

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

**Analisi dati di un prototipo  
di camera a deriva per l'esperimento DUNE**

**Relatore:**  
Prof. ssa Nicoletta Mauri

**Presentata da:**  
Ilaria Antonellini

**Correlatore:**  
Dott. Michele Pozzato

Anno Accademico 2023/2024

## **Abstract**

Le camere a deriva sono rivelatori utilizzati per tracciare il passaggio di particelle cariche che basano il loro funzionamento sulla ionizzazione del gas contenuto al loro interno e sul moto di deriva delle cariche soggette a un campo elettrico. Il Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), attualmente in fase di costruzione negli Stati Uniti, sta investigando la possibilità di utilizzare nel sito del Near Detector, all'interno del rivelatore SAND, una camera a deriva come tracciatore per particelle prodotte nelle interazioni di neutrini. In questo lavoro di tesi è stata realizzata la prima analisi dati di un prototipo di camera a deriva costruito all'INFN di Bologna per DUNE.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>1 L'esperimento DUNE</b>	<b>3</b>
1.1 Il programma di ricerca . . . . .	3
1.2 Il fascio di neutrini . . . . .	4
1.3 Il Near Detector . . . . .	5
1.4 SAND . . . . .	6
1.4.1 Il magnete di SAND . . . . .	7
1.4.2 Il calorimetro ECAL . . . . .	7
1.4.3 L'Inner Tracker . . . . .	8
1.5 Il Far Detector . . . . .	10
<b>2 La camera a deriva come tracciatore di SAND</b>	<b>13</b>
2.1 Il ruolo di SAND come rivelatore di neutrini . . . . .	13
2.2 La camera a deriva come tracciatore . . . . .	14
2.2.1 Ionizzazione nei gas . . . . .	14
2.2.2 Moto delle cariche in un gas . . . . .	15
2.2.3 Funzionamento della camera . . . . .	17
2.3 Il prototipo della camera a deriva . . . . .	20
2.3.1 Apparato sperimentale e caratterizzazione della camera . . . . .	21
<b>3 Analisi dei dati del prototipo di camera a deriva</b>	<b>24</b>
3.1 Efficienza della camera a deriva . . . . .	24
3.2 Selezione delle tracce . . . . .	28
3.3 Ricostruzione delle tracce . . . . .	32
<b>Conclusione</b>	<b>37</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>38</b>

# Introduzione

Il Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), attualmente in fase di costruzione negli Stati Uniti, osserverà le oscillazioni di neutrino su lunga distanza, con l'obiettivo primario di misurare l'eventuale violazione della simmetria CP nel settore leptonic e l'ordinamento delle masse dei neutrini. DUNE sarà costituito da un complesso di rivelatori vicini (Near Detector) posti in prossimità dell'acceleratore e un complesso di rivelatori lontani (Far Detector) posti a una distanza di 1300 km dal punto di produzione del fascio di neutrini. SAND sarà uno dei tre rivelatori presenti nel Near Detector e avrà lo scopo di monitorare e caratterizzare il fascio di neutrini. Il tracciatore che sarà situato all'interno di SAND è in fase di sviluppo ed una delle opzioni allo studio è rappresentata da una camera a deriva. Questa basa il suo funzionamento sulla ionizzazione del gas contenuto al suo interno da parte delle particelle incidenti e sul moto di deriva delle cariche soggette a un campo elettrico esterno. Per valutare l'opzione della camera a deriva come tracciatore di SAND è stato realizzato un piccolo prototipo di tale rivelatore nei laboratori dell'INFN di Bologna. In questo lavoro di tesi è stata effettuata una prima analisi dati e sono state studiate le prestazioni del prototipo.

Il primo capitolo di questa tesi presenta una panoramica degli obiettivi di DUNE e descrive la struttura dell'esperimento e l'insieme dei rivelatori che ne faranno parte. Il secondo capitolo approfondisce il funzionamento delle camere a deriva e presenta il prototipo che è stato studiato. I risultati dell'analisi dei dati ottenuti dal prototipo di camera a deriva sono riportati e discussi nel terzo capitolo.

# Capitolo 1

## L'esperimento DUNE

### 1.1 Il programma di ricerca

Il Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) è un esperimento internazionale di nuova generazione che osserverà i neutrini prodotti dal fascio più intenso al mondo, in costruzione al Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) negli Stati Uniti. I principali obiettivi scientifici di DUNE sono trovare risposte in merito a:

- **l'origine dell'asimmetria materia-antimateria:** la misura della violazione CP nel settore leptonic tramite misure precise dell'oscillazione dei neutrini potrebbe spiegare perché l'Universo è fatto di materia piuttosto che di antimateria;
- **le simmetrie alla base dell'Universo:** studiare il fenomeno delle oscillazioni dei neutrini e determinare l'ordine delle loro masse porterà a una comprensione più profonda dell'Universo;
- **l'unificazione delle forze:** un'eventuale osservazione del decadimento del protone costituirebbe una scoperta rivoluzionaria, consentendo di provare le Teorie di Grande Unificazione;
- **l'origine dei buchi neri e delle stelle di neutroni:** l'osservazione di neutrini provenienti dal collasso di una supernova nella nostra galassia darebbe informazioni uniche sui primi istanti di questo evento estremo e sulla formazione delle stelle di neutroni, e potrebbe segnalare la nascita di un buco nero.

L'inizio della raccolta dati è previsto per il 2030 e l'esperimento avrà una durata di vent'anni. DUNE si svilupperà all'interno della Long Baseline Neutrino Facility (LBNF), ovvero il complesso che ospiterà il fascio di neutrini e i laboratori sotterranei. Il fascio sarà misurato in due siti: il Near Detector (ND) situato al Fermilab in Illinois e il Far Detector (FD) situato in South Dakota alla Sanford Underground Research Facility

(SURF) a una distanza di 1300 km, per poter studiare il fascio di neutrini prima e dopo il fenomeno di oscillazione (Fig. 1.1) [5].

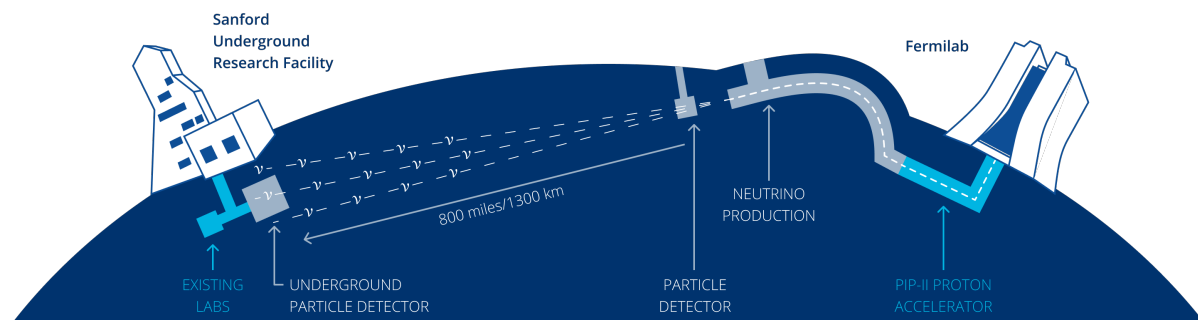


Figura 1.1: Rappresentazione delle strutture LBNF/DUNE a Fermilab e a SURF. In blu sono rappresentate le strutture già esistenti, in grigio si osservano le strutture che saranno realizzate per l'esperimento [6].

## 1.2 Il fascio di neutrini

Il fascio di neutrini di DUNE sarà ospitato nelle strutture del FNAL e sarà realizzato a partire dai protoni provenienti da PIP-II, Proton Improvement Plan II, l'acceleratore lineare di Fermilab. Questi verranno accelerati per 215 m fino a raggiungere un'energia di 800 MeV, e dopo aver attraversato il Main Injector raggiungeranno un'energia compresa tra 60 e 120 GeV [7]. Il fascio uscente avrà una potenza compresa tra 1 MW e 1.2 MW all'inizio delle operazioni di DUNE, con il progetto di aumentare tale potenza fino a più di 2 MW. I protoni saranno diretti verso un bersaglio costituito da un cilindro di grafite lungo 2.2 m. La collisione con il bersaglio produrrà una cascata di particelle secondarie, tra cui i mesoni carichi  $\pi^\pm$  e  $K^\pm$ , i quali saranno a loro volta deflessi da una serie di magneti, denominati horns, per orientare il fascio verso i rivelatori. I mesoni prodotti sono instabili e vanno incontro a processi di decadimento che avverranno all'interno di un tunnel apposito lungo  $\sim 200$  m. Questi porteranno alla produzione dei neutrini e degli antineutrini osservati dai rivelatori di DUNE. La polarità degli horns consente di selezionare mesoni con carica elettrica positiva o negativa, per ottenere un fascio finale composto rispettivamente da neutrini o da antineutrini. Il fascio prodotto attraverserà il Near Detector a una distanza di 304 m dalla fine del tunnel di decadimento come mostrato in Fig. 1.2 e in seguito raggiungerà il Far Detector, situato a 1300 km da FNAL.

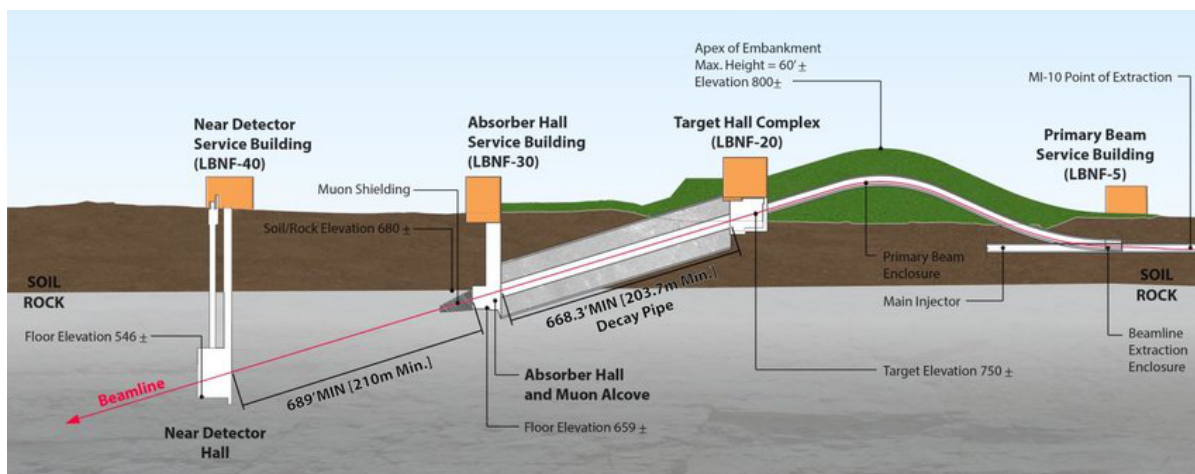


Figura 1.2: La beamline nel Near Detector di DUNE [10].

### 1.3 Il Near Detector

Il primo complesso di rivelatori che sarà attraversato dal fascio di neutrini sarà il Near Detector. Situato a una profondità di 62 m e distante 574 m dalla sorgente del fascio, ND ha lo scopo di caratterizzare la composizione e lo spettro energetico del fascio di neutrini alla sorgente, sia per neutrini elettronici che per neutrini muonici, prima che sia alterato dal fenomeno di oscillazione. Il Near Detector è fondamentale al fine di ridurre gli errori sistematici relativi ai modelli di interazione e alle sezioni d'urto sui diversi materiali. In particolare, saranno misurate la carica e l'impulso delle particelle per poter ricostruire il sapore e l'energia del neutrino che li ha originati. Il Near Detector sarà costituito da più rivelatori mostrati in Fig. 1.3 [3]:

- ND-LAr: una camera a proiezione temporale ad argon liquido;
- TMS: un rivelatore a piani di scintillatore;
- SAND: il rivelatore che sarà posizionato permanentemente sul fascio, a sua volta composto da diversi sotto-rivelatori all'interno di un campo magnetico.



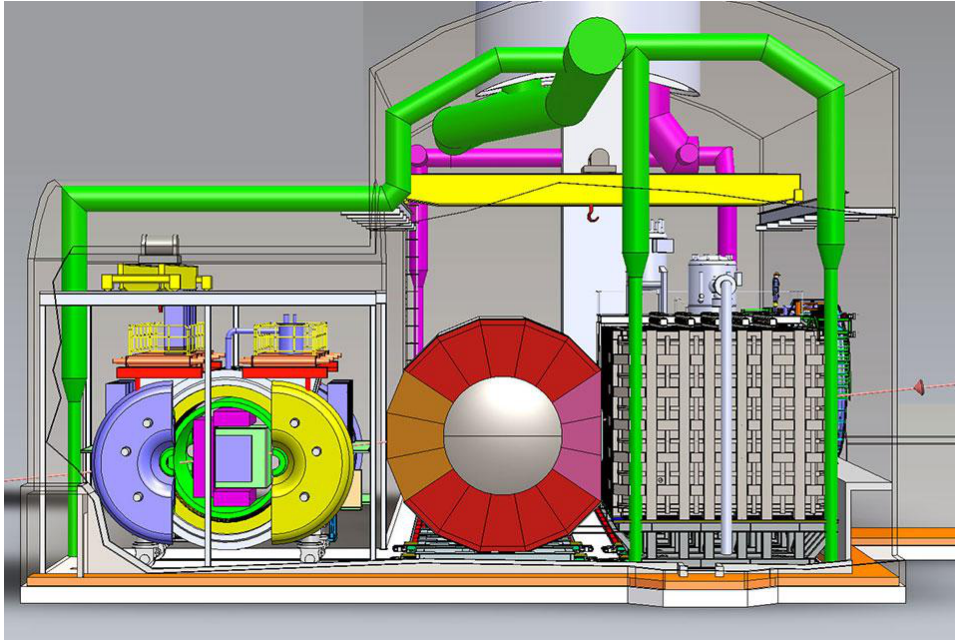


Figura 1.3: I tre rivelatori che compongono il Near Detector all'interno della sala sperimentale a Fermilab: il fascio entrerà da destra e uscirà a sinistra attraversando rispettivamente i rivelatori ND-LAr, TMS e SAND.

ND-LAr sarà una camera a proiezione temporale ad argon liquido (LArTPC) simile a quella che sarà utilizzata nel Far Detector. Sarà il primo rivelatore ad essere attraversato dal fascio e sarà esposto a un flusso di neutrini più intenso rispetto al FD. Sarà composto da una struttura modulare posta in un sistema di raffreddamento criogenico. La camera sarà lunga 5 m in direzione del fascio, larga 7 m e alta 3 m. ND-LAr è pensato per essere un rivelatore mobile e misurare il flusso anche in posizioni fuori asse per poterne determinare l'andamento in funzione dell'angolo. Il rivelatore TMS (The Muon Spectrometer) misurerà la carica e l'impulso dei muoni in uscita da ND-LAr. Sarà costituito da piani di acciaio magnetizzato intervallati da piani di scintillatore, delle stesse dimensioni della sezione di ND-LAr,  $7\text{ m} \times 3\text{ m}$ . Anche TMS sarà un rivelatore mobile che si potrà spostare ortogonalmente all'asse del fascio per acquisire dati a diversi angoli. Le misure fuori asse consentiranno di caratterizzare il fascio con diversi spettri, per poter deconvolvere i modelli di fascio e di sezione d'urto, e di avere una scala più precisa di energia.

## 1.4 SAND

Il System for On-Axis Neutrino (SAND) è il rivelatore più a valle nel fascio nel Near Detector di DUNE. SAND sarà posizionato in modo permanente sull'asse del fascio di neutrini, e avrà l'obiettivo primario di monitorarne le caratteristiche e le eventuali

variazioni. SAND misurerà lo spettro del flusso di neutrini muonici ed elettronici con una sensibilità alle sue variazioni su base settimanale. Misurerà le interazioni di neutrino con diversi materiali, tra cui l'argon e il carbonio, e dovrà effettuare misure precise di energia e di tracciamento. Il progetto sviluppato per SAND prevede un magnete solenoide che conterrà al suo interno un calorimetro, ECAL, e un tracciatore interno come mostrato in Fig. 1.4, che saranno descritti nei paragrafi seguenti.

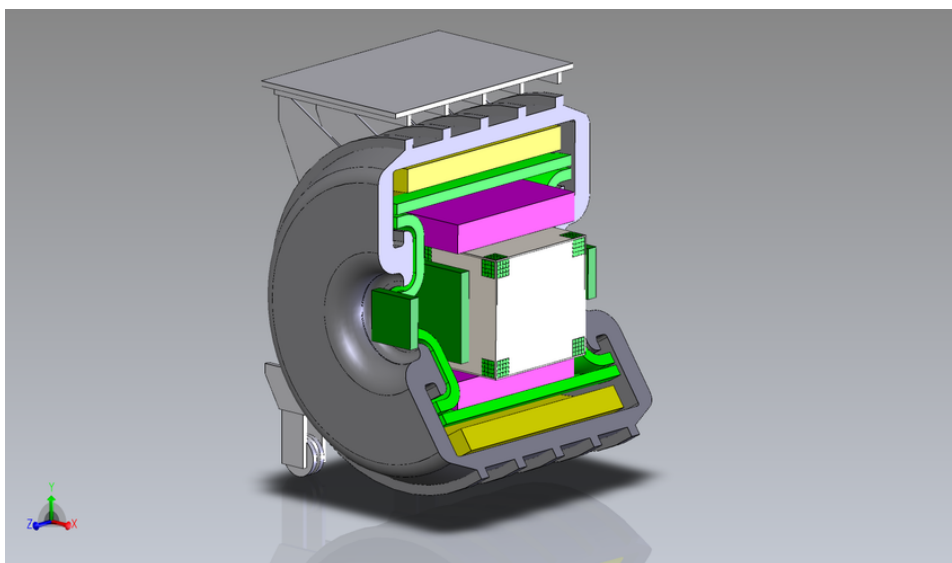


Figura 1.4: Configurazione di SAND: si osservano il giogo (in grigio) e il magnete (in giallo) nella parte esterna, ECAL (in verde) e al centro il tracciatore (in bianco) [1].

### 1.4.1 Il magnete di SAND

Il magnete utilizzato è quello dell'esperimento KLOE ed è progettato per produrre un campo magnetico di 0.6 T all'interno di un solenoide superconduttore di diametro 4.8 m e di lunghezza 4.3 m. Il sistema è posto all'interno di un sistema criogenico a base di elio ed è alimentato da bobine in cui scorre una corrente di 2902 A. Il campo magnetico generato permette di separare particelle con carica elettrica diversa; ciò consente di misurare la contaminazione del fascio, ovvero i leptoni di carica opposta a quella generata dalla componente del fascio, rappresentata dai neutrini o dagli antineutrini a seconda della modalità prescelta per il fascio.

### 1.4.2 Il calorimetro ECAL

Anche il calorimetro elettromagnetico (Electromagnetic Calorimeter, ECAL) installato è lo stesso utilizzato nell'esperimento KLOE ed è completamente contenuto all'interno

del magnete [14]. Si tratta di un calorimetro a campionamento in fibre scintillanti ed è costituito da tre parti principali: il calorimetro di barrel che rappresenta la parte principale del calorimetro e copre la superficie laterale cilindrica e due calorimetri laterali detti *end-caps* che coprono le basi del cilindro. Questa configurazione permette di coprire interamente l'angolo solido intorno alla regione di interazione dei neutrini. Il calorimetro di barrel è composto da 24 moduli ognuno dei quali ha una lunghezza di 4.3 m (pari alla lunghezza del magnete), uno spessore di 23 cm e ha una base trapezoidale. Ogni calorimetro end-cap è costituito da 32 moduli a base rettangolare disposti in verticale di spessore 23 cm e di lunghezza compresa tra 0.7 m e 3.9 m. Ogni modulo è composto a sua volta da lamine di piombo di 0.5 mm di spessore alternate a piani di fibre scintillanti di diametro pari a 1 mm. ECAL misurerà energia e tempo di scintillazione. La risoluzione del calorimetro associata a queste due grandezze è stata valutata durante la presa dati di KLOE e risulta essere rispettivamente [2]:

- risoluzione energetica:  $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{5\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$ ;
- risoluzione temporale:  $\sigma_t = \frac{40}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$  ps.

### 1.4.3 L'Inner Tracker

Il volume interno al calorimetro è occupato dall'Inner Tracker che costituisce un ulteriore bersaglio per il fascio e permette di ricostruire il vertice di interazione, l'impulso e l'angolo di diffusione delle particelle prodotte durante l'urto. Il progetto definitivo del tracciatore interno di DUNE è al vaglio dalla Collaborazione e attualmente esistono due proposte concorrenti: Straw Tube Tracker (STT) e Drift Chamber (DC). Entrambi i rivelatori sono progettati per essere leggeri, ovvero a bassa densità, in modo da ricostruire al meglio le tracce e l'energia delle particelle secondarie prodotte dall'interazione dei neutrini. All'interno di ECAL si troverà anche GRAIN (GRanular Argon for Interactions of Neutrinos), un bersaglio attivo di argon liquido che vincolerà gli effetti nucleari e costituirà il bersaglio di argon che rimarrà permanentemente in asse con il fascio, consentendo la calibrazione incrociata con ND-LAr e TMS, che saranno posizionati fuori asse per il 50% del tempo.

#### Straw Tube Tracker

Lo Straw Tube Tracker, STT, si compone di diversi moduli indipendenti composti da tubi a drift. Ogni modulo, mostrato in Fig. 1.5, è costituito da fili di tungsteno poco massivi inseriti all'interno di tubi con un diametro di 5 mm. Questi sono riempiti con una miscela di gas, 70% di Xe e 30% di CO<sub>2</sub>, sottoposta a una pressione di 1.9 atm. La risoluzione spaziale di STT è stimata essere inferiore a 200  $\mu\text{m}$ . I tubi saranno assemblati in moduli costituiti da due livelli disposti ortogonalmente tra loro secondo lo schema XY, cioè un

livello sarà costituito da tubi allineati lungo l'asse X mentre l'altro li avrà allineati lungo l'asse Y; ogni livello è costituito a sua volta da due piani di tubi, tutti allineati nella stessa direzione. A fianco di questi moduli doppi sarà disposto un radiatore costituito da 105 lamine di  $\text{CH}_2$  di  $15 \mu\text{m}$  di spessore, intervallati da strati di aria di  $120 \mu\text{m}$ , e un bersaglio di  $\text{CH}_2$ . In questo rivelatore i radiatori possono eventualmente essere rimossi e si può sostituire il bersaglio di  $\text{CH}_2$  con bersagli di altri materiali.

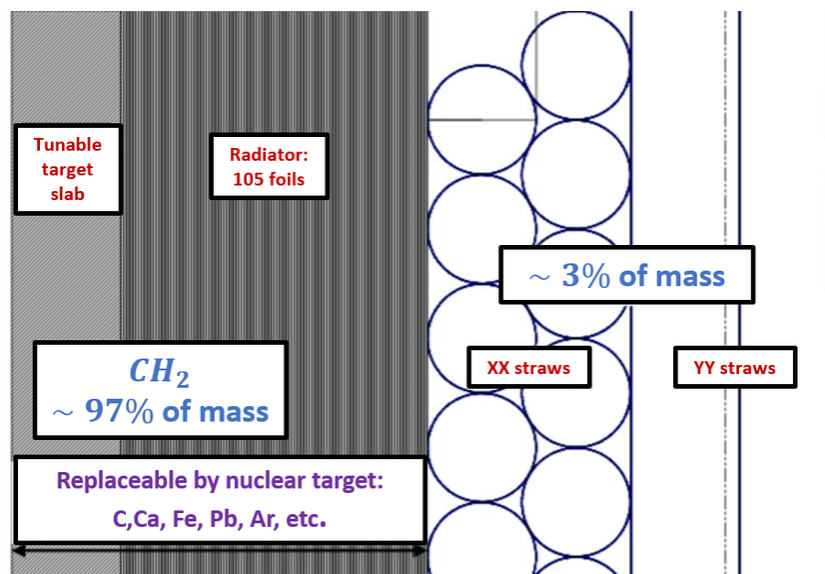


Figura 1.5: Schema realizzativo di un modulo di STT: da sinistra verso destra, verso in cui il fascio attraverserà STT, si osservano: il bersaglio di  $\text{CH}_2$ , il radiatore e i piani XXYY.

## Drift Chamber

Un progetto alternativo a STT per il tracciatore da inserire all'interno di SAND è rappresentato da una Drift Chamber, o camera a deriva. La descrizione di questa tipologia di rivelatori ed i suoi principi di funzionamento saranno oggetto del Capitolo 2, in cui sarà presentato un primo prototipo realizzato presso l'INFN di Bologna. La configurazione di una cella base della camera prevede l'alternarsi sullo stesso piano fili anodici, su cui si raccoglie il segnale generato dal passaggio di particelle cariche, e fili catodici a una distanza di 1 cm. I fili generano il campo elettrico che trasporta gli elettroni di ionizzazione dai catodi agli anodi all'interno della cella. Il volume interno è riempito con una miscela di gas composta all'85% da argon e al 15% da anidride carbonica. Ogni cella è delimitata da piani di mylar posti a tensione nulla. I piani contenenti le celle saranno assemblati in moduli, ognuno dei quali è composto da uno strato di materiale di 0.5 cm di spessore che agisce come bersaglio, e da tre strati, ognuno dei quali è formato

da tre celle in cui i fili sono inclinati rispettivamente a  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $5^\circ$  rispetto alla direzione dell'asse del campo magnetico. La camera si comporrà di otto supermoduli, di spessore 35 cm e larghezza 3.2 m, ognuno dei quali è costituito da un modulo con il bersaglio realizzato in carbonio, C, e nove moduli con il bersaglio realizzato in polipropilene, CH<sub>2</sub>. La drift chamber avrà una lunghezza totale di 2.9 m.

## GRAIN

Il GRanular Argon for Interactions of Neutrinos (GRAIN) costituirà un bersaglio attivo che conterrà al suo interno 1 t di argon liquido e sarà posizionato *upstream*, ovvero sarà il primo componente di SAND ad essere attraversato dal fascio. Sarà situato all'interno di un criostato, che attualmente è in fase di sviluppo, a forma cilindrica di larghezza 130 cm con base ellittica di altezza 147.6 cm e lunghezza 47.5 cm. GRAIN è progettato per ricostruire le interazioni di neutrino utilizzando solo la luce di scintillazione e sarà dotato di un sistema ottico innovativo per l'imaging in argon liquido [11].

## 1.5 Il Far Detector

Il Far Detector (FD) di DUNE sarà situato al Sanford Underground Research Laboratory (SURF) in South Dakota a una profondità di 1500 m, per poter essere schermato dai raggi cosmici e da altri segnali di origine atmosferica. Il rivelatore sarà costituito da quattro LArTPC, ossia camere a proiezione temporale ad argon liquido, e sarà il più grande rivelatore mai costruito ad utilizzare questa tecnologia. Ogni camera conterrà almeno 10 kt di argon liquido puro a una temperatura di 88 K e sarà inserita all'interno di un criostato che avrà un'altezza di 14 m, una larghezza di 15 m e una lunghezza di 62 m. La massa totale di ogni modulo risulterà pari a 17.5 kt. Le camere ad argon liquido saranno realizzate con la tecnologia Single Phase (SP) LArTPC e permetteranno di tracciare le particelle cariche che attraversano il volume sensibile. Le camere SP-LArTPC a deriva orizzontale sono divise da tre piani verticali carichi che generano il campo elettrico come mostrato in Fig. 1.6.

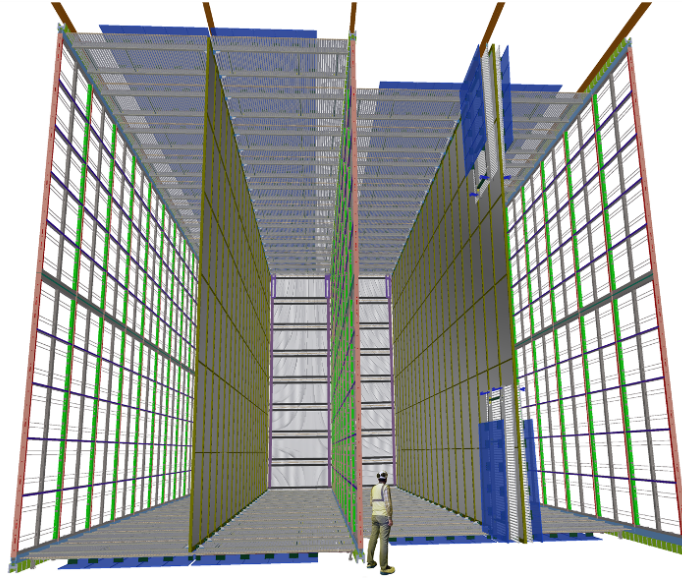


Figura 1.6: Rappresentazione della struttura interna di una camera SP-LArTPC a deriva orizzontale di DUNE [4].

Quando le particelle cariche attraversano l'argon, gli elettroni prodotti dalla ionizzazione sono trasportati da un campo elettrico di  $500 \text{ V/cm}$  generato tra il piano anodico e il piano catodico; una volta raggiunto l'Anode Plane Assembly (APA) generano un segnale dal quale è possibile ricostruire la traccia della particella. Il tempo di deriva degli elettroni, cioè il tempo impiegato per raggiungere l'APA, è nell'ordine dei millisecondi, significativamente superiore rispetto all'intervallo di tempo con cui vengono emessi i neutrini dal fascio, nell'ordine del microsecondo. Per associare agli elettroni un riferimento temporale per la misura del tempo di deriva si sfruttano le proprietà dell'argon liquido come scintillatore. Il tempo di scintillazione fissa l'istante temporale in cui gli elettroni di ionizzazione iniziano il loro moto di deriva verso l'anodo. In questo caso, la luce di scintillazione emessa impiega qualche nanosecondo per raggiungere il Photon Detection System (PDS), cioè il sistema che rivela il passaggio di fotoni.

La SP-LArTPC a deriva orizzontale è utilizzata per lo sviluppo del primo modulo del Far Detector mentre si sta studiando la tecnologia SP-LArTPC a deriva verticale per il secondo modulo. Quest'ultima prevede che il volume attivo di argon liquido del rivelatore sia diviso da un piano catodico orizzontale posto a metà dell'altezza del rivelatore come mostrato in Fig. 1.7. Il campo elettrico all'interno della camera sarà di  $500 \text{ V/cm}$  e trasporterà le cariche lungo la direzione verticale, sfruttando lo stesso principio di funzionamento della SP-LArTPC a deriva orizzontale.

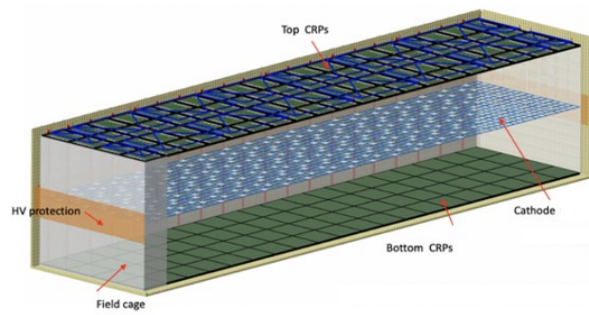


Figura 1.7: Rappresentazione della struttura interna di una camera SP-LArTPC a deriva verticale.

# Capitolo 2

## La camera a deriva come tracciatore di SAND

### 2.1 Il ruolo di SAND come rivelatore di neutrini

I neutrini sono particelle difficili da rivelare in quanto interagiscono solo debolmente. I mediatori dell'interazione debole sono i bosoni  $W^\pm$  e  $Z_0$ , i quali mediano rispettivamente i processi deboli a corrente carica e i processi deboli a corrente neutra. I processi a corrente carica in cui si possono rivelare i diversi sapori di neutrino e antineutrino sono:

$$\nu_\alpha + n \rightarrow \alpha^- + p \quad (2.1)$$

$$\bar{\nu}_\alpha + p \rightarrow \alpha^+ + n \quad (2.2)$$

dove  $\alpha = e, \mu, \tau$ . I neutrini possono essere rivelati anche tramite i processi a corrente neutra che coinvolgono elettroni atomici:

$$\nu_\alpha + e^- \rightarrow \nu_\alpha + e^- \quad (2.3)$$

$$\bar{\nu}_\alpha + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\alpha + e^- \quad (2.4)$$

dove  $\alpha = e, \mu, \tau$ . In quest'ultimo caso se l'energia è sufficiente possono essere prodotti anche muoni e tau, equazioni 2.5 e 2.6.

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.5)$$

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \tau^- + \bar{\nu}_\tau \quad (2.6)$$

Il fascio che sarà utilizzato in DUNE sarà composto da neutrini (o antineutrini) muonici con una piccola contaminazione di neutrini e antineutrini elettronici. Il rivelatore SAND nel Near Detector caratterizzerà il fascio di neutrini, come descritto nella sezione 1.4. Dato che la probabilità di interazione dei neutrini del fascio è bassa, la sezione d'urto



con un nucleone è nell'ordine di  $\sigma \simeq 7 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{nucleone}$  [8], per poter misurare lo spettro dei neutrini sono necessari rivelatori molto massivi. I neutrini vengono rivelati indirettamente sfruttando le particelle cariche, i nuclei o gli atomi eccitati che si producono quando interagiscono con la materia. SAND è progettato per misurare il flusso e lo spettro dei neutrini tramite la rivelazione delle interazioni in GRAIN, il tracciamento nell'Inner Tracker e la ricostruzione dell'energia nel calorimetro ECAL.

## 2.2 La camera a deriva come tracciatore

La camera a deriva, sviluppata per la prima volta negli anni Settanta, è un tipo di rivelatore a gas che permette di ricostruire la traiettoria di una particella che lo attraversa. Questa tecnologia si è sviluppata a seguito dei rivelatori a gas ionizzante e delle MultiWire Proportional Chamber (MWPC). Il suo funzionamento si basa su due fenomeni: la ionizzazione del gas contenuto nella camera e il moto di deriva delle cariche soggette a un campo elettrico.

### 2.2.1 Ionizzazione nei gas

L'interazione tra la particella incidente e le molecole di gas contenute all'interno della camera a deriva comporta una perdita di energia da parte della prima in favore delle seconde. Questo scambio energetico può dare origine a due fenomeni diversi: eccitazione e ionizzazione delle molecole del gas. Il primo consiste nella transizione di un elettrone del gas dallo stato fondamentale allo stato eccitato descritto dall'equazione 2.7:



dove X rappresenta l'atomo di gas e p la particella incidente. Questo fenomeno coinvolge solamente gli elettroni risonanti ovvero quelli che possono spostarsi su un livello con energia pari a quella ceduta dalla particella. La sezione d'urto, ovvero la probabilità che questo fenomeno si verifichi, è nell'ordine di  $\sigma \simeq 10^{-17} \text{ cm}^2$ . Il secondo, cioè il fenomeno di ionizzazione, permette di creare una coppia ione-elettrone: l'energia scambiata è sufficiente a strappare un elettrone dall'atomo di gas. Questo processo è riportato nell'equazione 2.8:



dove X rappresenta l'atomo di gas, p la particella del fascio ed  $e^-$  l'elettrone liberato. Contrariamente al fenomeno di eccitazione, non è necessario che la particella incidente abbia un'energia specifica per ionizzare il gas, ma deve essere superiore all'energia che lega l'elettrone al nucleo. La sezione d'urto di questo processo è nell'ordine di  $\sigma \simeq 10^{-16} \text{ cm}^2$ .

Nel caso in cui gli elettroni siano strappati dalla particella incidente il processo è detto ionizzazione primaria. È possibile che gli elettroni liberati da questo processo

siano sufficientemente energetici per ionizzare altri atomi di gas e in questo caso si verifica ionizzazione secondaria. Nelle camere a deriva, il numero di coppie prodotte da particelle incidenti a una determinata energia non corrisponde al numero di molecole di gas che possono essere ionizzate da tale energia, ma sono da considerare anche i processi di eccitazione. L'energia necessaria per creare una coppia ione-elettrone dipende dal gas utilizzato all'interno del rivelatore: per l'argon questo valore è in media di 26 eV e per l'anidride carbonica di 33 eV. Conoscere il numero di molecole che vengono ionizzate permette di determinare l'efficienza del rivelatore. La risoluzione in energia della camera a deriva associata al passaggio di una particella incidente di energia  $E$  è:

$$R = 2.35 \sqrt{\frac{Fw}{E}} \quad (2.9)$$

dove  $w$  è l'energia media necessaria a ionizzare una molecola e  $F$  è il fattore di Fano che dipende dal gas che si considera, e che in generale è minore di 1. Una volta ionizzate le coppie ione-elettrone tendono a ricombinarsi. Questo processo, descritto nell'equazione 2.10 dove  $X$  rappresenta l'atomo di gas,  $e^-$  l'elettrone,  $\omega$  la pulsazione della radiazione emessa e  $\hbar$  la costante di Planck ridotta, si verifica a causa della forza elettrica che attrae reciprocamente elettroni e ioni che si legano emettendo un fotone di energia pari all'energia necessaria a formare il legame.



Il numero di ricombinazioni che si verifica nell'unità di tempo dipende dalla concentrazione di cariche positive e negative. Il numero di coppie ione-elettrone,  $n$ , diminuisce nel tempo,  $t$ , ed è pari a:

$$n = \frac{n_0}{1 + bn_0t} \quad (2.11)$$

dove  $n_0$  è la concentrazione di coppie al tempo  $t = 0$  e  $b$  un coefficiente che dipende dal tipo di gas utilizzato. Si osserva che per tempi molto lunghi il numero di coppie tende ad annullarsi, ovvero che più tempo passa dal momento in cui vengono create le coppie più ioni ed elettroni tendono a ricombinarsi. Si vuole evitare questo fenomeno all'interno delle camere a deriva, dal momento che la creazione di coppie rivela il passaggio di una particella. A questo scopo, all'interno della camera viene generato un campo elettrico che allontana elettroni e ioni producendo un segnale.

## 2.2.2 Moto delle cariche in un gas

Le coppie ione-elettrone di un gas, create dal passaggio di particelle cariche, si comportano in maniera diversa se si trovano in assenza o in presenza di un campo elettrico esterno. In entrambi i casi, le cariche liberate diffondono uniformemente dal punto in cui sono state prodotte. Durante il moto, gli ioni e gli elettroni urtano con altre molecole

perdendo energia e raggiungono l'equilibrio termico con il gas prima di ricombinarsi. All'equilibrio termico si ha che l'andamento delle velocità delle cariche è descritto dalla distribuzione di Maxwell-Boltzmann, equazione 2.12:

$$f(v) = \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} 4\pi v^2 e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}} \quad (2.12)$$

dove  $T$  è la temperatura,  $m$  la massa della carica,  $v$  la velocità e  $k_B$  la costante di Boltzmann. La media della distribuzione, equazione 2.13, permette di stimare l'ordine di grandezza delle velocità sia per gli elettroni,  $10^6$  cm/s, che per gli ioni  $10^4$  cm/s.

$$v = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \quad (2.13)$$

Dalla teoria cinetica dei gas, la distribuzione lineare delle cariche, dopo aver diffuso per un tempo  $t$ , risulta gaussiana:

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \quad (2.14)$$

dove  $N_0$  è il numero totale di cariche,  $x$  la distanza dal punto di creazione e  $D$  il coefficiente di diffusione. La deviazione standard della distribuzione, riportata in 2.15, è legata alla risoluzione spaziale della camera a deriva, cioè alla precisione con cui questa può misurare il punto in cui è passata la particella incidente, e aumenta con il tempo  $t$  e dipende dal coefficiente di diffusione  $D$ .

$$\sigma(x) = \sqrt{2Dt} \quad (2.15)$$

Quest'ultimo dipende dal prodotto tra il libero cammino medio,  $\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} p \sigma_0}$ , e la velocità media  $v$ :

$$D = \frac{1}{3} v \lambda = \frac{2}{3 p \sigma_0 \sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{(k_B T)^3}{m}} \quad (2.16)$$

dove  $p$  è la pressione e  $\sigma_0$  la sezione d'urto totale. Nel caso in cui sia presente anche un campo elettrico esterno, come all'interno di una camera a deriva, oltre al moto di diffusione, le cariche vengono accelerate lungo le linee di campo finché non urtano altre molecole di gas. Gli urti limitano la massima velocità raggiungibile dalle cariche. La velocità media delle cariche durante questo processo prende il nome di velocità di deriva e si sovrappone al moto termico delle cariche. La capacità delle cariche di muoversi all'interno del gas sotto l'effetto di un campo elettrico si definisce mobilità ed è data da:

$$\mu = \frac{u}{E} \quad (2.17)$$

dove  $u$  rappresenta la velocità di deriva e  $E$  il campo elettrico. Per gli ioni positivi la velocità di deriva dipende da  $E/p$ , ovvero dal rapporto tra il campo elettrico e la

pressione; la mobilità risulta quindi costante a pressione costante. Per gas ideali vale la relazione 2.18 che lega il coefficiente di diffusione,  $D$ , alla mobilità,  $\mu$ .

$$\frac{D}{\mu} = \frac{k_B T}{e} \quad (2.18)$$

Questa equazione, nota come relazione di Einstein, descrive il moto diffusivo sotto l'azione di un campo elettrico esterno. Si osserva che il rapporto tra il coefficiente di diffusione e la mobilità dipende dalla temperatura,  $T$ , dalla costante di Boltzmann,  $k_B$ , e dalla carica elementare,  $e$ . Se la temperatura è costante si osserva che la relazione tra il coefficiente di diffusione e la mobilità è lineare. La mobilità degli elettroni è funzione del campo elettrico ed è maggiore rispetto a quella degli ioni positivi. L'aumento in velocità degli elettroni può influenzare il coefficiente di diffusione e di conseguenza aumenta la dispersione spaziale, riportata nella 2.15, riducendo la risoluzione della camera a deriva.

Quando il campo elettrico è sufficientemente intenso gli elettroni, prodotti da ionizzazione primaria, vengono accelerati e acquisiscono energia sufficiente per ionizzare a loro volta altre molecole di gas; a loro volta, gli elettroni secondari producono ionizzazione terziaria e così via, formando una valanga. Data la maggiore mobilità degli elettroni rispetto agli ioni, la valanga sviluppa una forma a goccia con gli elettroni presenti nella testa e gli ioni positivi nella coda. La probabilità che un elettrone ionizzi una molecola di gas è data da:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} \quad (2.19)$$

dove  $\lambda$  è il libero cammino medio dell'elettrone. Se si considera un numero  $n_0$  di elettroni liberi in un certo istante allora il numero di elettroni liberati dopo aver percorso un cammino  $x$  è dato da:

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (2.20)$$

Conoscendo il numero di elettroni prima e dopo la valanga è possibile calcolare il fattore di moltiplicazione come:

$$M = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x} \quad (2.21)$$

se il campo elettrico risulta uniforme. Se questo non si verifica il fattore di moltiplicazione si esprime come:

$$M = e^{\int_{r_0}^{r_1} \alpha(x) dx} \quad (2.22)$$

Il valore che può assumere il fattore di moltiplicazione è limitato superiormente a  $10^8$  in quanto superandolo si verificherebbe il breakdown della camera.

### 2.2.3 Funzionamento della camera

Il principio di funzionamento su cui si basa la camera si può studiare considerando solamente una cella costituita da un anodo e da un catodo riempita con una miscela

di gas come mostrato in Fig. 2.1. Quando una particella carica attraversa la camera cede energia alle molecole di gas contenute al suo interno, eccitandole e ionizzandole. Le coppie ione-elettrone vengono trasportate dal campo elettrico rispettivamente verso il catodo e l'anodo.

Il campo elettrico generato all'interno della camera deve avere un'intensità sufficiente per impedire alle coppie ione-elettrone di ricombinarsi. In particolare, le camere a deriva operano in regime proporzionale, ovvero il campo elettrico è tale da accelerare gli elettroni liberati affinché raggiungano un'energia tale da poter ionizzare a loro volta altre molecole di gas. Gli elettroni liberati dai processi di ionizzazione secondaria sono a loro volta accelerati e originano processi di ionizzazione a valanga. Questo processo avviene in prossimità dell'anodo, in quanto il campo elettrico è più intenso in questa regione della cella e permette di amplificare la corrente prodotta, ovvero il segnale in uscita, di un fattore nell'ordine di  $10^3 - 10^4$ . L'amplificazione del segnale dipende anche dal gas o dalla miscela di gas che viene utilizzata all'interno della camera. Il gas più comune che viene utilizzato è l'argon puro, Ar, in quanto permette il funzionamento della camera a tensioni non troppo elevate. Questo viene miscelato con l'anidride carbonica,  $\text{CO}_2$ , che diminuisce il valore della velocità di deriva al fine di migliorare la risoluzione spaziale dello strumento e permette di assorbire i fotoni che sono stati liberati nel gas e di dissipare l'energia attraverso la dissociazione delle sue molecole gli urti elastici.

Quando gli elettroni raggiungono l'anodo viene registrato il tempo di deriva. Quest'ultimo viene valutato rispetto ad un riferimento temporale che identifica il passaggio della particella carica e l'inizio del moto di deriva degli elettroni: tipicamente si utilizzano rivelatori a scintillazione che coprono tutta la possibile area di impatto della particella e ne registrano il passaggio. Un rivelatore a scintillazione sfrutta la capacità di alcuni materiali di emettere luce quando vengono attraversati da particelle cariche. Il segnale luminoso può essere considerato istantaneo rispetto al passaggio della particella, mentre il tempo di deriva è tipicamente dell'ordine di alcuni microsecondi.

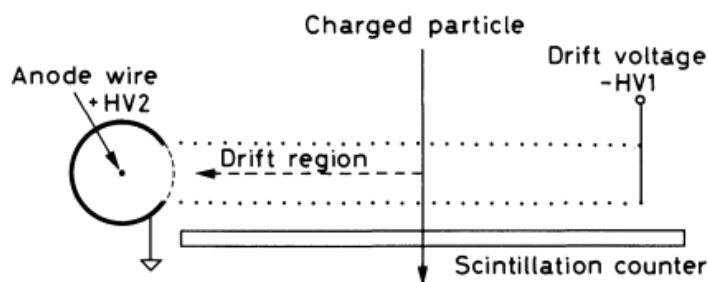


Figura 2.1: Rappresentazione schematica di una cella della camera a deriva. A sinistra si osserva l'anodo e a destra il catodo. All'interno di questa regione è possibile rivelare il passaggio di una particella carica. Sotto la cella è presente un rivelatore a scintillazione che fornisce il riferimento temporale rispetto al quale si misura il tempo di deriva [13].

La traccia della particella viene ricostruita conoscendo la velocità di deriva e il tempo che impiega a raggiungere l'anodo, detto tempo di deriva, a partire dall'equazione 2.23.

$$x = \int_{t_0}^{t_1} v dt \quad (2.23)$$

Se la velocità di deriva della camera è costante la relazione tra la distanza del punto di impatto della particella con la camera e il tempo di deriva è lineare. L'ordine di grandezza della velocità di deriva è tipicamente di  $5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ . L'alternanza sullo stesso piano di fili anodici e fili catodici paralleli permette di realizzare le camere a deriva planari come mostrato in figura 2.2. In queste camere i fili catodici sono detti fili di campo mentre quelli anodici sono detti fili di *sense* (sui quali si registra il segnale).

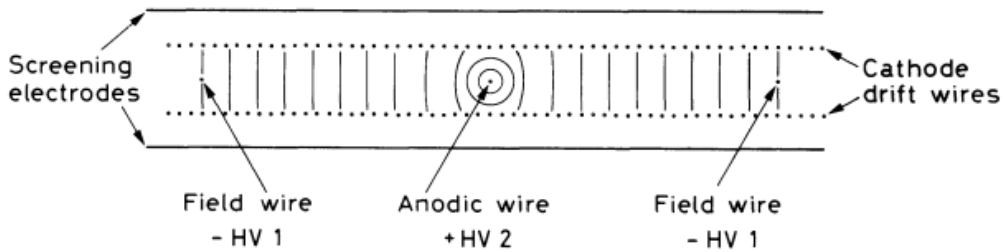


Figura 2.2: Rappresentazione schematica di una camera a deriva planare. Si osservano l'alternanza di fili catodici e anodici sul piano centrale e le linee equipotenziali. La camera è delimitata superiormente e inferiormente da piani catodici o da lamine isolanti [9].

La misura del tempo di deriva non è sufficiente a determinare se la particella incidente è passata a destra o a sinistra della dell'anodo. Per risolvere questa ambiguità e per aumentare la precisione con cui si ricostruisce la posizione in cui avviene l'interazione tra la particella e il mezzo gassoso, si possono sovrapporre più piani in ognuno dei quali i fili hanno orientazione diversa rispetto agli altri. Allineando più camere a deriva è possibile conoscere più punti attraverso i quali passa la particella e di conseguenza è possibile ricostruirne la traiettoria. La risoluzione della camera sulla misura di posizione, equazione 2.24, dipende dal coefficiente di diffusione  $D$ , dalla mobilità  $\mu$ , dall'intensità del campo elettrico  $E$  e dalla lunghezza del cammino di deriva  $x$ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{2Dx}{\mu E}} \quad (2.24)$$

Per aumentare la risoluzione dello strumento si diminuisce la distanza tra i fili della camera; ciò permette anche di minimizzare l'effetto della diffusione ed evita di utilizzare voltaggi eccessivamente alti. La risoluzione spaziale per una camera a deriva è dell'ordine di  $50 - 100 \mu\text{m}$ .

## 2.3 Il prototipo della camera a deriva

Il tracciatore che sarà situato all'interno di SAND potrebbe essere sviluppato utilizzando delle camere a deriva, come anticipato nella sezione 1.4.3. Per studiare questa possibilità, è stato realizzato dalla sezione INFN di Bologna un piccolo prototipo di camera a deriva. La camera ha una superficie di 300 mm × 300 mm ed è realizzata all'interno di una cornice metallica. Al suo interno si trovano tre piani di fili posti ad altezze diverse che sono separati tra loro da uno strato di mylar bialluminato. Su ogni piano sono presenti 25 fili che risultano paralleli tra loro. La loro inclinazione nel piano XY del sistema di riferimento della camera stessa è diversa sui tre piani posti ad altezza diversa: dal basso verso l'alto sono disposti a  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $5^\circ$ . In ogni piano la distanza tra i fili anodici e i fili catodici è di 10 mm. Lo schema costruttivo del prototipo è riportato in Fig. 2.3.

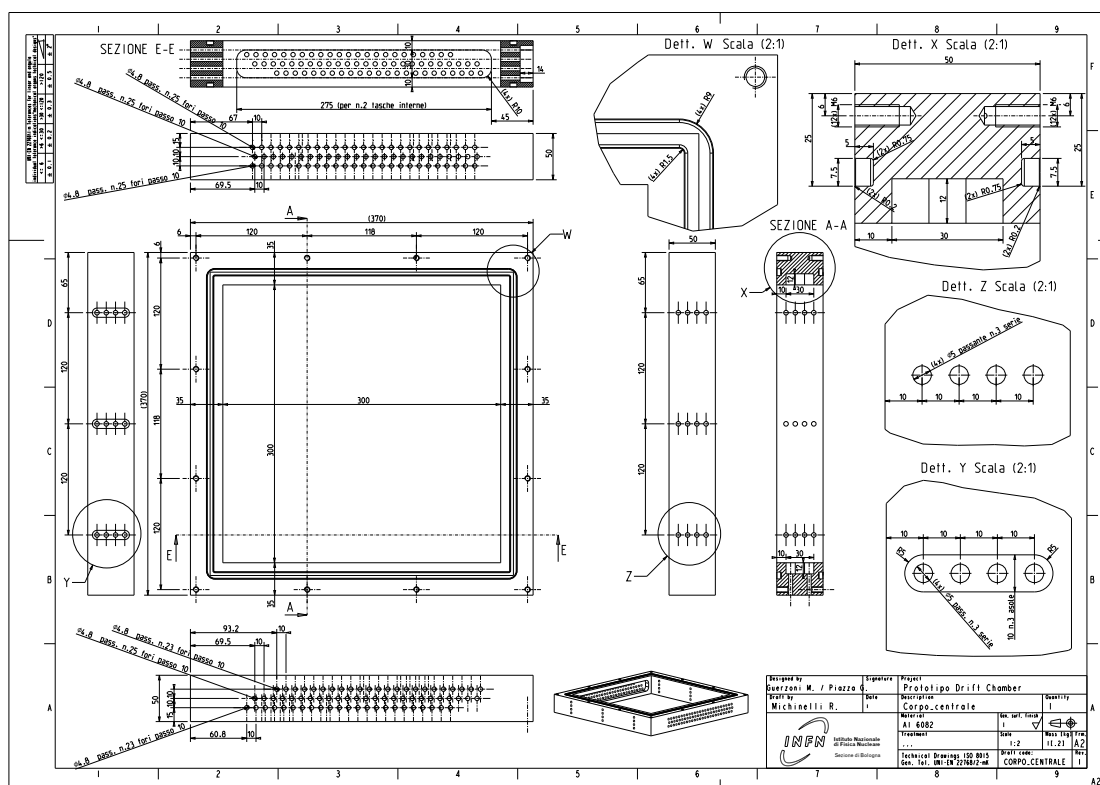


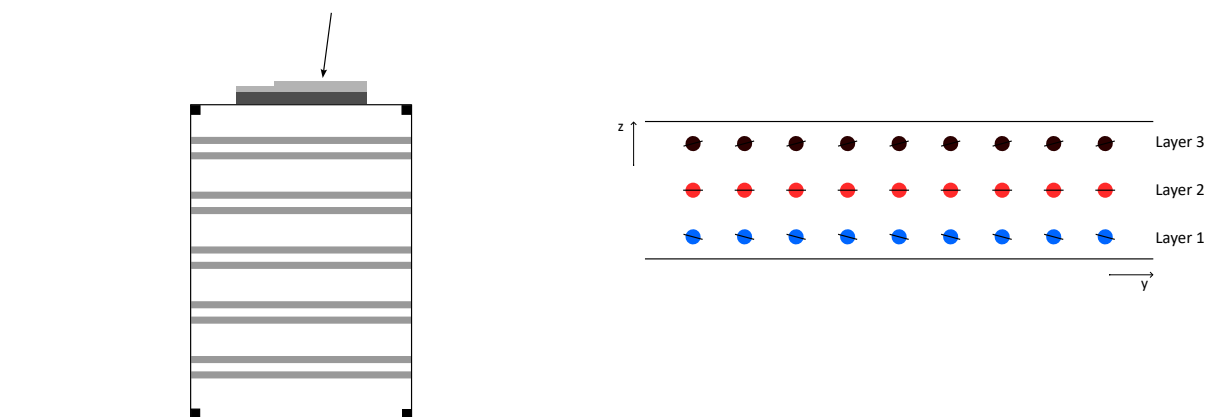
Figura 2.3: Disegno tecnico del corpo centrale del prototipo della camera a deriva: sono riportati gli schemi della camera sia nel piano XY sia nel piano YZ del sistema di riferimento della camera stessa.

Per ottenere il campo elettrico che trasporta le particelle cariche all'interno della camera è applicata una tensione di  $-1500$  V ai fili catodici e una tensione di  $+1500$  V a quelli anodici. I piani di mylar e la cornice della camera sono a una tensione di 0 V.

Il volume interno della camera è riempito con una miscela di gas composta all'85% da argon e al 15% da anidride carbonica.

### 2.3.1 Apparato sperimentale e caratterizzazione della camera

Il prototipo della camera a deriva è stato caratterizzato sfruttando il flusso di raggi cosmici. Questi attraversano inizialmente due piani di scintillatore posizionati sopra la camera a deriva e proseguono attraverso un tracciatore esterno a cinque moduli, distanti tra loro 250 mm mostrato in Fig. 2.4a. Ognuno di questi ultimi è costituito da due piani di scintillatore, distanti tra loro 40 mm, che registrano il passaggio della particella in X e in Y. Il tracciatore esterno è utilizzato come riferimento al fine di effettuare un controllo incrociato con la camera a deriva. I due piani di scintillatore posti sopra alla camera sono collegati alle componenti elettroniche che permettono di leggere i segnali attraverso dei PMT, Photo Multiplier, ovvero dei tubi fotomoltiplicatori che hanno una risoluzione temporale di 200 ps. Dodici fili di *sense* della camera a deriva sono stati collegati a degli amplificatori riutilizzati dall'esperimento KLOE e collegati a due schede elettroniche, digitizer (in seguito identificate come D1 e D2), secondo lo schema riportato in Fig. 2.5. I layer 1, 2, 3 della camera a deriva si trovano rispettivamente 237 mm, 247 mm e 257 mm sopra l'ultimo piano del tracciatore, come mostrato in Fig. 2.4b.



(a) Schema dell'apparato sperimentale utilizzato per la caratterizzazione della camera a deriva. Dall'alto verso il basso sono rappresentati i due piani di scintillatore, il prototipo della camera e i cinque moduli del tracciatore a scintillazione costituiti da due piani: quello superiore per misurare la posizione in X e quello inferiore per misurare la posizione in Y.

(b) Disposizione dei fili della camera a deriva visti nel piano YZ: in blu sono rappresentati i fili del layer inferiore orientati a  $-5^\circ$ , in rosso quelli del layer intermedio orientati a  $0^\circ$  e in nero quelli del layer superiore orientati a  $5^\circ$ .

Figura 2.4: Schema dell'apparato sperimentale utilizzato per la caratterizzazione della camera a deriva e schema della disposizione dei fili nella camera a deriva.



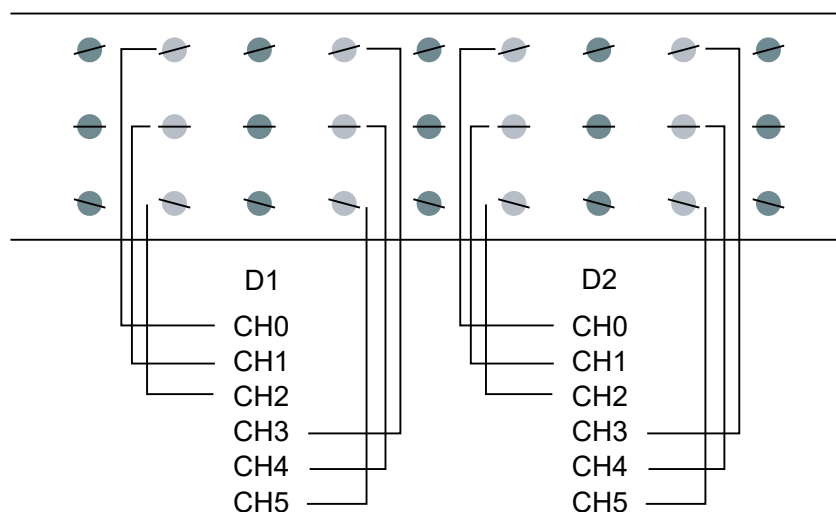


Figura 2.5: Schema di lettura del segnale proveniente dalla camera. In grigio scuro sono rappresentati i fili di campo e in grigio chiaro sono rappresentati i fili di *sense* collegati ai rispettivi canali delle due schede elettroniche, D1 e D2, che li leggono.

I dati vengono acquisiti e trascritti su file nel sistema di riferimento del tracciatore e la disposizione dei fili in questo sistema di riferimento è mostrata in Fig. 2.6.

I dati acquisiti dalla camera a deriva e dai piani di scintillatore posti sopra alla camera sono delle waveform, un esempio è mostrato in Fig. 2.7a. Questi segnali sono caratterizzati da un'ampiezza in tensione, dal tempo al 10%, ovvero il tempo che il segnale impiega a raggiungere il 10% del fronte di salita della sua ampiezza, e dalla carica raccolta ovvero l'integrale della waveform stessa. I segnali acquisiti dalla camera vengono in un primo momento filtrati dal rumore di fondo dovuto all'apparato sperimentale stesso. Osservando la distribuzione di carica raccolta per ogni canale della camera a deriva è stato possibile determinare il rumore associato a ognuno di essi ed è stata stimata una soglia al di sopra della quale si possono distinguere i segnali generati dalle particelle incidenti. In particolare, un filo della camera a deriva si considera acceso, ovvero segnala il passaggio di una particella, se la carica che raccoglie è superiore a 20 pC. Un ragionamento analogo viene applicato al segnale acquisito dai PMT. In questo caso il valore in carica fissato affinché sia acquisito un segnale è pari a 10 pC. Questi valori sono stati ottenuti per ogni canale di lettura eseguendo il fit sul pedestallo della distribuzione di carica raccolta, ovvero la parte iniziale delle distribuzioni, con una gaussiana da cui è stato estratto il valore della deviazione standard. La soglia è stata valutata come 5 deviazioni standard. Un esempio di queste distribuzioni è riportato in Fig. 2.7b. I segnali temporali acquisiti dai PMT sono stati utilizzati come trigger per i segnali temporali acquisiti dai diversi canali della camera a deriva. Il tracciatore acquisisce la posizione della traccia su tutti e cinque i moduli nel proprio sistema di riferimento.

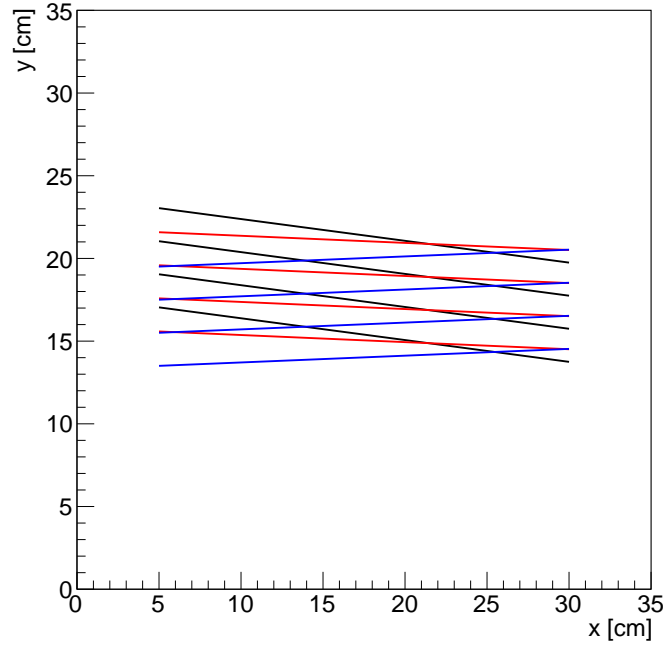
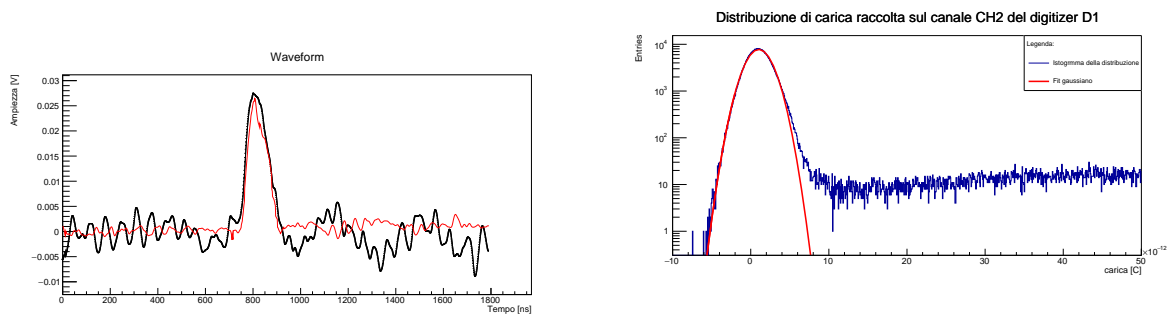


Figura 2.6: Disposizione dei fili sul piano XY nel sistema di riferimento del tracciatore all'interno del prototipo di camera a deriva: in blu sono rappresentati i fili del layer inferiore, in rosso quelli del layer intermedio e in nero quelli del layer superiore.



(a) Esempio di un segnale acquisito: in nero si osserva la waveform acquisita e in rosso la waveform filtrata dal rumore.

(b) Distribuzione della carica raccolta sul canale CH2 del digitizer D1 riportata in scala logaritmica. In rosso si osserva il fit gaussiano del pedestal.

Figura 2.7: Esempi di segnali acquisiti e di analisi preliminari eseguite sui segnali stessi.

# Capitolo 3

## Analisi dei dati del prototipo di camera a deriva

In questo Capitolo sono presentati i risultati del lavoro di analisi che ha come scopo la ricostruzione delle tracce dei raggi cosmici che hanno attraversato la camera a deriva. Sono stati analizzati 605303 eventi che hanno prodotto segnali nel prototipo, durante un run di acquisizione di 3 giorni della camera a deriva nei laboratori dell'INFN di Bologna. Ogni evento analizzato è caratterizzato dalle coordinate spaziali sull'ultimo piano del tracciatore valutate nel sistema di riferimento del tracciatore, dall'ampiezza picco-picco del segnale per ogni canale letto della camera deriva, dal tempo al 10% del segnale e dalla carica raccolta, ovvero l'integrale del segnale. Le tracce incidenti sull'apparato sperimentale, descritto in 2.3.1, sono rettilinee e ogni evento è caratterizzato anche dai coefficienti angolari delle rette XZ e YZ che rappresentano la proiezione della traiettoria della traccia. Ogni evento può essere costituito da più tracce che attraversano contemporaneamente l'apparato.

### 3.1 Efficienza della camera a deriva

Per verificare il funzionamento dei canali della camera a deriva che sono letti dall'elettronica, come riportato in Fig. 2.5, è stato sviluppato un algoritmo che permettesse di valutare l'efficienza di ciascun canale della camera in funzione della posizione nel piano XY avendo fissato la posizione in Z alla quale si trova nel sistema di riferimento del tracciatore. In particolare, si è ottenuto un istogramma bidimensionale per ogni canale acceso in cui ogni bin contiene il valore di efficienza del canale in quella posizione spaziale. L'efficienza è stata valutata come il numero di volte in cui si è acceso il canale della camera che si analizza rispetto al numero di volte in cui il tracciatore ha segnalato una

particella a una certa altezza in  $Z$  fissata, cioè:

$$\epsilon_{XY} = \frac{N_{CHD_{XY}}}{N_{T_{XY}}} \quad (3.1)$$

Questo permette di ottenere l'efficienza di ogni canale per unità di superficie della camera a deriva. Per valutare la posizione della traccia nel piano  $XY$  su cui si trovano i fili di *sense* della camera sono state utilizzate le relazioni lineari:

$$x_{CHD_Z} = m_X \cdot \Delta z_{CHD} + x_T \quad (3.2)$$

$$y_{CHD_Z} = m_Y \cdot \Delta z_{CHD} + y_T \quad (3.3)$$

I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 3.1 e 3.2: l'efficienza media della cella è risultata superiore al 90%. Si osserva come i canali di lettura 0 e 3 del digitizer D1 presentino molto rumore.

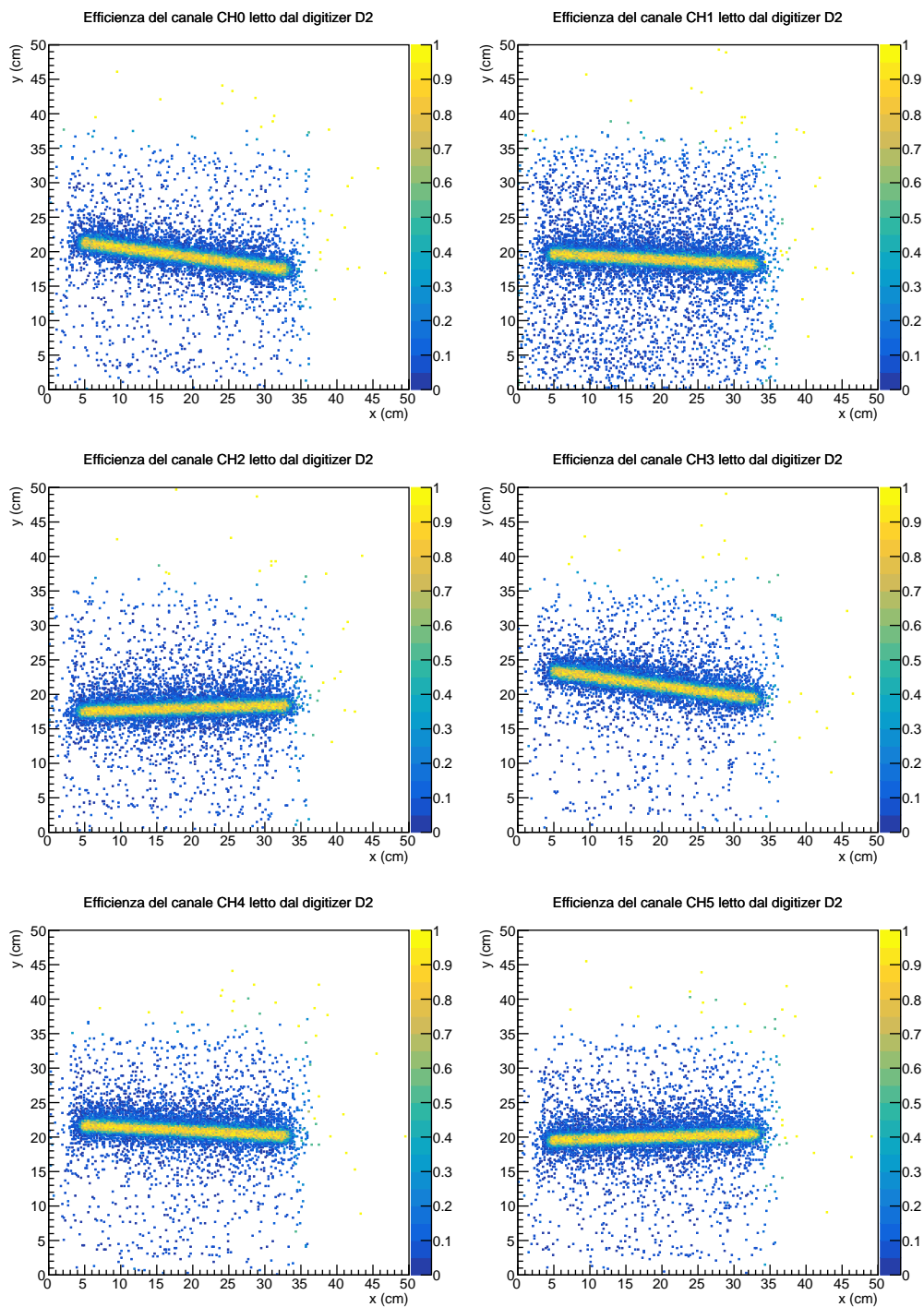


Figura 3.1: Efficienze spaziali dei canali di *sense* della camera a deriva letti dai digitizer D2.

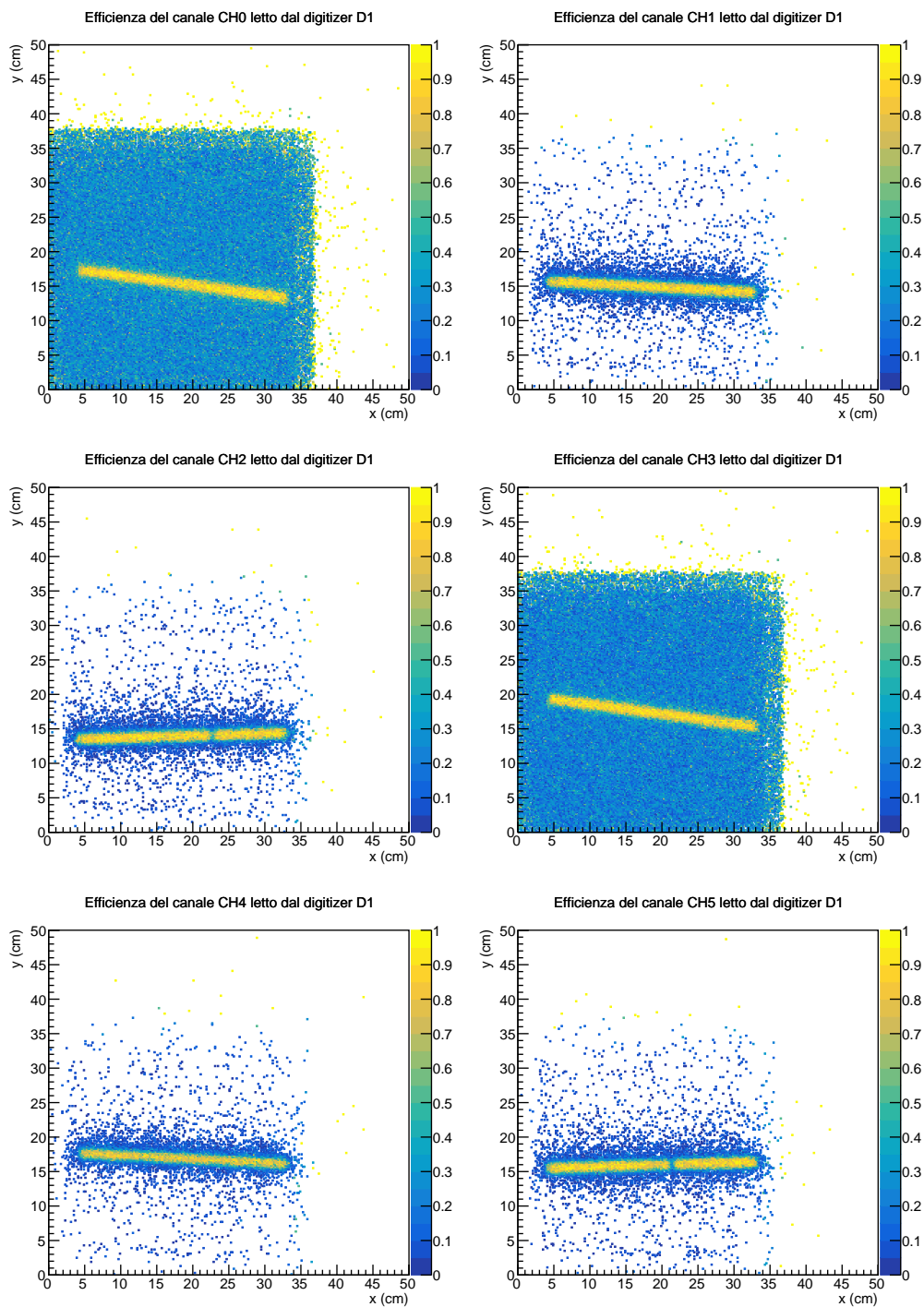


Figura 3.2: Efficienze spaziali dei canali di *sense* della camera a deriva letti dai digitizer D1.

## 3.2 Selezione delle tracce

In un secondo momento si è eseguita una selezione delle tracce che hanno indotto un segnale sia sul tracciatore che sulla camera a deriva. Si richiede che queste accendano almeno un filo di *sense* della camera per piano e che ci sia segnale anche su un piano di scintillatore posto sopra alla camera, per poter avere un riferimento temporale. Sono stati esclusi dalla selezione due canali di lettura rumorosi: il canale 0 e 3 del digitizer D1, segnalati nel paragrafo precedente. Vengono selezionate di conseguenza tracce con direzione prossima alla verticale che attraversano completamente la camera. In particolare, è stato realizzato un algoritmo che produce un nuovo file di dati contenente gli eventi che soddisfano queste condizioni. Vengono salvate le informazioni date dal tracciatore, ovvero le coordinate spaziali nel sistema di riferimento del tracciatore e i coefficienti angolari delle rette sui piani ZX e ZY che rappresentano le proiezioni della traccia nei rispettivi piani. Per ogni evento sono stati salvati i tempi di deriva relativi ai fili che sono stati accesi dal passaggio della particella. A partire da questo nuovo file di dati sono state valutate le efficienze per unità di superficie per gli eventi selezionati. Il metodo con cui sono state ricavate queste ultime è lo stesso riportato in sezione 3.1 e i risultati ottenuti sono mostrati in Fig. 3.3 e 3.4.

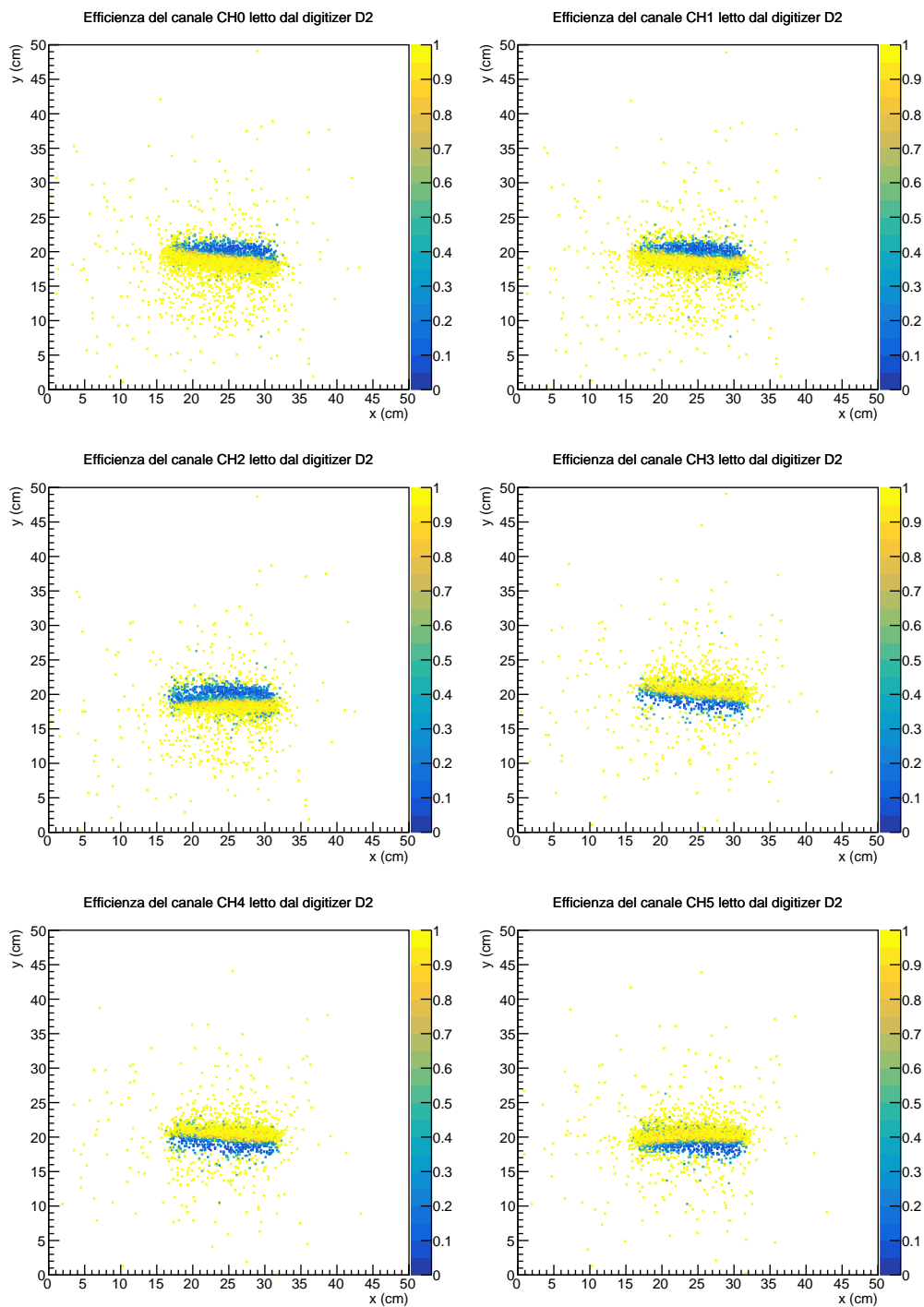


Figura 3.3: Efficienze spaziali dei canali di *sense* della camera a deriva letti dai digitizer D2 dopo aver selezionato un sottoinsieme di tracce.



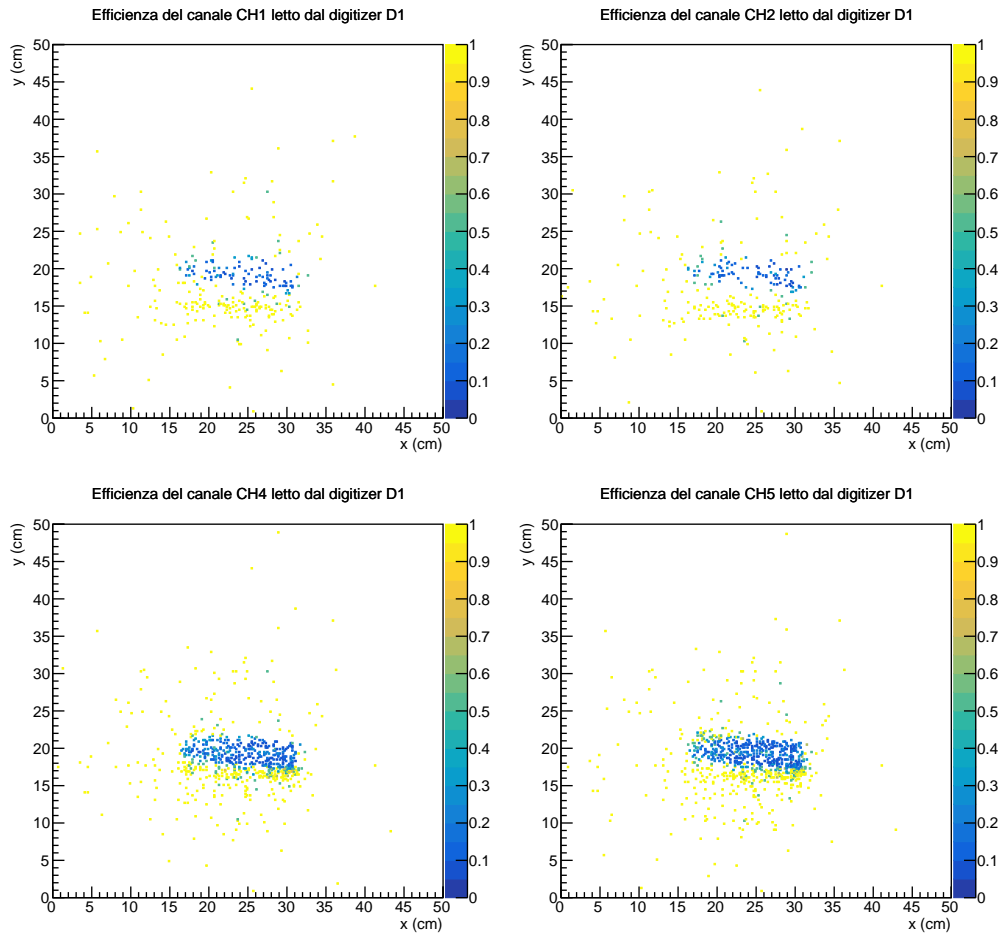


Figura 3.4: Efficienze spaziali dei canali di *sense* della camera a deriva letti dai digitizer D1 dopo aver selezionato un sottoinsieme di tracce.

Si osserva come l'efficienza sia maggiore nei canali letti dal digitizer D2. Confrontando le Fig. 3.1 e 3.2 con le Fig. 3.3 e 3.4, si osserva come la superficie con efficienza maggiore sia concentrata sempre in prossimità dei fili di *sense* e concentrata nella regione del piano XZ in cui si sovrappone il piano di scintillatore e la camera a deriva.

In seguito sono state analizzate le distribuzioni dei tempi di drift per ogni canale. Questi sono stati valutati a partire dal segnale dato dal PMT che è stato utilizzato come trigger. Inoltre, è stato considerato un ritardo (di circa 40 ns) con cui il digitizer D1 acquisisce rispetto al digitizer D2 e questo offset è stato sottratto dai canali del digitizer D1 per correggere il segnale. Le distribuzioni temporali ottenute per ogni canale sono riportate in Fig. 3.5 e 3.6.

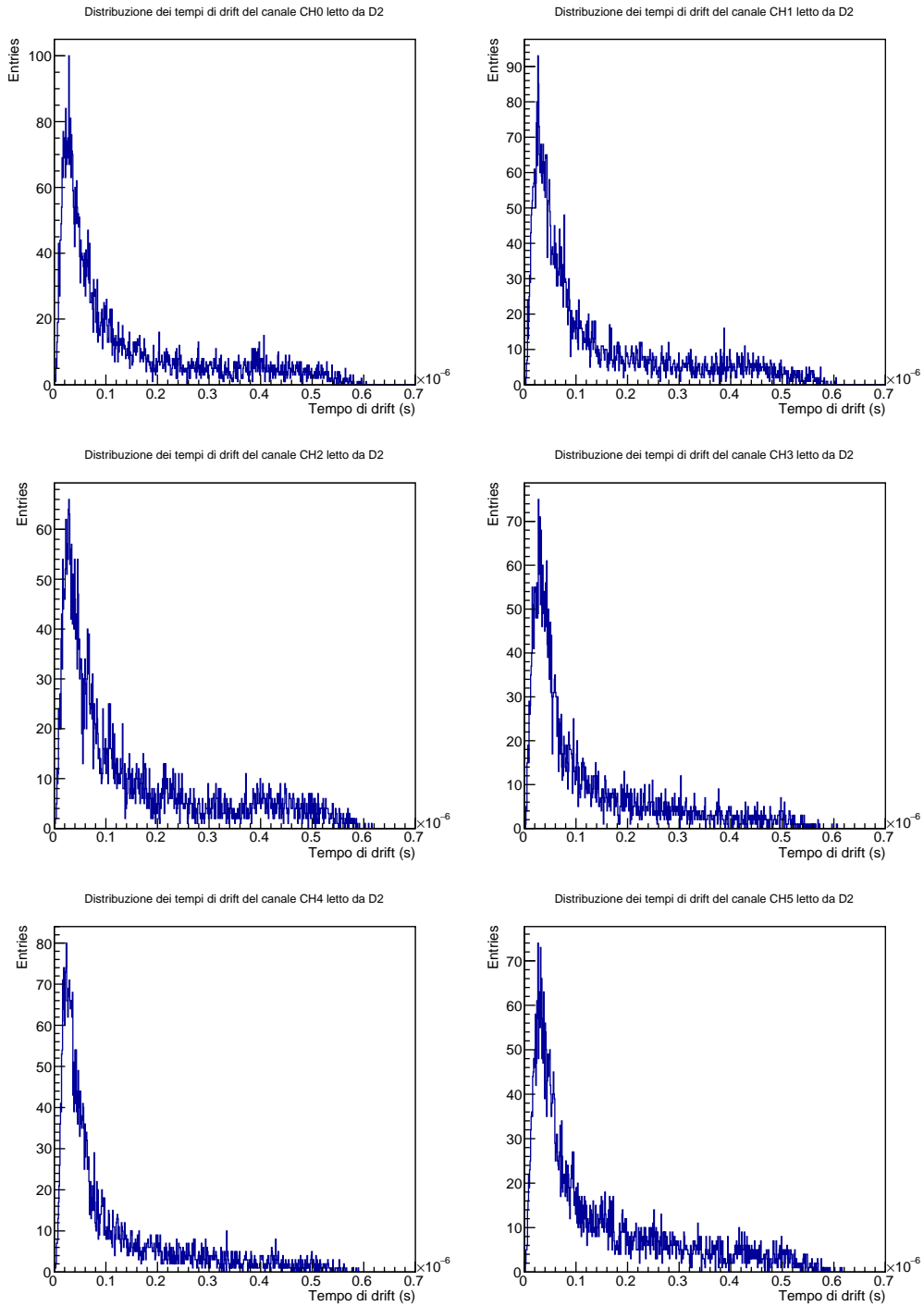


Figura 3.5: Distribuzione dei tempi di drift per ogni canale acquisito da D2.

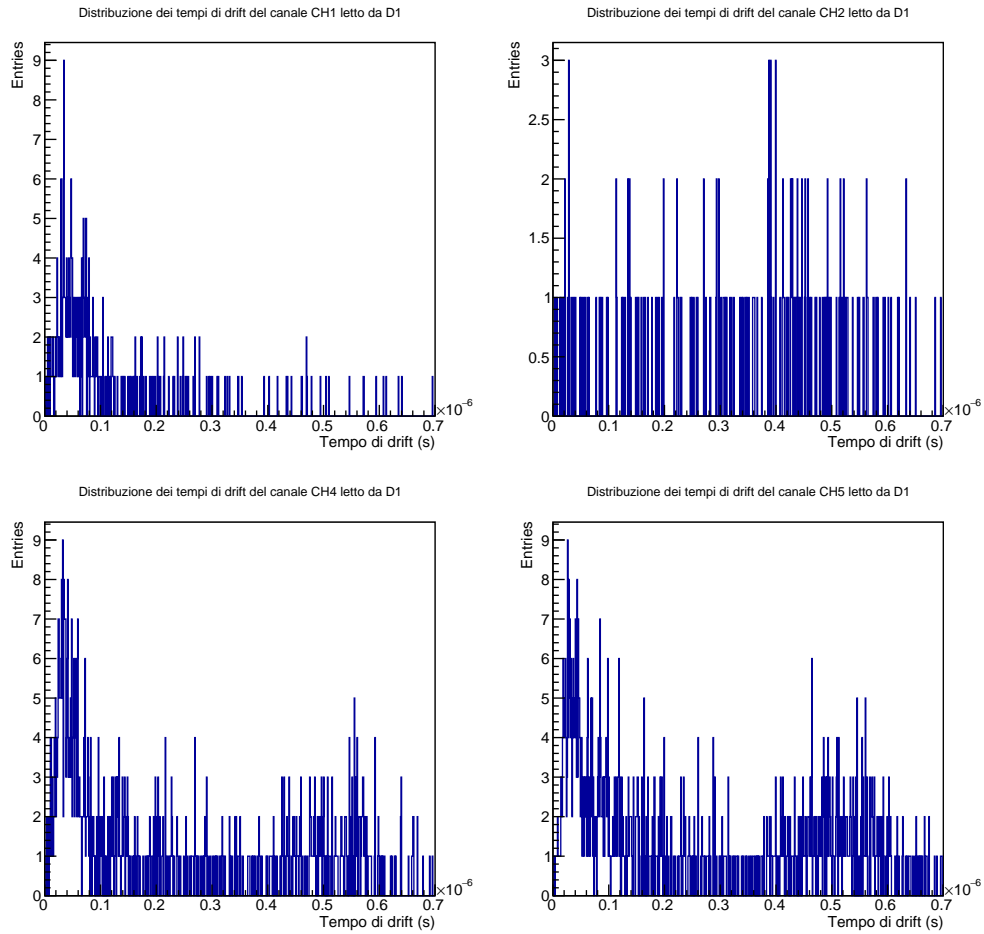


Figura 3.6: Distribuzione dei tempi di drift per ogni canale acquisito da D1.

Si osserva come le distribuzioni siano maggiormente popolate nel range tra 0 ns e 200 ns. Questo risulta coerente con una velocità di drift di  $50 \mu\text{m}/\text{ns}$  e il passo della cella pari a 1 cm.

### 3.3 Ricostruzione delle tracce

A partire dal file contenente i dati che soddisfano la condizione di accendere almeno un filo della camera a drift su tutti e tre i piani oltre al segnale sul piano di scintillatore, è stato valutato il raggio di drift nel piano ZY (con il valore di X fissato) intorno al filo della camera nel quale si è originato il segnale, che in questo piano è rappresentato da un punto. In particolare, per determinare il punto in cui si trova il filo nel piano ZY nel sistema di riferimento del tracciatore è stato necessario proiettare la traccia della particella al valore di Z a cui si trova il filo della camera a deriva secondo la:

$$x_W = m_X \cdot z_T + q_T \quad (3.4)$$

dove  $m_X$  è il coefficiente angolare della retta e  $q_T$  è l'intercetta della proiezione della traccia, entrambi valutati nel piano ZX del sistema di riferimento del tracciatore. In questo modo si fissa la coordinata X ed è possibile studiare la traiettoria della traccia sul piano ZY. Per trovare il punto in cui si trova un filo su questo piano, avendo fissato il valore  $x_W$  come indicato in equazione 3.4, è necessario ricavare la coordinata  $y_W$  sulla base dell'equazione del filo nel piano XY del sistema di riferimento del tracciatore avendo fissato in precedenza il valore di Z al quale si trova. L'espressione che esprime  $y_W$  è data da:

$$y_W = m_W \cdot x_W + q_W \quad (3.5)$$

dove  $m_W$  è il coefficiente angolare che rappresenta l'inclinazione del filo  $i$ -esimo della camera a deriva nel piano XY del sistema di riferimento del tracciatore e  $q_W$  rappresenta l'intercetta dell'equazione della retta che codifica la posizione del filo sempre rispetto al sistema di riferimento del tracciatore. Applicando queste due relazioni per ogni filo che segnala il passaggio di una particella è possibile determinare la loro posizione nel piano ZY. Conoscendo le informazioni sui tempi di drift e la velocità di drift è possibile valutare la distanza a cui sono passate le particelle rispetto al filo. La relazione funzionale spazio-tempo è stata ricavata dai dati (vedi Fig. 3.9) ed è espressa da:

$$r_{drift} = \sqrt{\alpha \cdot t_D} \quad (3.6)$$

dove  $r_{drift}$  è la distanza a cui passa la traccia rispetto al filo,  $\alpha$  è un parametro costante e  $t_D$  il tempo di drift. In base alla relazione, si apre una circonferenza intorno a ogni filo che ha segnalato il passaggio della particella. Idealmente la traccia della particella dovrebbe essere tangente a tutte le circonferenze. Le tracce delle particelle sono visibili in Fig. 3.7.

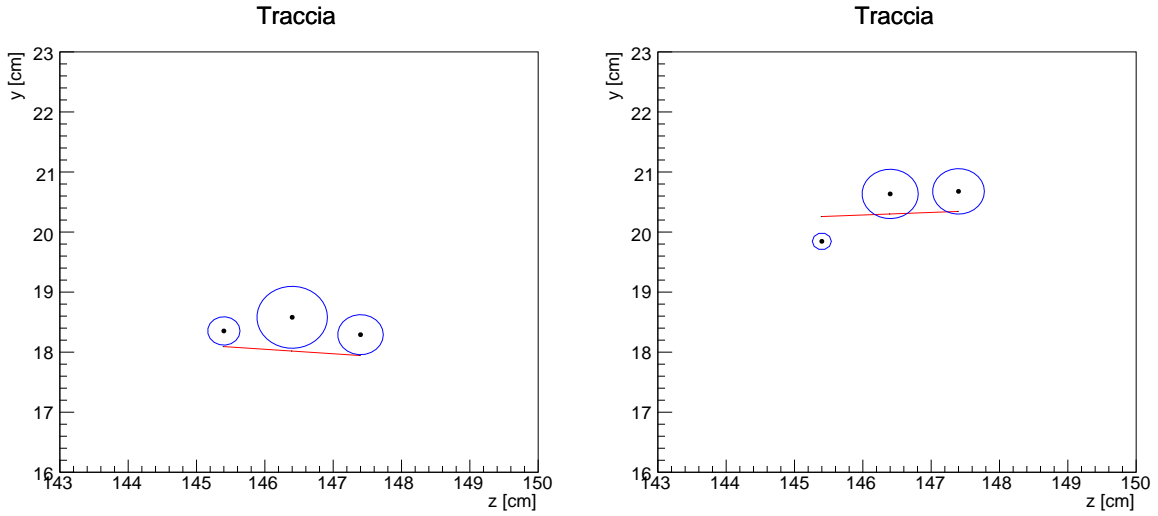


Figura 3.7: Tracce di particelle che attraversano la camera a deriva nel piano ZY. In rosso la traiettoria data dal tracciatore, in nero i fili della camera a deriva e in blu le circonferenze date dal tempo di drift.

Si osserva come queste non siano perfettamente tangenti, probabilmente anche a causa della proiezione sul piano ZY. Infatti, la traiettoria della particella è nello spazio tridimensionale e studiare la traccia di quest'ultima nel solo piano ZY costituisce un'approssimazione. La traccia in rosso è stata ricostruita a partire dai dati ottenuti dal tracciatore e proiettando la traccia alla coordinata Z del filo da cui si vuole calcolare la distanza, secondo l'equazione:

$$y_{CHDz} = m_Y \cdot z_{CHD} + q_T \quad (3.7)$$

dove  $m_X$  è il coefficiente angolare della retta e  $q_T$  è l'intercetta della proiezione della traccia entrambi valutati nel piano ZY del sistema di riferimento del tracciatore. Inoltre, è stata valutata la distanza in valore assoluto tra la traccia ricavata a partire dai dati ottenuti dal tracciatore e la posizione del filo proiettata sul piano ZY. Questa distanza risulta confrontabile con il raggio di drift come riportato in Fig. 3.8.

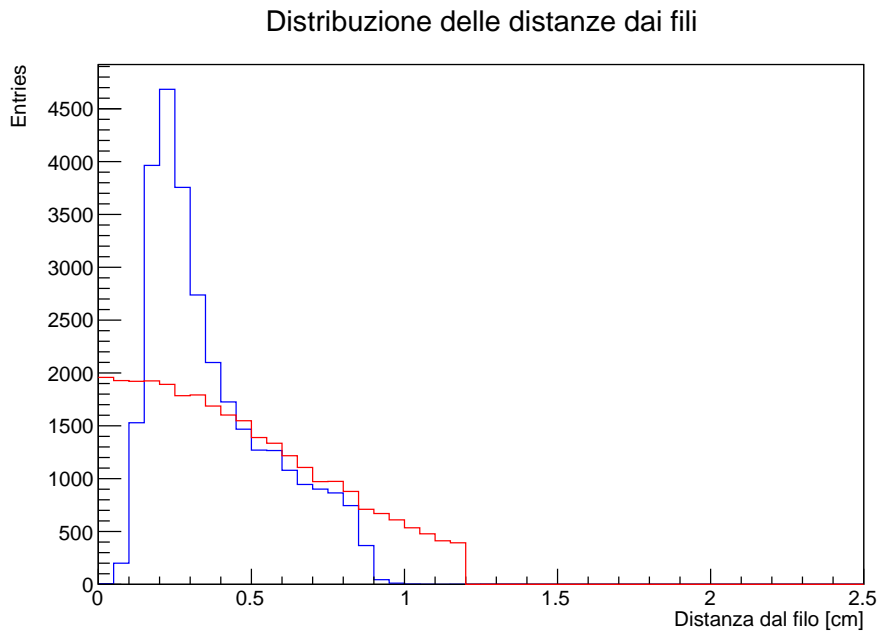


Figura 3.8: Distribuzione delle distanze delle tracce dal filo della camera date dal tracciatore, in rosso, e distribuzione dei raggi di drift, in blu.

Si osserva come le distribuzioni siano diverse tra loro ma siano distribuite nello stesso intervallo di valori. La diversa forma delle distribuzioni è da attribuire alla velocità di drift che non essendo costante all'interno della cella altera il modo in cui si calcola il raggio di drift.

In seguito è stato realizzato un istogramma che mette in corrispondenza i valori del tempo di drift e i valori delle distanze nel piano ZY tra il filo e la traccia per ogni filo acceso. I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 3.9.

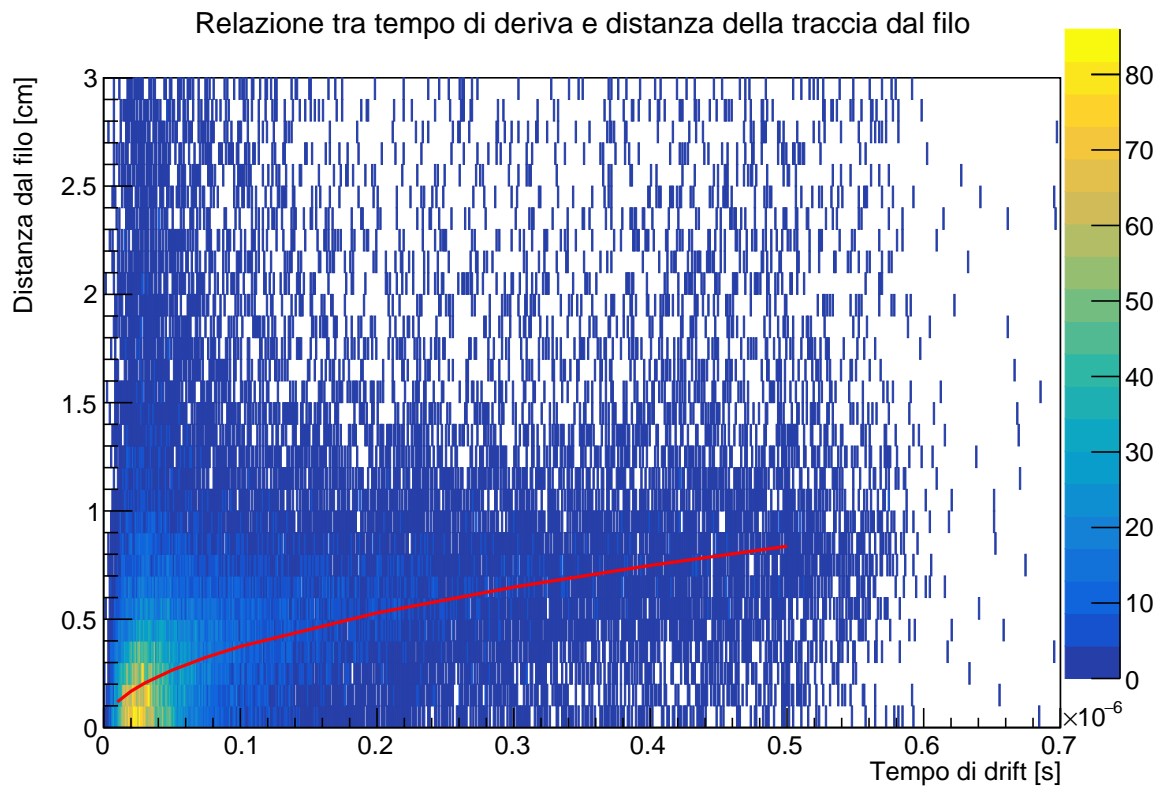


Figura 3.9: Distribuzione bidimensionale del tempo di drift e della distanza dal filo della traccia estratta dai dati del tracciatore. In rosso si osserva la relazione funzionale tra le due grandezze.

Si osserva una relazione funzionale tra le due grandezze. Questa relazione esprime in maniera qualitativa l'andamento della velocità di drift che non risulta essere costante come ci si attendeva. In questa analisi il parametro  $\alpha$  nella relazione 3.6 si stima essere  $\alpha = (1.04 \pm 0.03) \cdot 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

# Conclusione

Questo lavoro di tesi ha l'obiettivo di valutare le prestazioni di un prototipo di camera a deriva da inserire come tracciatore all'interno del rivelatore SAND nel Near Detector di DUNE. Il campione di dati utilizzato per fare una prima analisi delle prestazioni è stato acquisito durante un *run* di tre giorni all'INFN di Bologna. Dopo un'analisi preliminare in cui i dati acquisiti sono stati filtrati dal rumore, si sono valutate le efficienze spaziali dei canali. In seguito, sono stati selezionati dal campione di dati gli eventi che rappresentano il passaggio di una particella attraverso i tre piani della camera a deriva.

In questo lavoro di tesi è stato implementato un algoritmo di ricostruzione che ha permesso di valutare le distribuzioni dei tempi di drift e i raggi di drift. Le distribuzioni ottenute sono state confrontate con le distanze delle tracce dai fili del prototipo ottenute utilizzando come riferimento il tracciatore esterno. Si osserva che i valori ottenuti in entrambe le distribuzioni sono confrontabili tra loro e sono compatibili con le caratteristiche geometriche del prototipo. Inoltre, è stata trovata una relazione funzionale tra i tempi di drift e le distanze bidimensionali nel piano ZY della traccia dal filo. Le tracce bidimensionali delle particelle che hanno attraversato la camera a deriva sono state ricostruite in prima approssimazione e sono state visualizzate sul piano ZY.



# Bibliografia

- [1] B. Abi et al. “Volume I. Introduction to DUNE”. In: *Journal of Instrumentation* 15 (ago. 2020), T08008–T08008. DOI: [10.1088/1748-0221/15/08/T08008](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/T08008).
- [2] M. Adinolfi et al. “The KLOE electromagnetic calorimeter”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 482.1 (2002), pp. 364–386. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01502-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01502-9). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201015029>.
- [3] The DUNE Collaboration. “Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Near Detector Conceptual Design Report”. In: (2021). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.13910>. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.13910v1>.
- [4] The DUNE Collaboration. “Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume I: Introduction to DUNE”. In: (2020). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.02967>. URL: <https://arxiv.org/abs/2002.02967>.
- [5] The DUNE Collaboration. “Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report Volume 1: The LBNF and DUNE Projects”. In: (2016). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1601.05471>. URL: <https://arxiv.org/abs/1601.05471>.
- [6] The DUNE collaboration. *Deep Underground Neutrino Experiment*. URL: <https://www.dunescience.org/>.
- [7] Andrea Falcone. “Deep underground neutrino experiment: DUNE”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1041 (2022), p. 167217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167217>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900222005721>.
- [8] Claus Grupen e Boris Shwartz. *Particle detectors*. 2<sup>a</sup> ed. Cambridge university press, 2008.
- [9] William R Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. 2<sup>a</sup> ed. Springer Science & Business Media, 1994.

- [10] V. Papadimitriou et al. “Design Status of the LBNF/DUNE Beamline”. In: *Proc. 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC'18), Vancouver, BC, Canada, April 29-May 4, 2018*. International Particle Accelerator Conference 9. JACoW Publishing, 2018, pp. 902–904. DOI: doi : 10 . 18429 / JACoW - IPAC2018 - TUPAF075. URL: <http://jacow.org/ipac2018/papers/tupaf075.pdf>.
- [11] V. Pia, DUNE collaboration et al. “Reconstruction of neutrino interactions in SAND with an innovative liquid Argon imaging detector”. In: *Journal of Instrumentation* 19.02 (2024), p. C02073. DOI: 10.1088/1748-0221/19/02/C02073. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/19/02/C02073>.
- [12] ROOT. *A data analysis framework*. URL: <https://root.cern>.
- [13] Fabio Sauli. *Gaseous Radiation Detectors: Fundamentals and Applications*. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. Cambridge University Press, 2014.
- [14] Matteo Vicenzi. “SAND - System for on-Axis Neutrino Detection - in the DUNE Near Detector Complex”. In: mar. 2022, p. 248. DOI: 10.22323/1.402.0248.