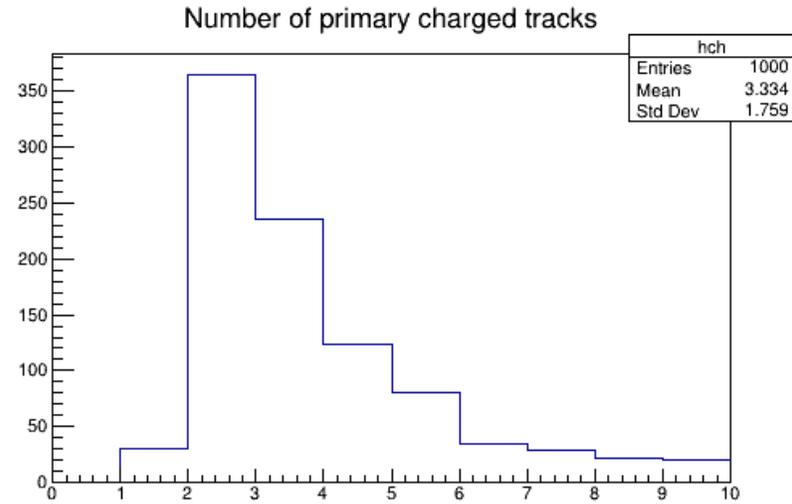
# Event Display: event 6



# Event Display: event 6



# 1k Numu CC in GRAIN





**Università  
di Genova**



**Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Sezione di Genova**