

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”
Corso di Laurea in Fisica

Costruzione e messa in funzione
di un prototipo di camera a deriva
per l’esperimento DUNE

Relatore:
Prof. Sergio Bertolucci

Presentata da:
Giovanni Patrizio Perozzi

Correlatore:
Dr. Michele Pozzato

Anno Accademico 2024/2025

Sommario

L'argomento di questa tesi è la discussione di un prototipo di un tracciatore basato su una camera a deriva per uno dei componenti del Near Detector per l'esperimento DUNE(Deep Underground Neutrino Experiment). Partendo dall'analisi dei requisiti richiesti al rivelatore SAND, si definiscono i requisiti per il tracciatore e, di conseguenza, si progetta un prototipo per verificare che le sue performance siano congruenti alle specifiche richieste dalla fisica di DUNE. La tesi descrive nel dettaglio le fasi di costruzione e la prima messa in funzione del prototipo.

Indice

Introduzione	3
1 La fisica dei neutrini e l'esperimento DUNE	4
1.1 I neutrini	4
1.1.1 Storia	5
1.1.2 Quesiti aperti	6
1.2 Deep Underground Neutrino Experiment	8
1.3 Il fascio di neutrini	11
1.4 Far Detector	13
1.5 Near Detector	14
1.5.1 Componenti del Near Detector	15
1.6 SAND	16
1.6.1 Magnete	17
1.6.2 Calorimetro ECAL	17
1.6.3 GRAIN	18
1.6.4 L'Inner Tracker	18
1.7 Risultati attesi	20
2 Camera a deriva come tracciatore all'interno di SAND	22
2.1 Rivelazione dei neutrini	22
2.2 Principi di funzionamento della camera a deriva	23
2.2.1 Eccitazione e ionizzazione del gas	23
2.2.2 Moto degli elettroni e degli ioni nel gas	26
2.2.3 Funzionamento della camera a deriva	28
2.3 Prototipo di camera a deriva	31
2.3.1 Read out	32
3 Costruzione dell'apparato sperimentale	33
3.1 Introduzione	33
3.2 Componenti principali	34
3.2.1 Piani di mylar	34
3.2.2 Piano di fili	36

3.2.3 Printed Circuit Board	37
3.3 Procedura di tensionamento e saldatura	41
3.4 Assemblaggio finale	43
3.5 Test piano di fili	44
3.6 Tensione dei fili	45
3.7 Messa in funzione della camera	47
Conclusioni	49
Bibliografia	50

Introduzione

Nel corso degli ultimi anni, i neutrini, le particelle elementari più diffuse nell'universo, hanno suscitato notevole interesse scientifico poiché indicano l'esistenza di fenomeni fisici oltre il Modello Standard, dando luogo a un ricco programma sperimentale che si propone di risolvere diverse questioni ancora aperte sulla loro natura e con implicazioni profonde sulla nostra visione del mondo fisico.

L'esperimento DUNE ha l'obiettivo di osservare e studiare l'oscillazione dei neutrini su lunga distanza. I suoi scopi principali sono la misura di una possibile violazione della simmetria CP nel settore leptonic e la determinazione dell'ordinamento delle masse dei neutrini. DUNE, attualmente in fase di costruzione negli Stati Uniti, sarà formato da un complesso di rivelatori (Near Detector) posti in prossimità del fascio di neutrini più intenso mai realizzato e da un complesso di rivelatori lontani (Far Detector) situato a circa 1300 km dal punto di produzione del fascio di neutrini. Il Near Detector complex è formato da tre rivelatori SAND, NDLa e TMS.

SAND, che è uno dei maggiori contributi dell'Italia a questo sforzo, ha il compito principale di monitorare con grande precisione il fascio di neutrini e anche di produrre una serie di misure ridondanti di vari parametri fisici che sono fondamentali per ridurre l'errore sistematico dell'esperimento. Come verrà descritto più in dettaglio, uno dei componenti all'interno di SAND è un tracciatore basato su camera a deriva che è in fase di sviluppo presso la sezione di Bologna. Questo lavoro di tesi è incentrato sullo studio e la realizzazione di un prototipo in scala ridotta di un rivelatore.

Il primo capitolo fornisce un'introduzione alla fisica del neutrino descrivendo il meccanismo delle oscillazioni e i principali quesiti ancora aperti che motivano gli attuali studi sperimentali. In seguito, viene descritto l'esperimento DUNE, di cui vengono esposti gli obiettivi fisici, i rivelatori presenti e la configurazione del fascio con un'analisi più dettagliata del Near Detector e in particolare di SAND.

Il secondo capitolo descrive i principi di funzionamento delle camere a deriva, le ragioni che ne giustificano l'impiego in questo contesto sperimentale e le specifiche tecniche di un prototipo sviluppato presso la sezione di Bologna dell'INFN.

Il terzo capitolo riguarda il processo di realizzazione del prototipo dettagliando le fasi di assemblaggio, la scelta dei componenti utilizzati, le procedure seguite per la messa in funzione e le prime verifiche operative.

Capitolo 1

La fisica dei neutrini e l'esperimento DUNE

1.1 I neutrini

Nel Modello Standard (SM) i neutrini (ν) sono particelle elementari e appartengono alla famiglia dei *leptoni*, sono elettricamente neutri, con massa nulla e interagiscono solo attraverso la forza nucleare debole. I leptoni sono organizzati in tre generazioni, ciascuna composta da una coppia leptone carico - neutrino. A ciascuna generazione corrisponde un diverso sapore che può essere di tipo elettronico, muonico o tauonico.

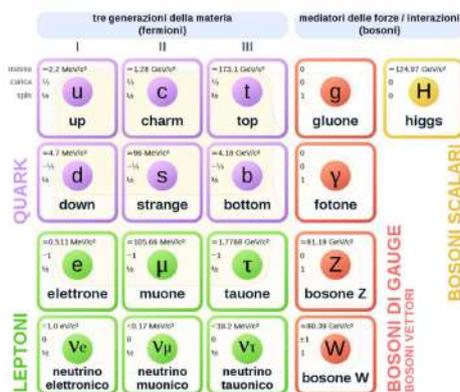


Figura 1.1

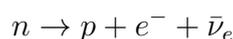
Tra le sorgenti naturali di neutrini si annoverano le stelle, attraverso reazioni nucleari come la catena protone-protone, le supernove, il decadimento di particelle generate dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera, e la stessa Terra, che emette geoneutrini in seguito al decadimento radioattivo di elementi presenti nella crosta e nel mantello. In

ambito artificiale, i neutrini vengono prodotti nei reattori nucleari, come sottoprodotto dei processi di fissione, e nei laboratori di fisica delle alte energie attraverso fasci di particelle, dove i protoni accelerati colpiscono un bersaglio generando mesoni che decadono successivamente in neutrini. Questi ultimi formano fasci controllati e utilizzati per scopi sperimentali.

Sono particelle estremamente difficili da rivelare a causa del fatto delle loro sezione d'urto estremamente piccole dell'ordine di 10^{-40} cm², [1]; di fatto sono osservabili solo indirettamente attraverso le loro interazioni con la materia.

1.1.1 Storia

Wolfgang Pauli nel 1930 per risolvere il problema della conservazione dell'energia nel decadimento β ipotizzò l'esistenza di una particella neutra di spin $\frac{1}{2}$, con massa $m \leq 0,001 m_p$ (massa del protone) presente all'interno del nucleo che veniva emessa insieme all'elettrone.



Dopo la scoperta del neutrone fu Fermi a darle il nome di *neutrino*, ipotizzando la sua massa nulla e formulando la prima teoria corretta del decadimento β . Successivamente, nel 1956 *Fred Reines* e *Clyde Cowan* sfruttando il flusso di antineutrini elettronici generato da una centrale atomica riuscirono a dimostrarne l'esistenza attraverso l'osservazione del decadimento β inverso.



Lo SM prevede che i neutrini siano privi di massa e che non presentino alcuna loro oscillazione. Tuttavia, una serie di osservazioni sperimentali sui neutrini solari e atmosferici iniziarono a suggerire discrepanze rispetto a queste previsioni teoriche. Per spiegare queste anomalie, Bruno Pontecorvo avanzò per primo l'ipotesi rivoluzionaria che i neutrini potessero oscillare mutando il loro sapore. Pochi anni dopo Kobayashi e Maskawa, vincendo poi il premio Nobel nel 2008, svilupparono la teoria del mixing quark che ispirò Maki, Nakagawa e Sakata a proporre nel 1962 un meccanismo analogo per i neutrini. Il loro lavoro introdusse il concetto fondamentale di mixing tra generazioni di neutrini, aprendo la strada alla moderna teoria delle oscillazioni di sapori, che implica necessariamente la presenza di una massa non nulla dei neutrini, e che tali masse siano differenti per ciascun sapore.

Il neutrino muonico ν_μ fu scoperto nel 1962 e poco dopo, nel 1968 *Fred Reines* il suo team ottennero i primi risultati dagli studi sui neutrini solari, dove si accorsero di un problema di conteggio; infatti, solo 1/3 dei neutrini previsti dal modello solare veniva osservato, aprendo così il "problema dei neutrini solari". Negli anni ottanta furono costruiti i rivelatori IMB e Kamiokande che, sfruttando l'effetto Cherenkov, mostrarono il primo segno della "anomalia dei neutrini atmosferici", data dalla scomparsa dei neutrini muonici prodotti dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera.

Infine nel 1996 fu costruito il Super-Kamiokande, un rivelatore formato da una cisterna contenente 50 kton di acqua ultrapura a 1 km di profondità che sfruttava l'effetto Cherenkov. Dopo soli 500 giorni di presa dati, l'esperimento riportò la scoperta dell'oscillazione del neutrino ν_μ atmosferico, evidenziata da una marcata asimmetria nel numero di eventi osservati: i neutrini provenienti dall'atmosfera direttamente al di sopra del rivelatore risultavano significativamente più numerosi rispetto a quelli provenienti dalla direzione opposta, che per raggiungere il rivelatore dovevano attraversare l'intero corpo terrestre.

Questi due problemi spinsero avanti lo studio teorico e aprirono una nuova frontiera oltre lo SM, cercando la comparsa di neutrini e un meccanismo matematico che spiegasse la loro oscillazione.

1.1.2 Quesiti aperti

I neutrini non presentano solamente tre autostati di sapore elencati prima, ma anche tre autostati di massa ν_1, ν_2, ν_3 che non coincidono con gli autostati di sapore. Infatti, un autostato di sapore risulta essere una sovrapposizione quantistica dei tre diversi autostati di massa, dove a ogni ν_1, ν_2, ν_3 è associata una massa corrispondente ben definita m_1, m_2, m_3 . La relazione tra gli autostati di sapore e gli autostati di massa è descritta dalla matrice di mescolamento di Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (*PMNS*), una matrice 3×3 che può essere espressa come segue:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Gli elementi U_{ei} , $U_{\mu i}$ e $U_{\tau i}$ danno l'ampiezza di probabilità di trovare un autostato di un certo sapore in un certo autostato di massa. Tale matrice può essere scritta anche come il prodotto delle seguenti tre matrici:

1. $R_{12}(\theta_{12})$ matrice di rotazione nel piano 12, in cui θ_{12} è l'angolo di mescolamento tra gli autostati ν_1 e ν_2 chiamato anche angolo di mescolamento *solare*:

$$R_{12}(\theta_{12}) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{12}) & \sin(\theta_{12}) & 0 \\ -\sin(\theta_{12}) & \cos(\theta_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2. $R_{13}(\theta_{13}, \delta_{CP})$ matrice di rotazione del piano 13, in cui θ_{13} è l'angolo di mescolamento tra gli autostati ν_1 e ν_3 . Inoltre è presente una fase complessa δ_{CP} chiamata *fase di violazione CP*, che indica la violazione di coniugazione di carica e parità nell'oscillazione del neutrino la quale potrebbe dare qualche informazione in più sul

dilemma della assimetria materia-antimateria:

$$R_{13}(\theta_{13}, \delta_{CP}) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{13}) & 0 & \sin(\theta_{13})e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_{13})e^{-i\delta_{CP}} & 0 & \cos(\theta_{13}) \end{pmatrix}$$

3. $R_{23}(\theta_{23})$ matrice di rotazione del piano 23, in cui θ_{23} è l'angolo di mescolamento tra gli autostati ν_2 e ν_3 chiamato anche angolo di mescolamento *atmosferico*:

$$R_{23}(\theta_{23}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{23}) & \sin(\theta_{23}) \\ 0 & -\sin(\theta_{23}) & \cos(\theta_{23}) \end{pmatrix}$$

Il fenomeno dell'oscillazione dei neutrini è dovuto al fatto che gli autostati di massa si propagano a velocità differenti generando così interferenza costruttiva o distruttiva. Un neutrino, per esempio, emesso come ν_μ è una sovrapposizione degli autostati di massa ν_1 , ν_2 , ν_3 che evolvono nel tempo con diverse fasi dando una certa probabilità di rilevarlo di altri sapori in base all'energia e alla distanza percorsa, come mostrato in Figura 1.2.

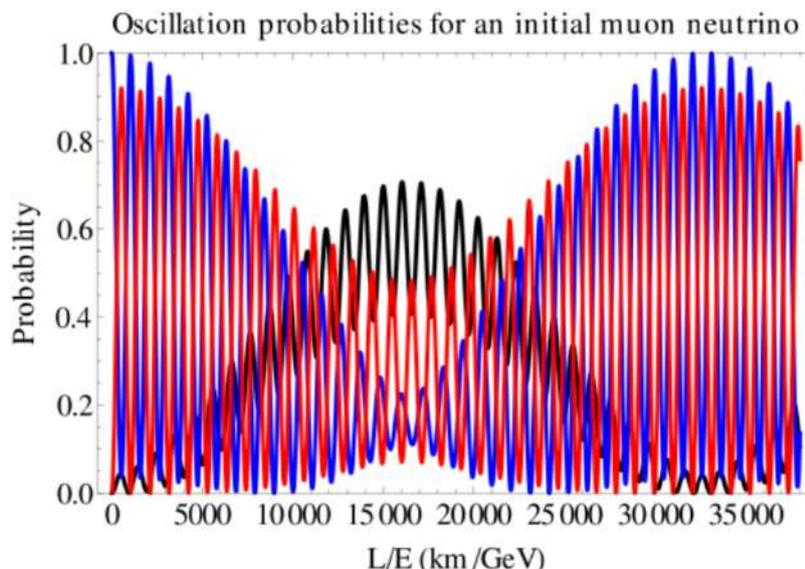


Figura 1.2: Questo grafico mostra come data l'emissione di neutrino muonico, esso ha una certa probabilità di oscillare dipendete dalla distanza percorsa L e dalla enengia E del neutrino.

Spesso è possibile andare a studiare l'oscillazione dei neutrini considerando solo due autostati di sapore e di massa. In tal caso la probabilità che un neutrino cambi il suo sapore da α a β durante il suo viaggio nel vuoto è descritta dalla seguente relazione [2]:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2(2\theta_{ij}) \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \cdot \Delta m_{ij}^2 \cdot L}{E_\nu} \right)$$

in cui θ_{ij} è l'angolo di mescolamento tra due stati di massa dei neutrini, $\Delta m_{ij}^2 = m_j^2 - m_i^2$ è la differenza dei quadrati delle masse dei due autostati di massa in eV^2 , E_ν è l'energia del neutrino in GeV e L è la distanza in metri percorsa dal neutrino. I parametri dell'oscillazione ancora sconosciuti sono: δ_{CP} , il segno di Δ_{32} , θ_{13} a causa della sua piccolezza, e θ_{23} presenta un'alta imprecisione.

I parametri ad ora conosciuti sono, [3]:

1. $\theta_{12} = 33.68^{+0.73}_{-0.70}^\circ$
2. $\theta_{23} = 48.5^{+0.7}_{-0.9}^\circ$
3. $\frac{\Delta m_{32}^2}{10^{-3} \text{eV}^2} = 2.534^{+0.025}_{-0.023}$
4. $\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{eV}^2} = 7.49^{+0.19}_{-0.19}$

La fisica dei neutrini rappresenta oggi uno dei campi più attivi della ricerca fondamentale, caratterizzato da numerosi interrogativi irrisolti che hanno stimolato la formulazione di modelli teorici innovativi. Tra le principali questioni ancora aperte spicca l'origine della massa estremamente ridotta di queste particelle, che risulta diversi ordini di grandezza inferiore rispetto a quella delle altre particelle dello SM.

1.2 Deep Underground Neutrino Experiment

DUNE è un esperimento internazionale di nuova generazione per lo studio di neutrini, nel quale verranno osservati sfruttando il fascio di neutrini più intenso al mondo. L'esperimento consiste nella produzione di un fascio di ν_μ o $\bar{\nu}_\mu$ a 2.5 GeV che potranno oscillare e poi interagire nel detector posto a circa 1300 km di distanza. Verrà costruito in parte nei pressi del Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) in Illinois, e in parte al Sanford Underground Research Facility (SURF) in South Dakota. I suoi principali obiettivi sono:

- **L'asimmetria materia-antimateria:** la misurazione della violazione CP nel settore leptonic tramite l'osservazione precisa dell'oscillazione dei neutrini e la misurazione del parametro δ_{CP} che può fornire informazioni sull'origine della asimmetria materia-antimateria, una delle domande fondamentali nella fisica delle particelle e nella cosmologia.
- **Determinazione dell'ordinamento delle masse:** l'ordinamento delle masse dei tre stati di massa dei neutrini permette di conoscere il contributo di massa cosmica dato dai neutrini e di interpretare correttamente i dati sperimentali nelle future misurazioni dei neutrini. L'ordinamento di massa potrebbe riflettere simmetrie nascoste o meccanismi di generazione della massa oltre il modello standard;

- **L'unificazione delle forze:** eventuale rivelamento del decadimento del protone che sarebbe una scoperta sensazionale nella fisica delle particelle, e un requisito chiave per la Teoria della Grande Unificazione (GUTs);
- **Neutrini astrofisici:** il collasso di supernove genera un enorme quantità di neutrini. La misurazione del flusso di neutrini proveniente da questa sorgente, presente nella nostra galassia, fornirebbe informazioni uniche sulle prime fasi del collasso del nucleo e sulla formazione di una stella di neutroni, o potrebbe anche segnalare la nascita di un buco nero.

L'esperimento è tutt'ora in costruzione ed diventerà operativo nel 2032 con una potenza del fascio di 1.2 MW e una massa fiduciale al Far detector di 20 kton. In una seconda fase si avrà un miglioramento della potenza del fascio fino a 2.4 MW con una aumentata massa fiduciale di 40 kton [4]. Per raggiungere i suoi obiettivi, l'esperimento, come si vede nella Figura 1.3, comprende tre complessi: una sorgente di neutrini ad alta intensità generata da un acceleratore di protoni al FNAL, un massiccio rivelatore chiamato Far Detector, FD, situato in South Dakota a circa 1300 km di distanza e a una profondità di 1,5 km, e un insieme di detector posti subito dopo la sorgente di neutrini chiamato Near Detector, ND. Si prevede che il Far Detector collezionerà migliaia di interazioni di neutrini in un periodo di all'incirca 10 anni [4]. Un numero così alto di interazioni è possibile grazie al prodotto di vari fattori: l'intensità del fascio di neutrini, la probabilità di oscillazione di un neutrino (circa il 0,02%), la sezione d'urto e la massa fiduciale del rivelatore [5]. Il fatto che il FD sia situato sottoterra porta notevoli vantaggi al background riducendolo di un fattore di 10^6 . Questo aspetto risulta particolarmente vantaggioso per l'osservazione di neutrini provenienti da supernove, i quali hanno energie circa cento volte inferiori rispetto a quelle dei neutrini del fascio. Nonostante eventi di questo tipo siano rari (con una frequenza stimata di una raffica della durata di pochi secondi ogni circa 50 anni) la combinazione tra il basso livello di fondo e l'elevata sensibilità dei rivelatori rende comunque possibile la loro rilevazione.

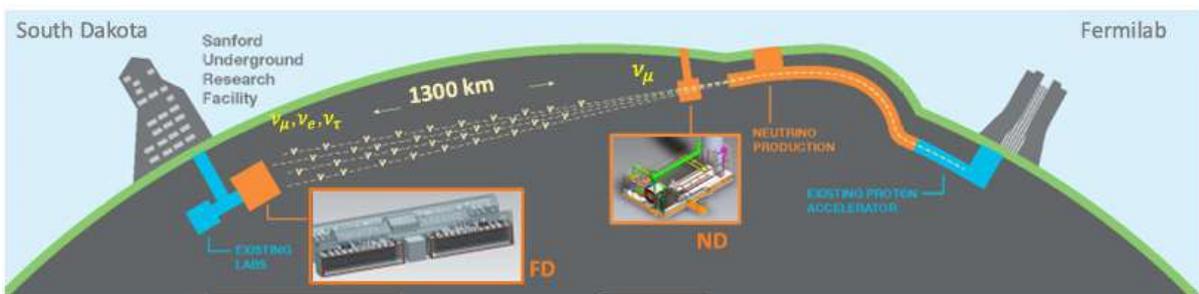


Figura 1.3: Struttura schematica dell'esperimento

Nel percorso tra il Near detector e il Far detector i neutrini prodotti nel fascio iniziale subiranno oscillazioni di sapore, in particolare $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. La distanza tra il ND e il FD è

ottimizzata affinché sia massimizzata la probabilità di oscillazione del neutrino. Si vuole quindi essere su un massimo di comparsa, cioè quando:

$$\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \sim \frac{\pi}{2} \quad (1.1)$$

Che corrisponde rispettivamente a un'energia di 2.5 GeV per il primo picco e 0.8 GeV per il secondo picco, come si vede nella Figura 1.4. In tali picchi si ha anche un aumento di probabilità di comparsa elettronica.

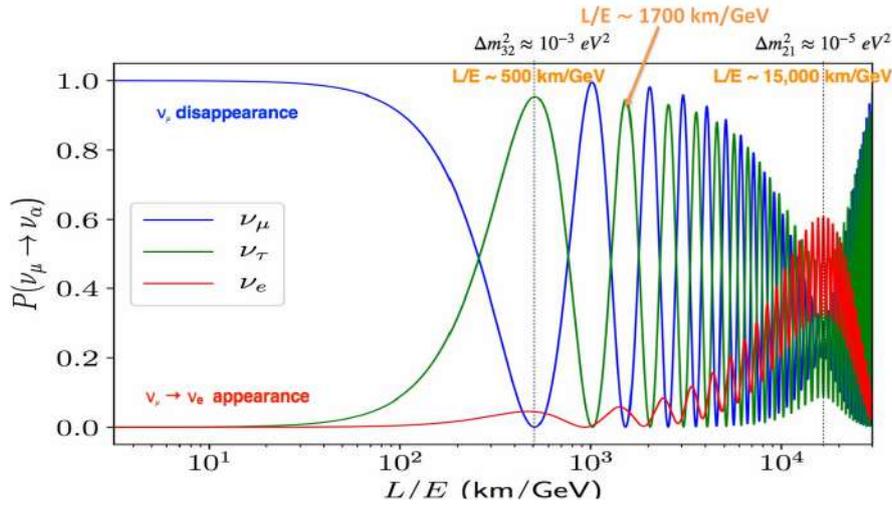


Figura 1.4: Probabilità di scomparsa dei neutrini muonici e di comparsa dei neutrini tauonici e elettronici in funzione del rapporto tra l'energia e la distanza percorsa.

Grazie alla presa dati al Far Detector sarà possibile andare a misurare il parametro δ_{CP} che si manifesta come diversa probabilità di oscillazione nel vuoto tra neutrini e antineutrini, come si vede nell'equazione (1.2):

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = -16s_{12}c_{12}s_{13}c_{13}^2s_{23}c_{23}\sin\delta_{CP} \sin\left(\frac{\Delta m_{12}^2 \cdot L}{4E_\nu}\right) \sin\left(\frac{\Delta m_{13}^2 \cdot L}{4E_\nu}\right) \sin\left(\frac{\Delta m_{23}^2 \cdot L}{4E_\nu}\right) \quad (1.2)$$

In cui $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ rappresenta la probabilità di comparsa di un ν_e partito come ν_μ . $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$ rappresenta la probabilità di comparsa di un $\bar{\nu}_e$ partito come $\bar{\nu}_\mu$. Gli altri elementi sono $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ e $\Delta m_{ij}^2 = m_j^2 - m_i^2$ con $i = 1, 2, 3$ e $j = 1, 2, 3$.

La differenza di probabilità di comparsa però non dipende solo dalla violazione CP (δ_{CP}), ma anche dall'effetto materia. L'origine dell'asimmetria dovuta all'effetto materia è dovuta alla presenza di elettroni e non di positroni all'interno della terra; ciò provoca

una diminuzione di neutrini che arrivano al FD. Nel range di energie di pochi GeV, l'asimmetria generata dall'effetto materia aumenta con l'aumentare del percorso, poiché i neutrini attraversano una maggiore quantità di materia. Per distanze superiori a circa 1000 km, è possibile risolvere la degenerazione tra le asimmetrie dovute alla violazione di CP e all'effetto di materia. In particolare l'effetto materia dipende dal Δm_{13} che, avendo esponente uno, permette di andare a conoscere il suo segno e quindi se l'ordinamento delle masse dei neutrini è diretto o inverso.

$$\begin{aligned}
P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx & \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \frac{\sin^2(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)^2} \Delta_{31}^2 \\
& + \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \frac{\sin(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \Delta_{31} \frac{\sin(aL)}{aL} \Delta_{21} \cos(\Delta_{31} - \delta_{CP}) \quad (1.3) \\
& + \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin(aL)}{aL} \Delta_{21}^2
\end{aligned}$$

Dove $\Delta_{ij} = \frac{\Delta m_{ij} L}{4E}$ e $a = \frac{G_F N_e}{\sqrt{2}}$, G_F è la costante di Fermi e N_e è la densità elettronica del mezzo.

Si è visto che l'asimmetria data dalla materia aumenta all'aumentare della distanza percorsa dal neutrino attraverso la materia, quindi un esperimento a long-baseline come DUNE sarà molto adatto a tale studio. Si vuole così facendo trovare con una precisione maggiore gli angoli di mixing θ_{23} e θ_{13} , la fase δ_{CP} con un errore inferiore al 10%, l'ordine di massa attraverso il segno di Δm_{31} e l'effetto materia dato da aL e $\frac{\sin(aL)}{aL}$.

DUNE sarà un esperimento in grado di studiare e misurare tutti questi valori.

1.3 Il fascio di neutrini

La sorgente di neutrini assieme alla strumentazione per generare il fascio sarà costruita presso il Fermilab e sfrutterà i protoni prodotti da PIP-II, acceleratore lineare del medesimo centro di ricerca. Questi vengono 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. I protoni saranno diretti verso il bersaglio costituito da un cilindro di grafite lungo 2.2 m, i parametri del fascio di protoni sono riportati nella tabella 1.1.

La collisione produrrà una cascata di particelle secondarie tra cui mesoni carichi come π^\pm , i quali saranno a loro volta deflessi da una serie di magneti, denominati "horns". La loro polarità consentirà di orientare il fascio verso i rivelatori e di selezionare mesoni con carica elettrica positiva o negativa, per ottenere un fascio finale composto rispettivamente da neutrini o da antineutrini. I mesoni prodotti saranno instabili e andranno incontro a processi di decadimento che avverranno all'interno di un tunnel appositamente costruito lungo $\sim 200m$. Questi porteranno alla produzione dei neutrini e degli antineutrini che

Parametri	Valori
energia	120 GeV
protoni per ciclo	7.5×10^{13}
durata spill	1.0×10^{-5} s
POT all'anno	1.1×10^{21}
tempo di ciclo	1.2 s
potenza del fascio	1.2 - 2.4 MW
larghezza del fascio sul target	1.5-1.7 mm
$\Delta p/p$	11×10^{-4} 99% (28×10^{-4} 100%)
emittanza trasversa	$30\pi \mu\text{m}$ 99% ($360\pi \mu\text{m}$ 100%)
divergenza del fascio (x,y)	15 - 17 μrad

Tabella 1.1: Sintesi dei paramentri del fascio preliminare di protoni[6]

verranno rivelati nei rivelatori di DUNE.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

La probabilità che avvenga tale decadimento è del 99.99%. Il resto della probabilità è dato da un decadimento estremamente raro:

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e \quad \pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

Ciò porta ad avere un fascio sostanzialmente puro formato da neutrini muonici e qualche contaminazione di neutrini elettronici e altre particelle.

All'inizio delle operazioni di DUNE il fascio uscente avrà una potenza compresa tra 1 MW e 1.2 MW, con il progetto di migliorare tale potenza fino a 2.4 MW. Il fascio prodotto sarà a banda larga e attraverserà il Near Detector a una distanza di 304 m dalla fine del tunnel di decadimento e in seguito raggiungerà il Far Detector a circa 1300 km.

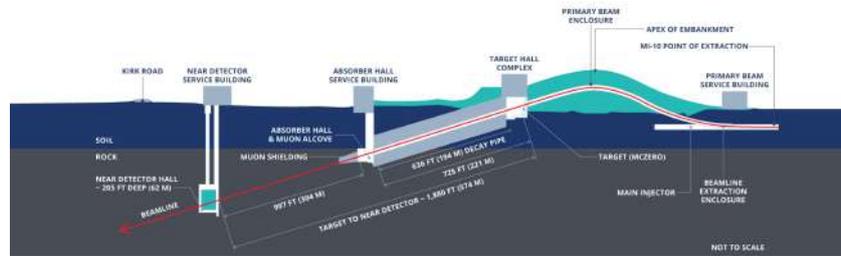


Figura 1.5: Generazione del fascio

1.4 Far Detector

Il DUNE Far Detector consisterà in quattro moduli LArTPC, ossia camere a proiezione temporale ad argon liquido. Ognuno di questi conterrà un criostato che ha le dimensioni 15.1 m (larghezza) x 14.0 m (altezza) x 62.0 m (lunghezza) contenente argon liquido a una temperatura di 88 K per una quantità pari a 10 kton, con un totale di massa di tutto il modulo di 17.5 kton, diventando così il più grande rivelatore mai costruito con questa tecnologia [4]. Il FD è necessario con dimensioni imponenti al fine di ottenere una statistica rilevante di interazioni sull'argon.

Il design sarà ottimizzato per una costruzione scalabile e modulare, nonché per l'integrazione di futuri aggiornamenti tecnologici. Ora sono in costruzione due di questi con la tecnologia a fase singola (SP) che avrà tutti i rivelatori presenti nel criostato immersi nell'argon liquido, di cui uno sarà a deriva orizzontale e l'altro a deriva verticale.

Il primo a deriva orizzontale ha le cariche che si spostano in orizzontale grazie alla presenza del forte campo elettrico, con catodo (C) e anodo (A) verticali come si vede nella Figura 1.6a. Questo design avrà poco noise elettronico grazie al fatto che non ci sarà un'amplificazione del segnale all'interno del criostato, dando così un buon segnale di readout.

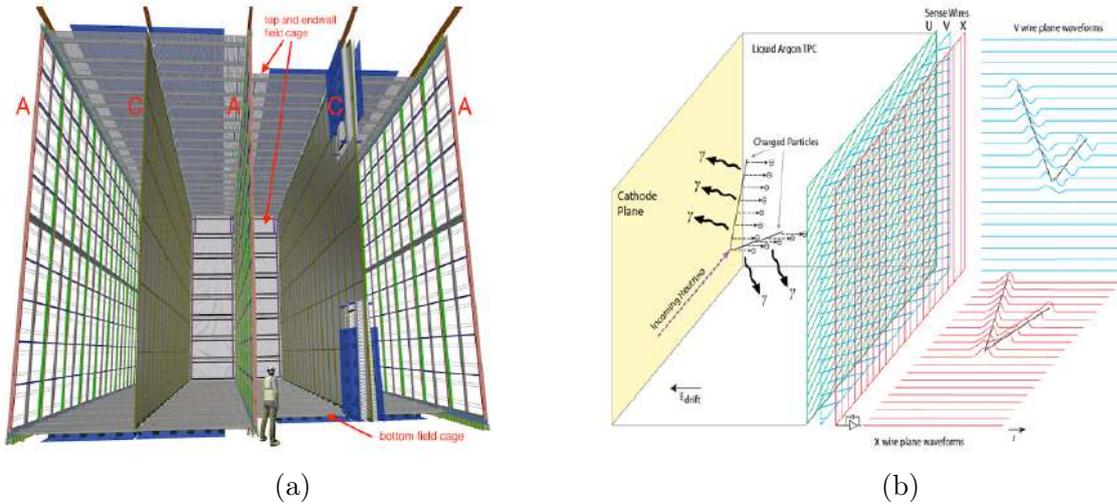


Figura 1.6: Struttura interna del detector a fase-singola SP LArTPS sulla sinistra dove con sono indicati con A i piani di anodo e con C i piani di catodo. Mentre invece a destra è mostrato un vertice di interazione e come esso viene rivelato dai piani di fili.

Il suo funzionamento si basa sulla possibile interazione del neutrino del fascio con un nucleo di argon. Infatti, quando ciò accade le particelle cariche eccitano o ionizzano gli atomi di argon presenti nella loro traiettoria. L'argon infatti è un ottimo scintillatore ed emette luce ultravioletta con lunghezza d'onda 126.8 nm. Questa luce viene rilevata dai

photon detectors (PDs) e segna il t_0 per ogni evento indicando così quando gli elettroni della ionizzazione hanno iniziato il cammino. Ciò permette di distinguere i vari eventi dato che le onde di neutrini sono intervallate da un tempo in microsecondi, mentre invece il tempo di deriva degli elettroni è dell'ordine di millisecondi. Nel contempo gli elettroni si muovono verso il catodo formato da tre piani di fili posti con angolazioni diverse ($+60^\circ$, 0° , -60°) per avere la proiezione sul piano verticale della traccia della particella. Grazie alla deriva degli elettroni e ai PDs è possibile ricostruire tridimensionalmente la traccia delle particelle e quindi il vertice dell'interazione, come si vede nella Figura 1.6b. Per avere un ampio volume sensibile ma allo stesso tempo efficiente si è scelta una distanza tra catodo e anodo di 3.6 m portando così ad avere una lunga deriva che richiede un campo elettrico di 500 V/cm, corrispondente ad un catodo a 180 kV di tensione.

Il secondo a deriva verticale è un TPC in cui gli elettroni di ionizzazione si dirigono verticalmente, per un massimo di 6.5 m, verso anodi situati nella parte superiore e inferiore del rivelatore. Il catodo è appeso a metà altezza, Fig. 1.7. Si tratta di una struttura sottile per ridurre il peso del catodo. È una struttura sottile per ridurre la perdita di volume attivo ed è anche trasparente al 60% per consentire il passaggio dell'argon. La gabbia di campo circostante assicura un campo elettrico di 500 V/cm. I photon detectors sono montati sulle pareti laterali del criostato, dietro una gabbia di campo con maggiore trasparenza, o sul catodo.

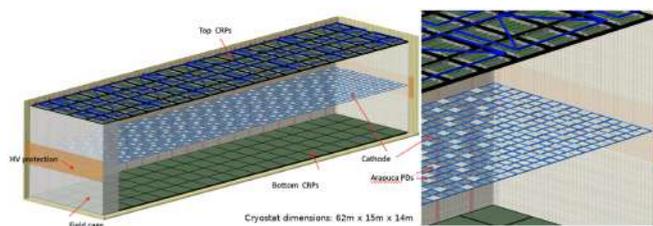


Figura 1.7: Struttura interna del detector SP-LaTDR a deriva orizzontale

1.5 Near Detector

La presenza di un Near Detector sarà sostanziale per ottenere le performance richieste e quindi raggiungere gli obiettivi di fisica fissati. Esso infatti servirà come sistema di controllo per l'esperimento, limitando gli errori sistematici e misurando i neutrini ν_μ , ν_e e i corrispondenti antineutrini prima dell'oscillazione.

Comparare le misure dello spettro energetico dei neutrini vicino all'origine del fascio prima dell'oscillazione con le misure al Far detector permetterà di modellare con maggiore accuratezza gli effetti delle interazioni neutrino-argon, che variano con l'energia, e ridurre gli errori sistematici dal 5 – 7% al 1 – 2%. Il FD non misurerà direttamente la probabilità di oscillazione del neutrino, ma misurerà invece il tasso di interazione dei neutrini per i

diversi tipi di sapore in funzione della loro energia. La probabilità di oscillazione verrà data dal rapporto tra gli eventi al Near detector e gli eventi al Far detector, equazione 1.4.

$$\frac{dN_{v_i}^{far}}{dN_{v_\mu}^{near}} = \frac{\int P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_i}(E_\nu) \phi_{\nu_\mu}^{near}(E_\nu) \sigma_{\nu_i}^{Ar}(E_\nu) D_{v_i}^{far}(E_\nu, E_{rec}) dE_\nu}{\int \phi_{\nu_\mu}^{near}(E_\nu) \sigma_{\nu_\mu}^{Ar}(E_\nu) D_{v_\mu}^{near}(E_\nu, E_{rec}) dE_\nu} \quad (1.4)$$

Con:

- $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_i}(E_\nu)$ è la probabilità che un ν_μ a una certa energia E_ν diventi un neutrino di sapore diverso i ;
- $\phi_{\nu_\mu}^{near}(E_\nu)$ rappresenta il flusso di neutrini ν_μ non oscillanti;
- $D_v(E_\nu, E_{rec})$ capacità del detector di ricostruire l'evento;
- $\sigma_v^{Ar}(E_\nu)$ cross section neutrino-argon.

Un altro ruolo chiave che compie è studiare la cross section del neutrino utilizzando, come bersaglio, sia argon gassoso, sia l'argon liquido.

1.5.1 Componenti del Near Detector

Il ND sarà localizzato a 574 m dopo la sorgente del fascio ed è composto da tre principali componenti (Figura 1.8):

- ND LAr: una camera a proiezione temporale con 67 ton di argon liquido, chiamata ArgonCube;
- TMS o ND GAR: rivelatore multiuso;
- SAND: rivelatore posizionato permanentemente sul fascio, formato a sua volta da diversi sotto-rivelatori all'interno di un campo magnetico.

I primi due potranno muoversi fuori dall'asse del fascio fino a un massimo di 33 m, fornendo accesso a diversi spettri e permettendo di misurare l'andamento dell'energia in funzione dell'angolo.

L'ArgonCube è una camera a proiezione temporale di argon liquido (LArTPC) molto simile a quella utilizzata nel Far Detector. Sarà il primo rivelatore a essere attraversato dal fascio e quindi anche esposto a un fascio più intenso di neutrini. Sarà sufficientemente largo da avere un'alta statistica sui neutrini, rivelando 1×10^{18} eventi all'anno sull'asse. Le sue dimensioni sono di 5 m di lunghezza in direzione del fascio, larghezza 7 m e altezza 3 m, formata da una struttura modulare posta in un sistema di raffreddamento criogenico. Il tracciamento e la risoluzione dell'energia, combinati con la massa del detector, consentiranno di misurare il flusso del fascio utilizzando diverse tecnologie.

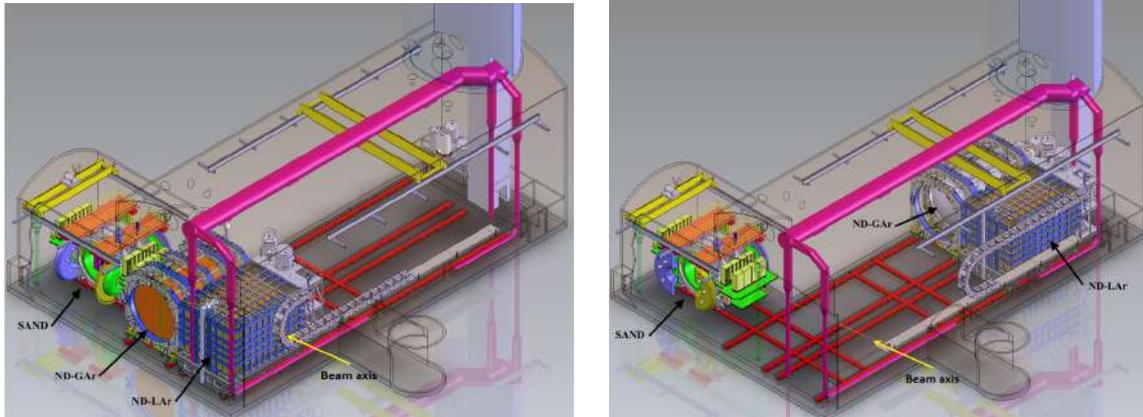


Figura 1.8: Struttura del DUNE ND completa con tutti e tre i rivelatori sull'asse (a sinistra) e con il ND-LAr e il ND-GAr fuori dall'asse (a destra). SAND è mostrato nella posizione in asse con il fascio indicato dalla freccia gialla.

ND-LAr sarà anche ottimizzato per contenere le "hadronic showers", ma la sua capacità di rivelare muoni con quantità di moto superiore a ~ 0.7 GeV/c sarà bassa. Per questa ragione verrà aggiunto uno spettrometro chiamato TMS, The Muon Spectrometer, che misurerà le proprietà dei muoni uscenti dal ND-LAr.

Il TMS è composto da una pila di 100 piani di acciaio magnetizzato, con dimensione 7.4 m (lunghezza) \times 5 m (altezza) \times 7 m (profondità). Ogni piano è formato da 192 lamine scintillanti, larghe 3.5 cm separate da piastre di acciaio spesse 15 mm nei 40 strati a monte e 40 mm nei 60 strati a valle. Il campo magnetico di 0.5 T permette di ricostruire il segno della carica muonica e il momento fino a ~ 5 GeV con una risoluzione del 5%.

1.6 SAND

Il System for on-Axis Neutrino Detector è concepito come un rivelatore compatto, capace di effettuare calorimetria e tracciamento di precisione su eventi prodotti in materiali diversi: argon, carbonio e idrogeno. Il calorimetro elettromagnetico (ECAL) e il magnete originariamente utilizzati nell'esperimento KLOE verranno riutilizzati, mentre la camera a deriva interna sarà sostituita, Fig. 1.9. KLOE, operante fino al 2008 presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN, era un esperimento dedicato allo studio della fisica dei mesoni e dei kaoni. Il tracciatore in esso impiegato, progettato per ridurre al minimo l'interazione con la materia, risulta tuttavia inadatto al nuovo contesto, richiedendo la sostituzione con un sistema più appropriato. Il design del nuovo sistema di tracciamento si fonda sull'impiego di una tecnologia a straw-tubes. Tuttavia, in questo lavoro di tesi viene esplorata una possibile alternativa basata sull'utilizzo di camere a deriva planari.

In aggiunta, è prevista una piccola zona attiva contenente argon liquido, denominata GRAIN, pensata per svolgere funzioni di intercalibrazione.

Per svolgere il suo compito di monitoraggio deve avere una massa bersaglio abbastanza grande da consentire al tasso di interazione dei neutrini di fornire un feedback statisticamente significativo sui cambiamenti del fascio in un periodo di tempo di alcuni giorni. È in grado anche di misurare indipendentemente il tasso di interazione e gli spettri energetici dei ν_μ e ν_e e relative antiparticelle del fascio e combinare le informazioni da ECAL e dal tracker/target per misurarne l'energia.

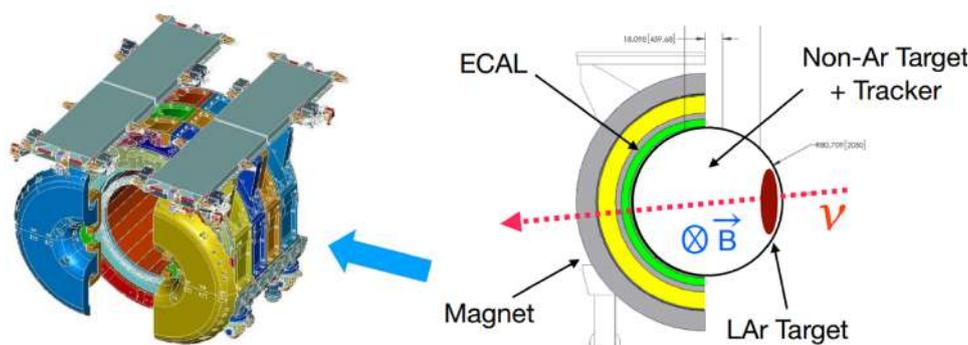


Figura 1.9: Struttura di SAND con vista dall'esterno a sinistra, dove la freccia azzurra indica la direzione del fascio, e di sezione a destra dove la freccia rossa indica la direzione del fascio

1.6.1 Magnete

Il magnete utilizzato dall'esperimento KLOE è stato progettato per generare un campo magnetico di 0.6 T all'interno del solenoide superconduttivo di diametro 4.8 m e 4.3 m di lunghezza. La bobina è posta all'interno di un sistema criogenico a base di elio e al suo interno scorre una corrente di 2902 A. Tale campo magnetico permette di separare particelle con carica elettrica differente, consentendo di misurare la contaminazione del fascio, quindi di identificare i leptoni con carica diversa da quelli generati dal fascio. La carica di tali leptoni dipende dalla modalità di fascio scelto: neutrini o antineutrini.

1.6.2 Calorimetro ECAL

Anche il calorimetro ECAL proviene dall'esperimento KLOE ed è un calorimetro in fibra di piombo, che utilizza dei tubi fotomoltiplicatori. Le fibre scintillanti garantiscono una buona trasmissione della luce per diversi metri, una precisione del tempo al di sotto del nanosecondo e un'ottima ermeticità.

In particolare, il calorimetro è formato da tre parti: il calorimetro *barrel* che rappresenta la parte principale e copre la superficie laterale cilindrica e due calorimetri laterali, chiamati *end-caps*, che coprono le basi del cilindro. Il calorimetro barrel è collocato all'interno del magnete KLOE vicino al criostato della bobina. È composto da 24 moduli ognuno dei quali ha una lunghezza di 4.3 m (pari alla lunghezza del magnete), con uno spessore di 23 cm e una base trapezoidale. Ogni calorimetro *end-caps* è formato da 32 moduli a base rettangolare disposti in verticale con spessore 23 cm e di lunghezza compresa tra 0.7 e 3.9 m. I moduli sono costituiti da 200 lamine di piombo scanalate, con uno spessore di 0.5 mm, che si alternano con 200 strati di fibre scintillanti di 1 mm di diametro rivestite. Il calorimetro KLOE non ha spazio inattivo tra i suoi componenti grazie al fatto che si ha un po' di sovrapposizione tra il barrel e gli end-caps. Il suo peso totale è di ~ 100 ton. ECAL misurerà energia e tempo di scintillazione con una risoluzione spaziale di ~ 1.3 cm. La risoluzione del calorimetro associata a queste due grandezze è stata valutata durante la presa dati di KLOE e risultano essere rispettivamente [7]:

- risoluzione energetica:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{5\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \quad (1.5)$$

- risoluzione temporale:

$$\sigma_t = \frac{40}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \text{ps} \quad (1.6)$$

1.6.3 GRAIN

Il GRanular Argon for Interactions of Neutrinos (GRAIN) sarà un bersaglio attivo che conterrà al suo interno ~ 1 ton di argon liquido e sarà posizionato nella zona *upstream* di SAND, cioè sarà il primo componente di SAND a essere colpito dal fascio di neutrini. L'obiettivo principale di GRAIN sarà di rilevare esclusivamente la luce di scintillazione dell'argon. Grazie all'elevata resa luminosa e al rapido tempo di emissione, la raccolta dei fotoni potrà essere accurata al nanosecondo per ottenere un'elevata risoluzione spaziale. Per permettere ciò, GRAIN al suo interno avrà un sistema di photodetector estremamente rapidi e precisi. Il design di GRAIN prevede due criostati cilindrici coassiali con una base altamente ellittica in modo tale che il fascio di neutrini sia allineato con l'asse più corto dell'ellisse. Il contenitore interno è alto 1.47 m, largo 1.50 m e lungo un massimo di 0.47 m, mentre quello esterno è alto 1.90 m, largo 2.00 m e lungo massimo 0.83 m.

1.6.4 L'Inner Tracker

Il volume interno al calorimetro ECAL è occupato in piccola parte da GRAIN e in larga parte dall'Inner Tracker che costituirà un ulteriore bersaglio per il fascio e permetterà di ricostruire il vertice di interazione, l'impulso e l'angolo di diffusione delle particelle

prodotte durante l'interazione. L'Inner Tracker è formato da vari rivelatori e vari bersagli, tra cui il carbonio C e polipropilene solido CH_2 . Il confronto tra le interazioni osservate in questi due materiali consente di isolare il contributo dovuto all'idrogeno, il cui nucleo è composto da un singolo protone. Tale approccio consente di studiare meglio l'interazione neutrino - protone, riducendo così gli errori sistematici legati alla modellizzazione teorica delle interazioni su nuclei più complessi.

Per quanto riguarda il rivelatore si sono valutate due possibilità: Straw Tube Tracker (STT) e la Drift Chamber(DC). Entrambi i rivelatori sono pensati per essere leggeri, ovvero a bassa densità, in modo da poter ricostruire al meglio le tracce e l'energia delle particelle secondarie prodotte dall'interazione dei neutrini.

Straw Tube Tracker

La prima ipotesi è di utilizzare come rivelatore lo Straw Tube Tracker, STT, che si compone di moduli indipendenti composti da tubi a drift. La configurazione base consiste in una lastra bersaglio di 5 mm di spessore in polipropilene solido (CH_2), un radiatore in polipropilene, e quattro strati di tubi disposti due in verticale e due in orizzontale seguendo lo schema XXYY, come si vede in figura 1.10. Ogni tubo ha un diametro di 5 mm con delle pareti in mylar spesse $12 \mu\text{m}$ e al centro di esso si trova un filo in tungsteno da $20 \mu\text{m}$ rivestito in oro. Il radiatore in polipropilene è formato da 105 lamine spesse $18 \mu\text{m}$ intervallate da un sottile strato di aria spesso $117 \mu\text{m}$; la sua funzione è di facilitare l'identificazione tra elettrone e pione attraverso la radiazione di transizione. In questo rivelatore i radiatori possono essere eventualmente rimossi e si può sostituire il bersaglio con altri materiali come carbonio o ferro.

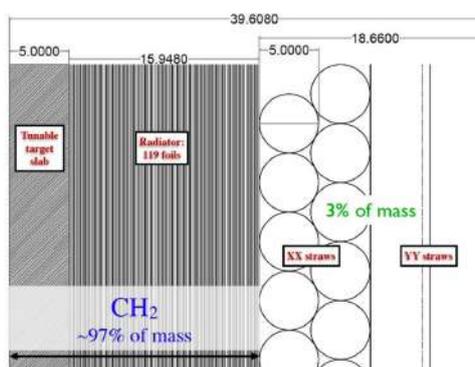


Figura 1.10: Sezione laterale del rivelatore STT

Drift Chamber

L'altra ipotesi al posto del STT come tracciatore da inserire all'interno di SAND è la Drift Chamber o camera a deriva. La camera a deriva è composta da diversi piani di fili che si

alternano con piani di mylar, e assieme formano una serie di celle. La configurazione di una cella della camera si basa sull'alternarsi nello stesso piano di fili di anodo chiamati *sense*, su cui si raccoglie il segnale generato dal passaggio di particelle cariche, e di fili di catodo *field* a distanza di 1 cm. I fili generano un campo elettrico che trasporta gli elettroni ionizzati dai catodi agli anodi delle celle, che poi trasmettono il segnale alla scheda di readout. Lo spazio vuoto tra i fili e i vari piani sarà riempito con una miscela di gas composta all' 85% da argon e al 15% da anidride carbonica.

I piani contenenti le celle sono assemblati in diversi moduli, ognuno dei quali è composto da un primo strato di mylar che poi si alterna con tre piani di fili posti ad angolazioni diverse rispettivamente -5° , 0° , $+5^\circ$ rispetto alla direzione dell'asse del campo magnetico. La camera è composta da otto supermoduli spessi 35 cm, lunghi 3.2 m e con altezza dipendente dalla loro posizione con un massimo di 3.8 m e un minimo di 1.3 m, separati da 15 mm di spazio libero e ricoperti da uno strato di grafite come si vede nella Figura 1.11. In totale sono presenti 240 piani di fili per un totale di $\sim 5 \times 10^4$ canali, dati da celle $1,4 \times 1,2 \text{ cm}^2$, e $\sim 3.6 \times 10^4$ canali dati da celle $2 \times 1 \text{ cm}^2$.

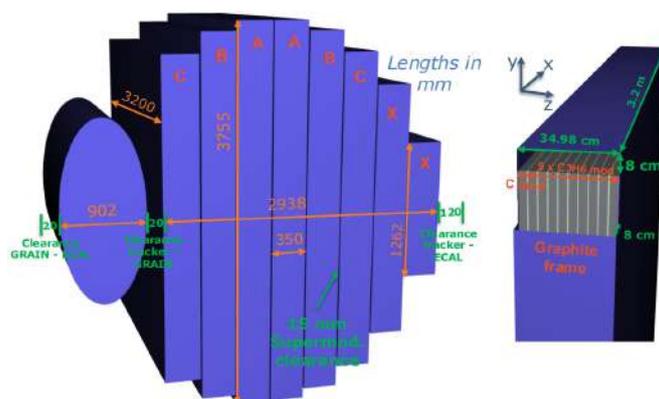


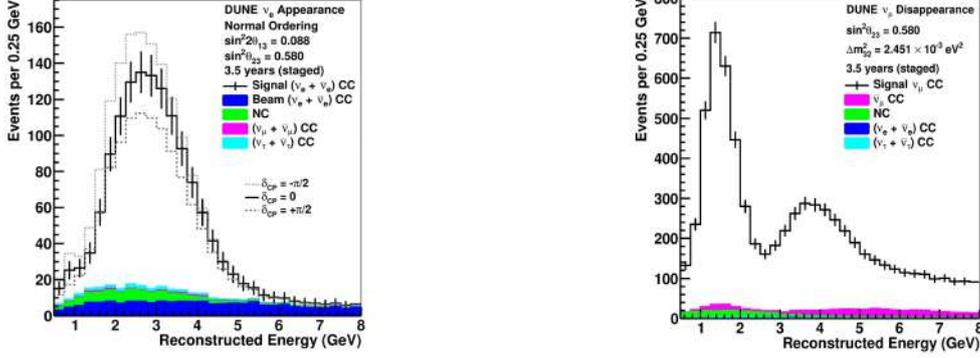
Figura 1.11: Rappresentazione del possibile layout di rivelatore in SAND a Drift Chamber, il primo oggetto che si vede a sinistra rappresenta GRAIN con a seguire i supermoduli, mentre invece a destra si ha la composizione di un supermodulo.

La descrizione di questo tipo di detector verrà ampiamente approfondita nel Capitolo 2° della medesima tesi, in cui verrà illustrato il secondo prototipo e la sua costruzione presso il centro di ricerca INFN di Bologna.

1.7 Risultati attesi

DUNE prevede di rivelare migliaia di interazioni di neutrini muonici e di neutrini elettronici. I due grafici sottostanti mostrano la simulazione di rivelazione di neutrini al Far Detector, emessi con una energia intorno a 2.5 GeV. In particolare si nota come i neutrini muonici

rivelati al Far Detector presentano una diminuzione di eventi intorno all'energia di 2.5 GeV, Fig. 1.12b. Mentre invece alla stessa energia si ha un picco di eventi di neutrini elettronici, Fig. 1.12a.



(a) Simulazione degli eventi di comparsa di neutrini elettronici al Far Detector. (b) Simulazione degli eventi di neutrini muonici al Far Detector.

Figura 1.12

Grazie a DUNE si conoscerà l'ordinamento di massa dei neutrini con una precisione di 5σ per tutti i valori di δ_{CP} dopo solo due anni di funzionamento, fig. 1.13b. Avrà le capacità di osservare la violazione CP nel settore dei neutrini con una precisione di $3\sigma(5\sigma)$ dopo un periodo di funzionamento di 5(10) anni, per il 50% di tutti i valori di δ_{CP} . Effettuerà misure precise anche sugli altri parametri, raggiungendo nel giro di 15 anni una precisione sul parametro θ_{13} simile alla precisione sugli altri parametri.

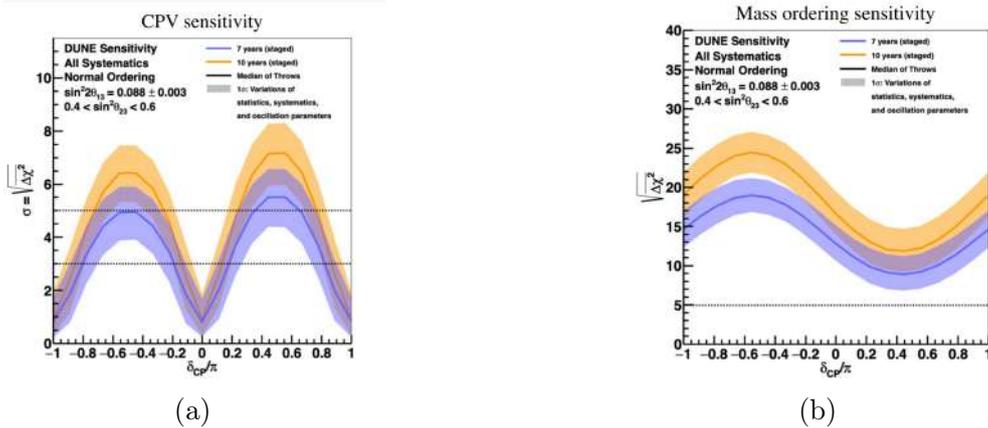


Figura 1.13: Tali grafici mostrano la sensibilità nel tempo della violazione CP (a) e dell'ordinamento delle masse (b). Il tratteggio orizzontale che si trova a 5σ oltre la quale si può affermare di avere fatto una scoperta.

Capitolo 2

Camera a deriva come tracciatore all'interno di SAND

2.1 Rivelazione dei neutrini

Come abbiamo detto precedentemente i neutrini vengono rivelati misurando le particelle prodotte dalle loro interazioni con la materia mediate dal W^\pm (processi di corrente carica) e Z_0 (processi a corrente neutra). In funzione dell'energia i neutrini hanno diversi tipi di interazione. I processi di corrente carica sono particolarmente utili dal punto di vista sperimentale perché rivelano il sapore del neutrino incidente. Esempi di interazione di corrente carica sono lo *scattering quasi elastico* che è dominante alle basse energie:

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

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

dove $\alpha = e, \mu, \tau$. Per energie più elevate attorno a 1 GeV possono avvenire processi di *risonanza*, come per esempio:

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + \Delta^{++} \quad (2.3)$$

e per energie ancora maggiori possono avvenire processi di *deep inelastic scattering*, come ad esempio:

$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + X \quad (2.4)$$

dove X rappresenta uno sciame di adroni.

Invece i processi a corrente neutra possono essere a *scattering elastico*, nei quali i neutrini interagiscono con gli elettroni atomici e possono essere del tipo:

$$\nu_\alpha + e^- \rightarrow \nu_\alpha + e^- \quad (2.5)$$

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

dove $\alpha = e, \mu, \tau$. In particolare, nell'ultimo caso, se l'energia è sufficientemente alta, possono essere prodotti anche muoni o tauoni, [8]:

$$\bar{\nu}_\alpha + e^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.7)$$

$$\bar{\nu}_\alpha + e^- \rightarrow \tau^- + \bar{\nu}_\tau \quad (2.8)$$

In generale, da quanto descritto sopra è chiaro che un buon rivelatore di neutrini deve essere in grado di ricostruire in quanto più possibile il sapore e l'energia del neutrino attraverso lo studio delle particelle prodotte nell'interazione. Queste caratteristiche sono particolarmente importanti per il Near Detector che pur avendo una massa molto inferiore al Far Detector gode del vantaggio di avere un flusso enormemente più alto e può determinare con precisione la composizione del fascio di neutrini distinguendo la componente principale ν_μ dalle contaminazioni di ν_e e $\bar{\nu}_e$ che altrimenti contribuirebbero significativamente all'errore sistematico. SAND è uno spettrometro magnetico estremamente sofisticato che misura bene: impulso, energia e identifica le particelle.

Per misurare l'impulso in un campo magnetico è necessario avere un tracciatore. Il concetto di tracciatore utilizzato in SAND è abbastanza diverso dai tracciatori utilizzati negli esperimenti ai collider. Laddove nei collider uno cerca di costruire i tracciatori più "trasparenti" possibili in termini di lunghezza di radiazione per minimizzare il deterioramento della risoluzione in impulso dovuto allo scattering multiplo. Nel caso di SAND si è dovuto cercare un compromesso tra risoluzione in impulso e massa a disposizione dei neutrini per interagire.

SAND, come descritto precedentemente, si tratta di un tracciatore ibrido che contiene dei bersagli, separati da rivelatori a fili di piccola massa. Una delle opzioni allo studio per questi tracciatori è costituita dalle camere a deriva.

2.2 Principi di funzionamento della camera a deriva

La camera proporzionale a multifili (MWPC) può essere considerata la progenitrice della camera a deriva. Fu sviluppata per la prima volta negli anni Sessanta da *George Charpak*. Questo tipo di rivelatore, basato sulla raccolta elettronica dei segnali di ionizzazione tramite una griglia di fili anodici, ha rappresentato una svolta nella rivelazione di particelle cariche, [9]. La camera a deriva ne costituisce l'evoluzione: sfrutta il tempo di deriva degli elettroni prodotti da un evento di ionizzazione per ricostruire la posizione spaziale della particella incidente.

2.2.1 Eccitazione e ionizzazione del gas

Un rivelatore a gas basa il suo funzionamento su due fenomeni: la creazione di coppie elettrone-ione e il moto di deriva delle cariche soggette a campo elettrico. Le particelle

cariche che attraversano la camera interagiscono con le molecole di gas contenute in essa perdendo parte della loro energia sotto forma di eccitazione o ionizzazione del gas.

L'eccitazione del gas comporta l'eccitazione di un elettrone del gas dallo stato fondamentale allo stato eccitato:



dove p è una particella carica che interagisce con la molecola di gas X . Questo processo coinvolge solo gli elettroni della molecola X per i quali lo spostamento da stato fondamentale a stato eccitato richiede l'esatta energia assorbita dalla particella carica. Tipicamente, la sezione d'urto per un gas nobile per un processo di *resonance* come nell'equazione (2.9), è di $\sigma \simeq 10^{-17} \text{cm}^2$, [10]. Sebbene non vengano creati elettroni o ioni liberi, la molecola di gas può comunque partecipare ad altre reazioni che portano a ulteriori ionizzazioni o eccitazioni.

Il secondo fenomeno è la ionizzazione nel quale il passaggio di una particella carica genera una coppia ione-elettrone. L'energia minima richiesta per strappare un elettrone a una molecola, chiamata energia di ionizzazione, è ben definita e caratteristica per ogni sostanza, sebbene il processo possa avvenire con trasferimento di energia superiore a questo valore soglia. Ciò porta ad avere una probabilità maggiore alle alte energie che tale fenomeno accada rispetto all'eccitazione, con una sezione d'urto $\sigma \simeq 10^{-16} \text{cm}^2$, [10]. Il processo di ionizzazione è riportato nella seguente equazione:



dove X che rappresenta la molecola di gas e p una particella carica.

L'elettrone e il corrispondente ione creati direttamente dal passaggio della particella sono detti *ioni primari*, e se questi hanno energia sufficiente possono a loro volta creare altre coppie elettrone-ione, in un processo di *ionizzazione secondaria*. Tale catena può andare avanti finché l'energia è superiore all'energia di ionizzazione. È da notare come tale fenomeno sia di natura statistica; quindi particelle identiche, in generale, non producono lo stesso numero di coppie e il valore medio di coppie create non dipende molto dal tipo di particella carica, e solo debolmente dal tipo di gas.

L'energia per creare una coppia elettrone-ione dipende dal tipo di gas: per l' Ar è di 26 eV, mentre per la CO_2 è di 33 eV. Conoscere il numero di atomi che vengono ionizzati è fondamentale per sapere l'efficienza del rivelatore. La risoluzione R in energia della camera a deriva associata all'energia E che deposita la particella, è data da, [10]:

$$R = 2.35 \sqrt{\frac{Fw}{E}} \quad (2.11)$$

dove w è l'energia media per ionizzare una molecola e F è il fattore di Fano che dipende dalla miscela di gas scelta ed è minore di 1. Tale equazione esprime la risoluzione limite,

determinata unicamente dalle fluttuazioni statistiche nella produzione di carica ionica. Tuttavia, nelle applicazioni pratiche, la risoluzione reale risente di ulteriori contributi, tra cui: il rumore elettronico, la diffusione degli elettroni durante la deriva, l'efficienza di raccolta, la ricombinazione ionica e altri.

Mentre il numero di coppie elettrone-ione è importante per l'efficienza e la risoluzione energetica del rivelatore, è altrettanto importante che queste coppie rimangano libere abbastanza da essere raccolte. Due processi ostacolano tale opzione: la *ricombinazione* e la *cattura elettronica*.

La ricombinazione è un fenomeno in cui le coppie tendono a ricombinarsi sotto la forza di attrazione elettrica emettendo un fotone:



dove il fotone emesso ha energia pari a quella necessaria per formare il legame. Il tasso di ricombinazioni dn dipende dalla concentrazione di ioni positivi n^+ e dalla concentrazione di elettroni n^- nell'unità di tempo dt :

$$\frac{dn}{dt} = bn^-n^+ \quad (2.13)$$

dove b è una costante dipendente solo dal tipo di gas. Se la concentrazione negativa coincide con quella positiva, $n^+ = n^- = n$, allora avremo che n rappresenta il numero di coppie elettrone-ione e si può notare come tale valore diminuisca nel tempo:

$$n = \frac{n_0}{1 + bn_0t} \quad (2.14)$$

dove n_0 è la concentrazione di coppie iniziali al tempo $t = 0$.

Si nota come, al passare del tempo, le coppie libere tendono ad azzerarsi; per evitare ciò si può utilizzare un campo elettrico sufficientemente intenso da allontanare gli elettroni dagli ioni, aumentando il tempo tra la ionizzazione e la ricombinazione.

La cattura elettronica invece si basa sulla cattura di un elettrone da parte di una molecola elettronegativa, da cui ha origine uno ione negativo stabile X^- con l'emissione di un fotone:



La presenza di molecole elettronegative nel gas provoca una notevole riduzione della raccolta di cariche libere.

A seconda del gas utilizzato, l'intensità del campo elettrico nelle regioni di deriva viene scelta in base alle condizioni richieste. Solitamente si aggira intorno a 500 V/cm o superiore per ridurre il fenomeno della ricombinazione e aumentare il processo di ionizzazione a cascata generando così molti elettroni liberi,[11]. L'uso di un gas miscelato con un altro componente elettronegativo permette di avere un processo di ionizzazione a cascata controllato. Un classico esempio di miscela di gas è Ar assieme a CO_2 .

2.2.2 Moto degli elettroni e degli ioni nel gas

La comprensione del moto degli elettroni e degli ioni nel gas è molto importante perché influisce sulle capacità di risoluzione spaziale e temporale della camera. La presenza o meno di un campo elettrico esterno fa cambiare molto il moto degli ioni e degli elettroni liberi nel gas. I due principali fenomeni cui essi sono soggetti sono la *diffusione* e la *deriva nel campo elettrico*.

In generale le cariche libere si diffondono in maniera uniforme dal punto in cui sono state prodotte. Durante il moto, gli ioni e gli elettroni urtano contro altre molecole del gas perdendo energia fino a raggiungere l'equilibrio termico con il gas prima di ricombinarsi. All'equilibrio termico con il gas si ha che la velocità delle cariche è descritta dalla distribuzione di Maxwell-Boltzmann:

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} 4\pi v^2 e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}} \quad (2.16)$$

dove k_B è la costante di Boltzmann, T la temperatura all'equilibrio e m è la massa della particella. La differenza di velocità tra gli ioni e gli elettroni è causata dalla diversa massa. La velocità media v è data dall'equazione:

$$v = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \quad (2.17)$$

Per gli elettroni è dell'ordine di 10^6 cm/s e per gli ioni è dell'ordine di 10^4 cm/s, [10]. Dalla teoria cinetica dei gas la distribuzione lineare delle cariche dopo aver diffuso per un tempo t risulta essere Gaussiana, seguendo l'equazione:

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \quad (2.18)$$

dove N_0 è il numero totale di cariche, x è la distanza dal punto di creazione e D è il coefficiente di diffusione. Dall'equazione si nota che il numero massimo di cariche libere N lo si ha vicino al punto di passaggio della particella carica, quindi per valori di x piccoli. Aumentando la distanza dal punto di passaggio della particella carica, quindi aumentando x , si ha che N diminuisce. La deviazione standard σ di tale distribuzione dipende dalla risoluzione spaziale della camera a deriva, cioè dalla precisione spaziale con cui può essere misurato il punto in cui è passata la particella carica incidente:

$$\sigma(x) = \sqrt{2Dt} \quad (2.19)$$

il cui aumento è in funzione del tempo t e dipende da D . Il coefficiente di diffusione è un parametro che può essere calcolato attraverso la teoria cinetica dei gas e dipende dal

libero cammino medio degli elettroni o degli ioni nel gas $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{kT}{\sigma_0 p}$, e dalla velocità di deriva:

$$D = \frac{1}{3} v \lambda = \frac{2}{3p\sigma_0\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{(k_B T)^3}{m}} \quad (2.20)$$

dove p è la pressione e σ_0 è la sezione d'urto delle molecole di gas. Si può ben notare come D dipenda dal tipo di gas attraverso la sezione d'urto.

Sommato al moto di diffusione si ha il moto di deriva da campo elettrico dove gli elettroni e gli ioni sono accelerati sotto l'effetto del campo elettrico rispettivamente verso l'anodo e il catodo. Questa accelerazione è ridotta dagli urti con le molecole di gas che limitano la velocità massima che può essere raggiunta dalle cariche lungo la direzione del campo elettrico. La velocità media si chiama *velocità di deriva* e si sovrappone al moto casuale di diffusione. La velocità di deriva per gli ioni è dell'ordine di 10^3 cm/s e per gli elettroni è dell'ordine di 10^6 cm/s grazie alla minor massa.

È utile andare a definire la mobilità μ , cioè la capacità di una carica di muoversi per effetto del campo elettrico:

$$\mu = \frac{u}{E} \quad (2.21)$$

dove u è la velocità di deriva e E è il campo elettrico. Per gli ioni positivi la velocità di deriva dipende dal rapporto E/p anche noto come campo elettrico ridotto, fino a campi elettrici relativamente alti. A pressione costante ciò implica che la mobilità degli ioni è costante e varia solo al variare di E . Per un gas ideale con le cariche libere all'equilibrio termico la mobilità può essere correlata alla costante di diffusione:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e} \quad (2.22)$$

Questa equazione, nota come relazione di Einstein, descrive il moto diffusivo sotto l'azione di un campo elettrico. Si noti come tale rapporto dipenda da k che è la costante di Boltzmann, dalla carica dell'elettrone e e dalla temperatura. Se la temperatura è costante si ha una dipendenza lineare tra mobilità e velocità di deriva. La mobilità degli elettroni è in funzione del campo elettrico ed è molto maggiore rispetto a quella degli ioni positivi. L'aumento in velocità degli elettroni influenza il coefficiente di diffusione e di conseguenza aumenta la loro diffusione spaziale, eq. (2.20). Questo riduce la risoluzione della camera che si basa sul tempo di deriva degli elettroni di ionizzazione.

In presenza di un campo elettrico sufficientemente elevato superiore a 500 V/cm, avviene la *moltiplicazione a valanga* data dal fatto che gli elettroni di prima ionizzazione ottengono sufficiente energia dal campo elettrico per andare a ionizzare altre molecole del gas. Gli elettroni secondari risultanti acquistano a loro volta energia producendo una ionizzazione terziaria, e così via. Ciò porta alla formazione di una valanga di elettroni. Grazie alla grande mobilità degli elettroni, la valanga assume una forma a goccia con gli elettroni sulla testa e gli ioni più lenti dietro, come si vede in Fig. 2.1.

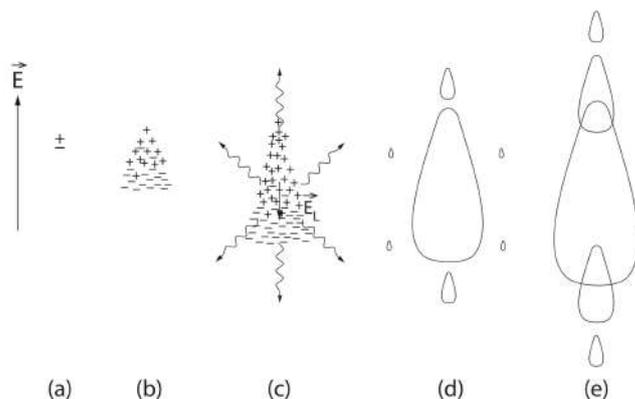


Figura 2.1: Evoluzione di una valanga di carica in un forte campo elettrico: (a) ionizzazione primaria. (b) formazione della valanga, (c) accumulo di un controcampo nella valanga con ricombinazione nella zona neutra della valanga e successiva fotoemissione, (d) generazione di nuove valanghe mediante fotoionizzazione, (e) fusione delle valanghe.

Il primo coefficiente di Townsend α è definito come il numero medio di ionizzazioni prodotte da un elettrone per unità di lunghezza lungo la direzione del campo elettrico, e dipende dal tipo di gas e dal valore del campo elettrico. Se si considerano n_0 elettroni liberi in un certo istante t_0 , dopo aver percorso una distanza x , il numero totale di elettroni liberi prodotti sarà:

$$n(x) = n_0 e^{\alpha x} \quad (2.23)$$

Dati gli elettroni prima e dopo la valanga è possibile conoscere il fattore di moltiplicazione M , dato un campo elettrico uniforme:

$$M = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x} \quad (2.24)$$

Se il campo elettrico non è uniforme, si ha che α è in funzione di x e si ottiene la seguente espressione:

$$M = e^{\int_{r_0}^{r_1} \alpha(x) dx} \quad (2.25)$$

Il fattore moltiplicativo non può assumere valori superiori a 10^8 o $\alpha x < 20$, in quanto superarlo porterebbe a un breakdown della camera.

2.2.3 Funzionamento della camera a deriva

Il funzionamento base della camera lo si può sintetizzare studiando una singola cella formata da un filo di anodo, un catodo e nello spazio vuoto tra loro del gas. Il catodo può essere disposto in vari modi affinché il campo elettrico sia in direzione dell'anodo e il più possibile uniforme attorno al filo di anodo.



Figura 2.2: Rappresentazione schematica della specifica cella utilizzata nella camera costruita, dove il catodo è chiamato field dato che forma il campo elettrico, mentre l’anodo è chiamato sense perché è dove si raccoglie il segnale.

L’immagine 2.2 mostra lo schema della specifica cella di camera a deriva costruita, nella quale i punti blu rappresentano la sezione dei fili di catodo e il punto rosso un filo di anodo. Le due linee nere rappresentano due piani di catodo che chiudono superiormente e inferiormente la cella, permettendo la formazione di un campo elettrico uniforme intorno all’anodo. I due piani di catodo in questo esempio sono in mylar.

Basandosi sulla specifica cella dell’immagine 2.2, è possibile costruire una camera a deriva. L’alternanza dei fili di catodo e dei fili di anodo permette di realizzare il piano di fili della camera a deriva. In tale camera si chiamano i fili di anodo con il nome di *fili di sense* poiché sono i fili su cui si raccoglie il segnale, e si chiamano i fili di catodo con il nome di *fili di field* dal momento che vengono utilizzati, assieme alle superfici di mylar, per dare la forma al campo elettrico.

Il passaggio di una particella carica ionizza le molecole di gas andando così a formarsi coppie elettrone-ione. Gli elettroni, sotto l’effetto di campo elettrico, vengono trasportati verso l’anodo mentre gli ioni vengono trasportati più lentamente verso il catodo. Grazie a un campo elettrico sufficientemente alto all’interno della camera, la ricombinazione delle coppie elettrone-ione è impedita, permettendo alle cariche di spostarsi per più tempo. In particolare, le camere a deriva operano in regime proporzionale, ovvero il campo elettrico è sufficientemente intenso da accelerare gli elettroni e fargli raggiungere un’energia tale da ionizzare le molecole sul loro cammino. La stessa cosa vale anche per gli elettroni liberati, generando così una moltiplicazione a valanga. Tale processo avviene in prossimità dell’anodo, dove il campo elettrico è più intenso dato che è inversamente proporzionale alla distanza dal filo, permettendo così di amplificare il segnale di corrente prodotta di un fattore dell’ordine di $10^3 - 10^4$. L’amplificazione del segnale dipende anche dal gas o miscela utilizzata. Il gas più comune che viene utilizzato è l’Argon che permette il funzionamento della camera e l’amplificazione del segnale a tensioni non troppo elevate. Come molto spesso accade, tale gas viene miscelato con l’anidride carbonica, che diminuisce la velocità di deriva degli elettroni, ottenendo un miglioramento nella risoluzione spaziale della camera e permette di assorbire i fotoni che sono stati liberati nel gas e di dissipare l’energia attraverso la dissoluzione delle sue molecole attraverso urti elastici.

Il segnale rivelato dall'anodo è prodotto dal moto di deriva degli ioni e degli elettroni all'interno del gas. L'inizio del segnale coincide con l'inizio del movimento delle cariche generate dalla ionizzazione primaria. Per determinare il tempo di deriva, è necessario un riferimento temporale preciso che segnali il passaggio della particella carica. A tale scopo si utilizzano solitamente rivelatori a scintillazione che, coprendo l'intera area sensibile della camera, forniscono il tempo iniziale (t_0) per la misura del drift.

Un rivelatore a scintillazione sfrutta la capacità di alcuni materiali, come lo ioduro di sodio NaI o lo ioduro di cesio CsI, di emettere luce quando vengono attraversati da particelle cariche. I tempi di emissione delle molecole eccitate sono dell'ordine di $\sim 50 - 100$ ns, e il tempo di percorrenza del segnale luminoso fino ai fotorivelatori può essere considerato istantaneo. Grazie ai tempi così brevi è possibile considerare tale strumento istantaneo rispetto al passaggio della particella, dando così il tempo d'inizio del moto di deriva. Il moto di deriva avviene tipicamente in un tempo dell'ordine di alcuni microsecondi per gli elettroni e di millisecondi per gli ioni.

La simulazione della cella nell'immagine 2.2 di 1.4×1.2 cm² mostra l'andamento del tempo di deriva e dell'intensità del campo elettrico attorno a un filo di anodo con un tensionamento di 0 V sull'anodo e di -1.6 kV sul catodo e i piani di mylar.

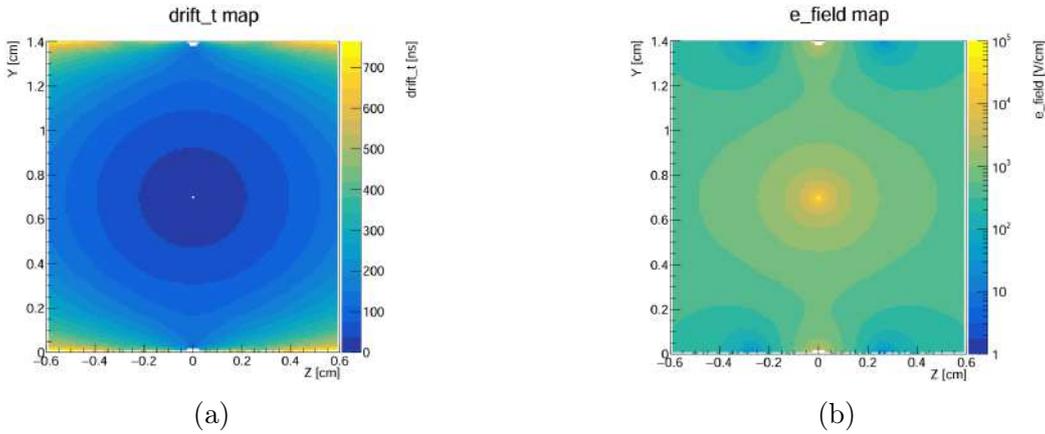


Figura 2.3: Simulazioni del tempo di deriva (a) e del campo elettrico (b) di una cella. Al centro si trova il filo di anodo mentre il punto bianco sopra e sotto rappresentano i fili di catodo. Sull'estremo a destra e l'estremo sinistra delle immagini sono presenti i piani di catodo

La distanza tra la traiettoria della particella e l'anodo la si ottiene conoscendo la velocità di deriva e il tempo di deriva attraverso l'equazione:

$$x = \int_{t_0}^{t_1} v dt \quad (2.26)$$

Si nota che se la velocità di deriva è costante, la relazione tra x e il tempo di deriva è lineare. L'ordine di grandezza della velocità di deriva per gli elettroni è tipicamente di 5 cm/ μ s, anche se per misure più accurate non è possibile considerarla costante.

Attraverso un singolo filo di anodo è possibile conoscere soltanto la distanza radiale dalla traiettoria della particella. Infatti non si conosce nemmeno se la particella sia passata a destra o a sinistra del filo, 2.2. Per risolvere tale quesito e conoscere correttamente la traiettoria della particella si possono utilizzare più piani di fili, orientati ciascuno con un angolo diverso. Combinando le distanze radiali misurate nei diversi piani con la geometria nota della disposizione dei fili, è possibile determinare con precisione il punto di passaggio della particella. Sovrapponendo più camere a deriva lungo la direzione di propagazione, si ottengono più punti di misura del percorso, rendendo così possibile la ricostruzione completa della traiettoria della particella.

La risoluzione spaziale della camera a deriva dipende da quanto sia nota la relazione tra il tempo di deriva e le coordinate spaziali, e dalla quantità di diffusione subita dagli elettroni durante la deriva. Quest'ultimo fattore dipende dalla lunghezza del percorso di deriva. Se si assume che la velocità di deriva sia uniforme, allora si può vedere dall'equazione 2.19 che la risoluzione della camera a deriva è:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2Dx}{\mu E}} \quad (2.27)$$

dove D è il coefficiente di diffusione, μ è la mobilità, E è l'intensità del campo elettrico e x è la lunghezza del cammino di deriva degli elettroni. 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 evitare di utilizzare voltaggi eccessivamente alti. La risoluzione spaziale di una camera a deriva è dell'ordine di 50 – 100 μ m.

2.3 Prototipo di camera a deriva

Il tracciatore all'interno di SAND potrebbe essere una camera a deriva, come visto nel paragrafo 1.6.4. Per verificare la fattibilità di tale progetto, sono stati costruiti due prototipi di camera a deriva presso la Sezione INFN di Bologna.

Il secondo prototipo è più grande e copre una superficie di 1200 mm \times 800 mm, con una struttura esterna in alluminio. Al suo interno sono presenti tre piani di fili impilati uno sull'altro, separati da fogli di mylar bi-alluminato. Ogni piano di fili è composto da 113 fili di cui 57 di field e 56 di sense; la presenza più numerosa dei fili di catodo serve per formare un campo elettrico uniforme anche nei fili di anodo più esterni. I fili di ciascun piano hanno inclinazioni diverse rispetto al sistema di riferimento della camera: seguendo l'ordine di costruzione dei piani, dal basso verso l'alto si ha che l'angolo di inclinazione dei fili è rispettivamente di $+5^\circ$, 0° , -5° , come si vede nella Fig. 2.4. In ogni piano la

distanza tra i fili di catodo e i fili di anodo è di 7 mm e la distanza tra un filo e il piano di mylar adiacente è di 6 mm.

Il volume all'interno della camera è riempito da una miscela di gas composta al 85% di Ar e al 15% di CO_2 , posto a una pressione di 2-3 mBar rispetto alla pressione atmosferica.

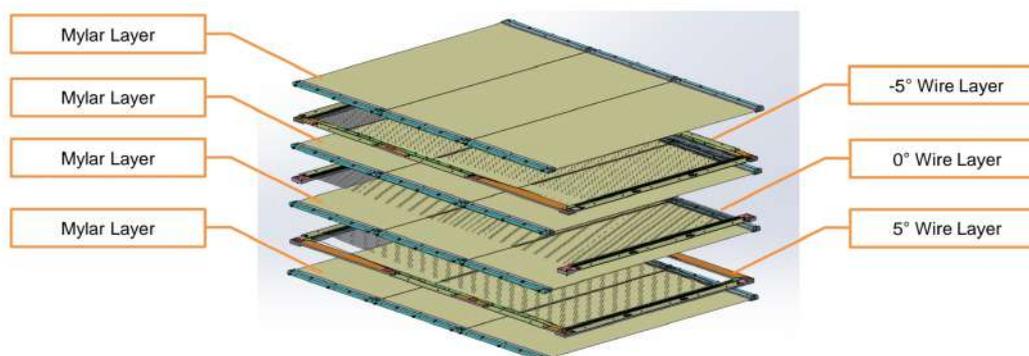


Figura 2.4: Setup dei tre piani di fili e dei tre piani di mylar.

2.3.1 Read out

Il segnale raccolto dai fili di sense si presenta come un impulso con forma d'onda, contenente diverse informazioni utili per la ricostruzione dell'evento: il tempo di arrivo della particella, la durata dell'impulso e la sua ampiezza, che è correlata alla carica raccolta.

Per l'acquisizione dei segnali si possono utilizzare diversi sistemi di lettura. Nel caso specifico della camera realizzata, si è scelto un sistema basato su un ASIC, denominato Tiger.

Il Tiger è un circuito integrato a basso consumo progettato per l'acquisizione di segnali rapidi e di bassa ampiezza, tipici delle ionizzazioni secondarie nei rivelatori a gas. In particolare, il chip misura due parametri fondamentali per ogni canale (cioè per ogni filo che ha raccolto un segnale sopra soglia): il tempo di arrivo del segnale e il tempo sopra soglia, quest'ultimo proporzionale all'ampiezza del segnale e quindi alla quantità di carica raccolta. Queste informazioni sono poi riferite a un tempo zero, fornito da uno scintillatore che viene letto dallo stesso TIGER per sincronizzare gli eventi, [12].

L'altro sistema utilizzato a scopo di test è un sistema "analogico" dove si va ad amplificare un segnale prodotto dalla moltiplicazione e lo si acquisisce su un oscilloscopio.

Capitolo 3

Costruzione dell'apparato sperimentale

3.1 Introduzione

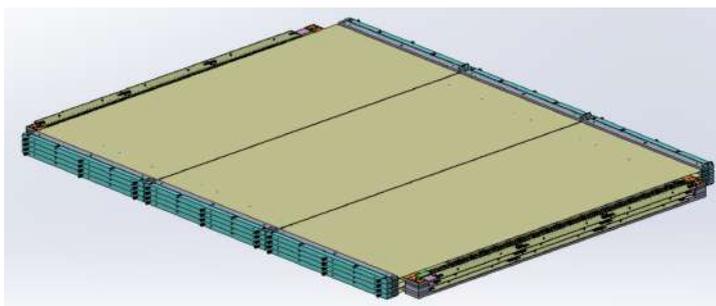


Figura 3.1: Setup della camera a deriva.

La camera è stata progettata per essere leggera, in modo da minimizzare l'assorbimento delle particelle cariche e preservarne la traiettoria. A questo scopo, nella zona sensibile della camera sono presenti esclusivamente i fili e i fogli di mylar. Per sostenere e tenere in tensione sia i fili che il mylar, è presente una struttura formata da una serie di cornici interne in stesalite, e una scatola esterna in alluminio con pareti in mylar in corrispondenza della zona sensibile, come si vede nella figura 3.17.

Il valore esatto delle tensioni di esercizio della camera sarà determinato attraverso una presa dati dedicata esponendo il prototipo lungo linee di fascio. In tale occasione verrà effettuato uno scan in tensione, per studiare i principali parametri della camera, come l'efficienza di rivelazione e la relazione Distanza Tempo, ecc. I dati ottenuti sperimentalmente verranno poi confrontati con le simulazioni Monte Carlo realizzate tramite il software GARFIELD, [13], così da validare il modello del rivelatore e ottimizzare il punto di lavoro.

Per la costruzione della camera sono state utilizzate tre postazioni di lavoro: la prima dedicata alla stesura e all'incollaggio dei fogli di mylar sulle barre di stesalite, la

seconda dedicata alla filatura dei fili sulle cornici in stesalite, infine l'ultima dedicata all'assemblaggio della camera, Fig.3.2.



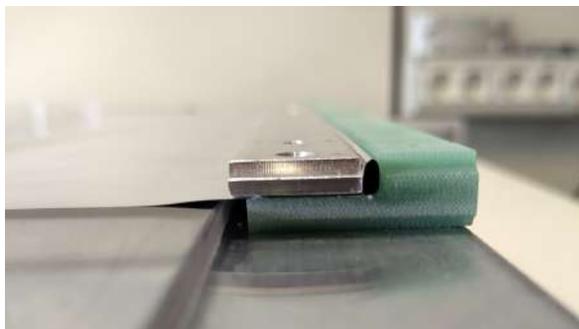
Figura 3.2: Luogo della costruzione.

3.2 Componenti principali

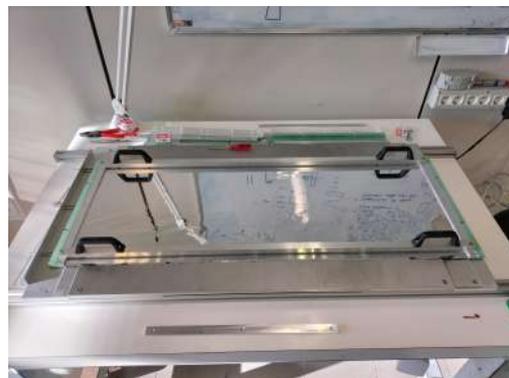
3.2.1 Piani di mylar

Il mylar è un film plastico realizzato in polietilene tereftalato (PET), noto per la sua resistenza meccanica, la buona stabilità termica e le ottime proprietà isolanti. Nel prototipo realizzato sono stati utilizzati fogli di mylar bialuminato dello spessore di $20\ \mu\text{m}$, forniti dal Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP. La conduttività elettrica è garantita grazie alla presenza di un sottile strato di $70\ \text{nm}$ di alluminio posto su ogni faccia.

Il piano di stesura è stato progettato per permettere il fissaggio preciso dei due supporti in stesalite, garantendo il corretto allineamento e la distanza tra essi. Ogni foglio di mylar è stato selezionato con cura, al fine di minimizzare la presenza di difetti, e successivamente disteso con cura sul tavolo di lavoro. Ciascun lato corto del mylar è stato incollato alla stesalite mediante del biadesivo e successivamente una barra di alluminio è stata avvitata sopra il tutto al fine di avere una maggiore tenuta meccanica e poter distribuire la tensione elettrica al mylar. L'estremità del foglio è stata piegata per avere entrambe le superfici a contatto con la barra di alluminio, fig. 3.3a.



(a) Piega e fissaggio del foglio di mylar alla stesalite



(b) Piano di mylar con sopra strutture per il trasporto

Figura 3.3

Successivamente il piano è stato trasportato con l'apposito sistema di trasporto (come mostrato in Fig. 3.3b) sulla postazione di assemblaggio, dove viene applicata una tensione meccanica al fine di tenere il piano perfettamente steso senza avere deformazioni.

Nel tensionamento dei primi fogli di mylar si sono osservate delle deformazioni centrali che avrebbero potuto compromettere il funzionamento del detector nella parte centrale. Sono stati condotti diversi test prima di riuscire a trovare una configurazione di tensionamento che risultasse in una superficie piana e senza deformazioni apprezzabili ad occhio nudo. È stato riscontrato che, inarcando leggermente al centro la stesalite su entrambi i lati, si generavano delle tensioni lungo le diagonali del foglio che annullavano le pieghe centrali, Fig. 3.4. Questo risultato si otteneva regolando i bulloni posti sulle viti centrali, visibili nella figura 3.5.

Infine, per poter applicare una tensione elettrica al piano è stato applicato un piccolo pezzo di nastro adesivo di rame su cui è stato possibile saldare un filo da collegare all'alimentatore di alta tensione (HV).

Sono stati condotti alcuni test sull'utilizzo del biadesivo, poiché alcuni, sotto l'effetto della continua tensione meccanica, cedevano nel tempo in qualche punto provocando deformazioni al foglio.



(a)



(b)

Figura 3.4: Sul piano di sinistra (a) è ben visibile l'assenza di planarità, mentre a destra (b) il mylar rispecchia perfettamente il soffitto della stanza.



Figura 3.5: Deformazione della stesimalite

3.2.2 Piano di fili

Per la filatura dei piani è stata scelta una massa di tensionamento di 50 g per i fili di sense e di 250 g per i fili di field, calcolando la sagitta s attraverso la formula:

$$s = \frac{wL^2}{8T} \quad (3.1)$$

dove w è la densità del filo, L è la sua lunghezza, e T è la tensione.

La sagitta riportata nella tabella è stata calcolata mediante la formula matematica 3.1, la quale tuttavia non tiene conto degli effetti della deformazione strutturale delle barre in stesimalite indotta dalla tensione applicata ai fili. Tale deformazione comporta una

Filo	Materiale	Densità (g/cm ³)	Diametro (μm)	Tensione (g)	Sagitta (mm)
anodo	AuW	19.3	20	50	0.022
catodo	CuBe	8.25	100	250	0.047

Tabella 3.1: Tabella con i parametri dei fili, tensione e sagitta

progressiva riduzione della lunghezza effettiva dei fili centrali, alterando di conseguenza la loro tensione e quindi la sagitta.

Per mitigare la deformazione della barra durante la saldatura sequenziale dei fili, si è optato per un vincolo centrale della barra mediante un pin fissato saldamente al tavolo di lavoro. In assenza di un pin la deformazione raggiunge il valore di $430 \mu\text{m}$. Le simulazioni mostrano che con un pin in acciaio la deformazione massima si riduce a $90 \mu\text{m}$, mentre con un pin di Peek regredisce a $100 \mu\text{m}$. Si possono osservare le deformazioni simulate nei tre casi nella figura 3.6.

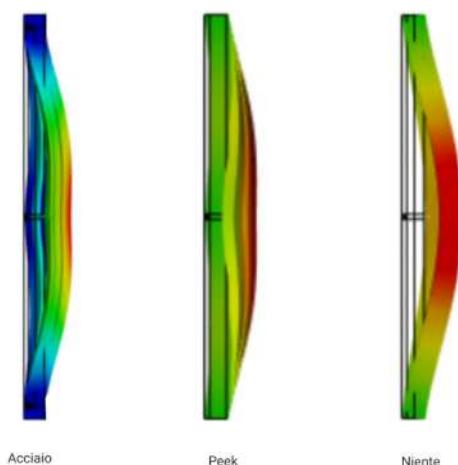


Figura 3.6: Simulazione della deformazione della barra di stesalite rispetto alla presenza o meno del pin di diverso materiale.

La variazione della sagitta dovuta alla deformazione della stesalite, calcolata tramite l'equazione 3.1, è risultata trascurabile. Tale analisi si è comunque rivelata utile per garantire che dopo il trasferimento del piano di fili, quest'ultimo potesse essere correttamente montato sulla struttura in alluminio.

3.2.3 Printed Circuit Board

Le schede di PCB, oltre a garantire il supporto meccanico ai fili, svolgono sia la funzione di distribuzione dell'alimentazione che quella di acquisizione dei segnali, Fig.3.7. La loro

disposizione varia in base alla geometria dei diversi piani di fili: nei piani obliqui le schede sono distribuite su tutti e quattro i lati, mentre nel piano centrale si trovano solo sui lati corti.

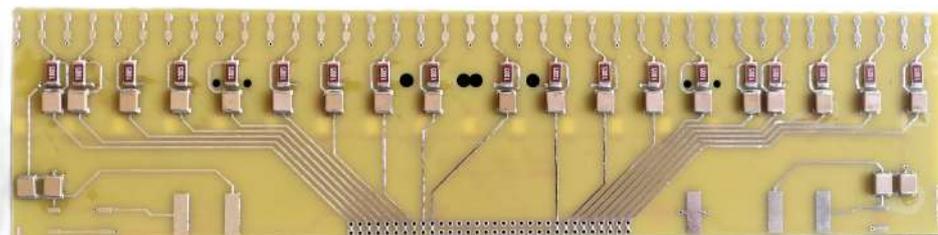
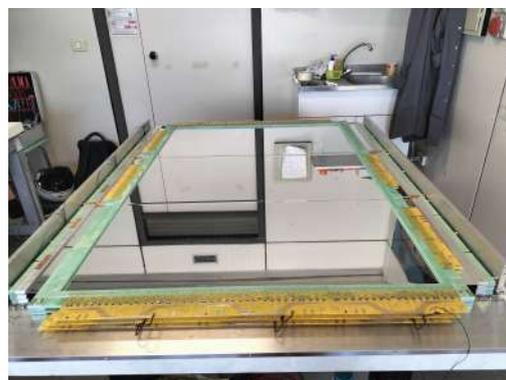


Figura 3.7: Scheda in PCB con sopra montati i componenti

Per ogni piano di fili il sistema adotta una configurazione composta da sei schede principali: tre, collocate sul lato di lettura, sono dedicate alla distribuzione dell'alimentazione e all'acquisizione dei segnali, mentre le tre posizionate sul lato opposto, svolgono la funzione di terminazione elettrica dei fili di sense. Tale disposizione simmetrica suddivide ciascun piano in tre distinti settori paralleli, come illustrato nella figura 3.8.



(a)



(b)

Figura 3.8: Nella figura (a) si ha a sinistra il lato di lettura e a destra il lato di terminazione. Cambiando prospettiva (b) il lato in evidenza è di terminazione

Dal punto di vista circuitale, ogni scheda posta sul lato di lettura è composta da due sezioni funzionali distinte. La sezione di alimentazione fornisce la tensione negativa ai fili di field e 0 V ai fili di sense, mediante una resistenza da 10 M Ω per ciascun filo, che protegge l'elettronica in caso di corto circuito, e un condensatore da 2 nF. La sezione di lettura consente l'estrazione del segnale dei fili di sense attraverso una resistenza da 10 M Ω che svolge la funzione di protezione dell'elettronica in caso di corto circuiti, e

un condensatore da 1 nF, impiegato per l'isolamento dell'alta tensione. Tuttavia nella configurazione finale adottata, con i fili di sense a 0 V, questo componente risulta superfluo. Il circuito corrispondente è riportato in figura 3.9.

Le schede di terminazione poste al capo opposto dei fili presentano una resistenza di 470 Ω , simile al valore dell'impedenza caratteristica del filo, limitando la riflessione dei segnali.



Figura 3.9: Schema esemplificativo del circuito di una scheda in pcb dei primi sei fili della camera, dove i punti indicano le saldature del filo e CH1, CH2 e CH3 rappresentano l'uscita del segnale

I segnali raccolti passano dalle schede di PCB alle schede di interfaccia montate sulla struttura d'alluminio, attraverso un cavo flessibile in cui ogni filo di segnale è affiancato da un filo di massa. Questa configurazione serve a ridurre il crosstalk, ovvero le interferenze tra segnali causate dalla loro vicinanza fisica all'interno del cavo. Su una scheda di interfaccia sono raccolti tutti i segnali provenienti da un settore, il quale è formato dalle schede di PCB poste una sopra l'altra, appartenenti ciascuna a un piano diverso, Fig.3.10.

Ogni scheda di PCB è alimentata singolarmente attraverso un cavo dell'alta tensione (HV) il quale è collegato a una quarta scheda, Fig. 3.10b, mentre il segnale esce attraverso le schede di interfaccia. Nella Fig. 3.11 è riportato lo schema delle connessioni elettriche, comprensivo della distribuzione dell'alta tensione e del sistema di acquisizione del segnale.



(a)



(b)

Figura 3.10: La figura (a) mostra i tre settori, mentre la (b) mostra la quarta scheda per l'HV

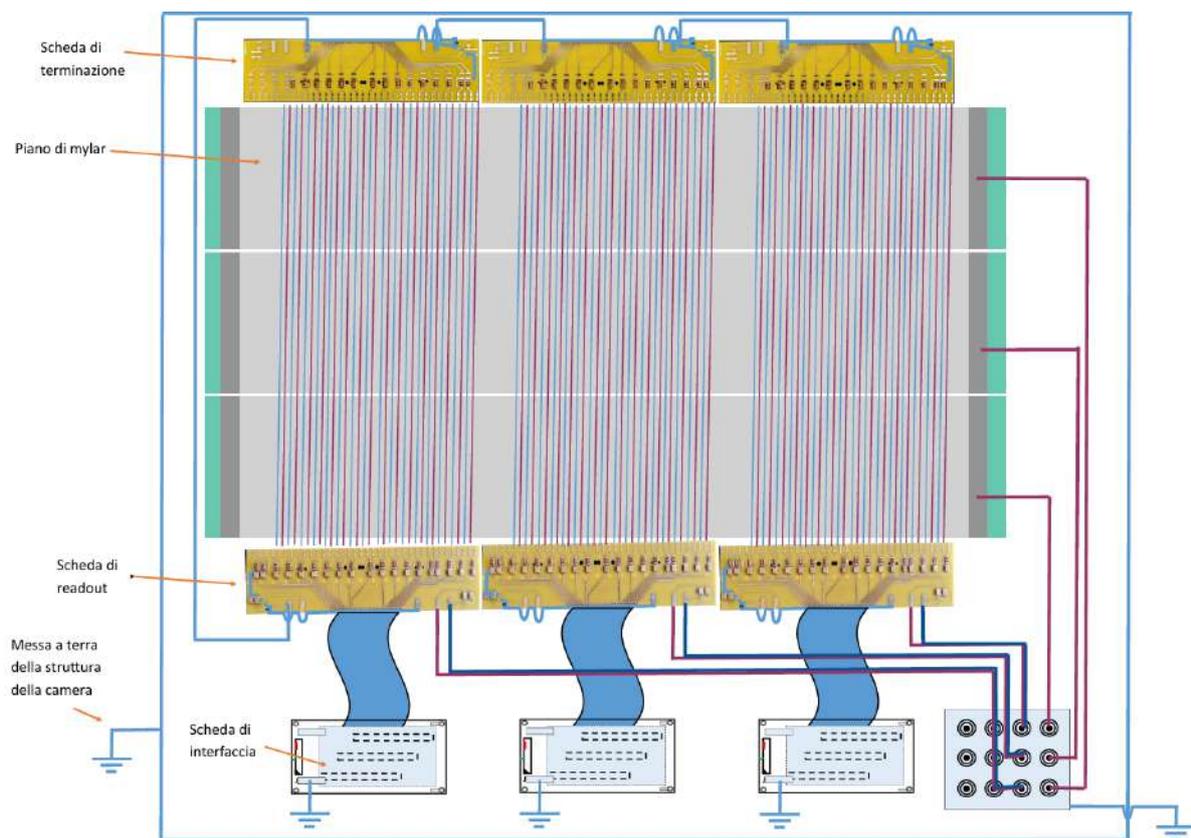


Figura 3.11: Schema collegamenti elettrici. In blu sono i collegamenti a ground mentre in viola sono i collegamenti a HV. Il rettangolo blu attorno alla camera rappresenta la messa a terra della struttura d'alluminio.

I fili letti saranno poco meno rispetto ai fili di sense presenti, poichè sui piani diagonali non si andranno a leggere i fili più corti che non arrivano al lato di readout.

3.3 Procedura di tensionamento e saldatura

La filatura dei fili è iniziata da un lato della cornice e proseguita fino al lato opposto. I primi a essere saldati sono stati i fili di field, a causa della loro maggiore massa e tensione meccanica applicata; successivamente sono stati posizionati i fili di sense. Questa sequenza operativa è stata adottata in quanto l'installazione successiva dei fili di field avrebbe potuto danneggiare i fili di sense, più delicati, qualora si fosse verificata la rottura accidentale di un filo o un errore umano durante l'installazione.

Il posizionamento dei fili è stato eseguito manualmente. Ogni filo è stato inizialmente fissato provvisoriamente con del nastro adesivo sulla scheda di alimentazione, quindi disteso lungo la cornice fino al lato opposto attraverso lo srotolamento del rocchetto, mantenendolo in stato non tensionato (Fig. 3.13a). Successivamente, il filo è stato allineato alle piazzole di saldatura corrette su entrambi i lati.

Dal lato del rocchetto, il nastro ha avuto la funzione di impedire eventuali slittamenti durante la fase di tensionamento, garantendo al contempo un corretto posizionamento del filo sulla piazzola. Sul lato opposto, il filo è stato appoggiato su un cilindro scanalato e collegato a una massa prestabilita per l'applicazione della corretta tensione, Fig. 3.12. Una volta lasciata cadere la massa, il filo si è teso e si è verificato che risultasse ben aderente sia alla superficie in stesalite sia al pin in plexiglass, posto per il corretto posizionamento del filo stesso.

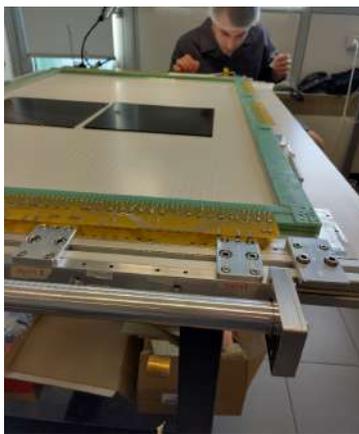
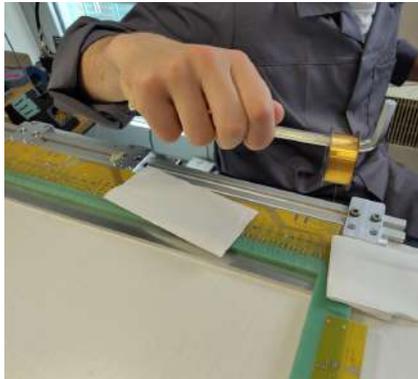


Figura 3.12

Completato il controllo, si è svolta la saldatura del filo su entrambi i lati (Fig. 3.13b), seguita da una pulizia accurata delle giunzioni saldate.



(a) Stesura del filo di sense.



(b) Saldatura del filo di sense.

Figura 3.13: Processo di saldatura.



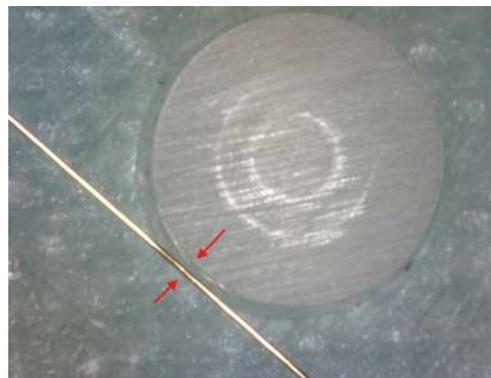
Figura 3.14: Posizionamento del filo di field.

Il corretto posizionamento del filo sul pin è di fondamentale importanza per garantire la distanza precisa di 7 mm tra i fili e la giusta angolazione richiesta dal piano, Fig. 3.15a. È stato più complesso per il piano dritto dato che l'angolo sui fili è zero e non permetteva di avere la certezza che il filo fosse ben appoggiato ai pin. Per risolvere tale problema, i fili sono stati controllati ciascuno al microscopio e saldati a lato e non centralmente sulla piazzola della saldatura per ottenere un minimo di angolo sul pin. Per evitare possibili movimenti o piccoli spostamenti durante il trasporto o il funzionamento della camera, è stata messa dell'araldite, sui punti di appoggio del filo con il pin per fissarli definitivamente.

I piani completi sono stati trasportati mediante un sistema dedicato sulla struttura in alluminio della camera. Il sistema di trasporto è stato progettato per garantire la non deformazione della cornice e il mantenimento del tensionamento dei fili, Fig 3.8a.



(a) Filo appoggiato al pin



(b) Filo non appoggiato al pin

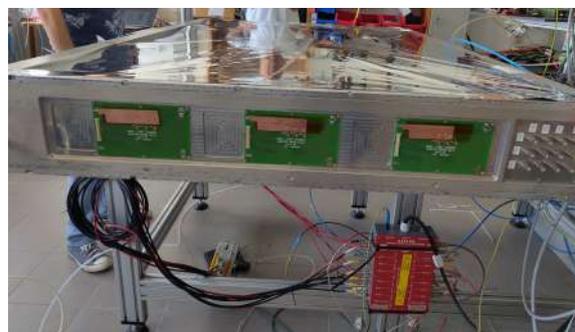
Figura 3.15

3.4 Assemblaggio finale

Ogni piano di fili e di mylar corretto è stato assemblato sulla struttura in alluminio, fino al suo completamento. Completato l'assemblaggio interno, si sono montate le pareti laterali della struttura e stesi i cavi per l'HV e il ground, Fig.3.16.



(a) Foto dal foro per la scheda di interfaccia



(b) Lato con schede interfaccia e scheda HV

Figura 3.16: Figure a camera montata

La faccia superiore e inferiore della camera è stata chiusa con un foglio di mylar spesso $300 \mu\text{m}$ che copre tutta l'area sensibile, fissandolo alla cornice con del biadesivo, delle viti e un o-ring per evitare perdite di gas. Infine sono state posizionate anche le tre schede di interfaccia e il pannello con i connettori HV, il tutto fissato con viti e silicone, ottenendo così la camera chiusa definitivamente, Fig. 3.17.

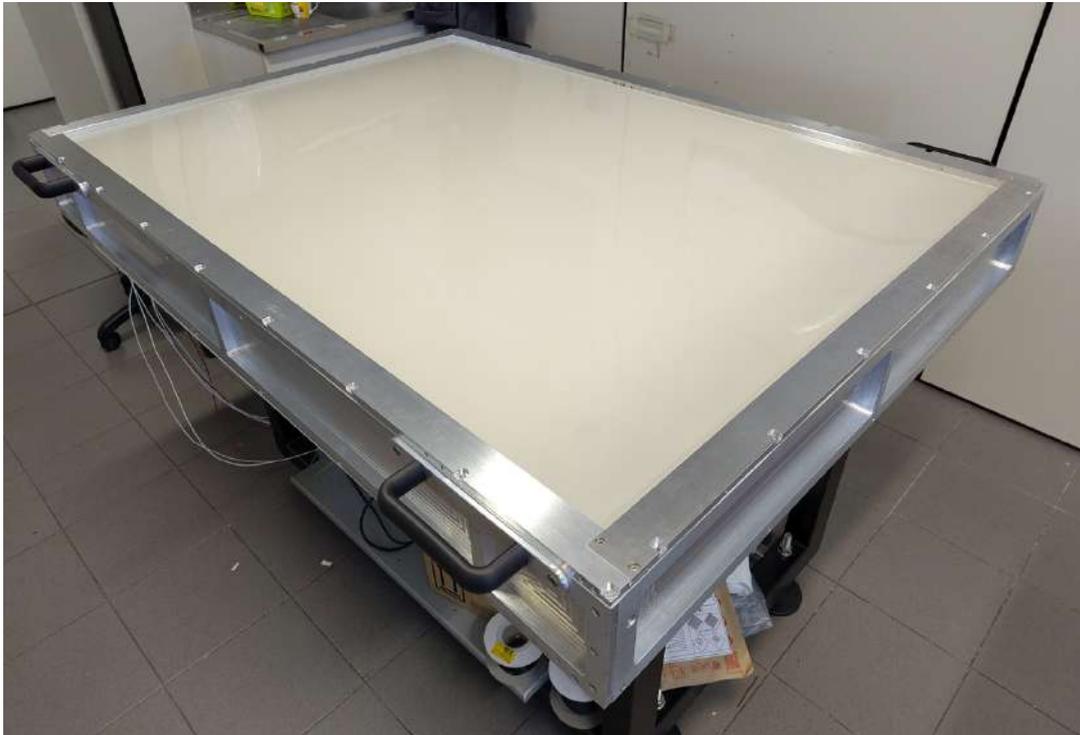


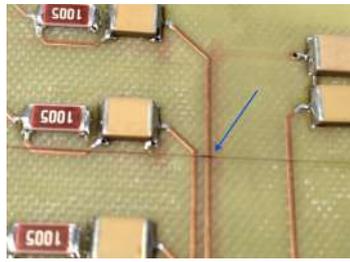
Figura 3.17: Foto camera completata

3.5 Test piano di fili

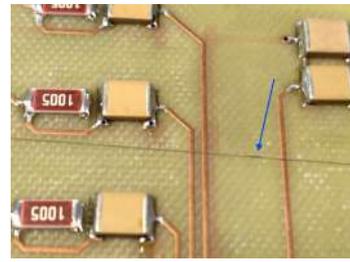
Sfruttando le prime prove di saldatura si è studiato l'elongazione e la saggita dei fili. Un filo sottoposto a tensione si comporta fino a un determinato valore in modo elastico, ma se tale valore viene superato si inizierà a deformare plasticamente. Si è saldato un estremo del filo alla scheda mentre all'altro si è assicurato un peso di grammatura nota, facendolo poggiare sul cilindro scanalato. La condizione di filo a riposo è data da una massa di 5 g per il filo di sense e di 50 g per il filo di field. Progressivamente si è aumentata la massa e dopo ogni misura si è riportato il filo nella condizione di riposo, per verificare se si fosse ancora nel range elastico. La misura di elongazione è stata presa rispetto a un riferimento sulla scheda e sul filo. La distanza tra i riferimenti è stata misurata attraverso un calibro. Nella figura 3.18 è mostrato un esempio di allungamento del filo di field dallo stato a riposo.

Le misure ottenute si sono confrontate con le simulazioni ottenendo i seguenti grafici.

I risultati delle misure rispettano le aspettative per quanto riguarda il filo di field ma non per il filo di sense. In entrambi i casi, non è stato possibile identificare con precisione l'inizio della deformazione plastica. Le misurazioni sono da considerarsi preliminari al fine di ottenere una prima caratterizzazione del comportamento elastico dei fili.

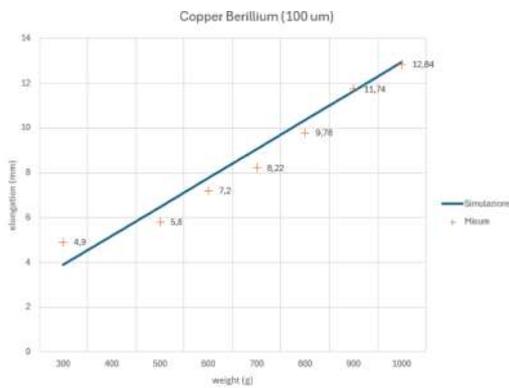


(a)

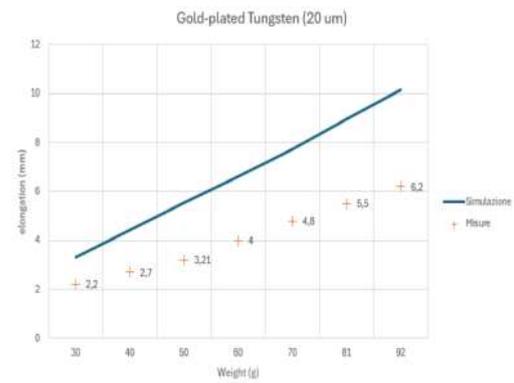


(b)

Figura 3.18: elongazione del filo di field



(a)



(b)

Figura 3.19: Grafici di elongazione dei fili in rapporto alla massa assicurata, a sinistra il filo di field e a destra il filo di sense.

3.6 Tensione dei fili

Dopo aver completato un piano di fili si è misurata la tensione di ogni filo, attraverso il modulo caen SY502. Lo strumento è composto da due cavi per il passaggio della corrente e da un magnete. Una volta collegati i cavi alle due estremità del filo e posto sopra esso il magnete, la corrente provoca un'oscillazione del filo alla sua frequenza fondamentale mediante impulsi elettrici periodici. In questo modo lo strumento misura la tensione utilizzando l'oscillazione del filo conduttore generata dal campo magnetico.

Il microprocessore dello strumento calcola la tensione del filo in grammi misurando la frequenza di oscillazione fondamentale, e la visualizza sul display. La formula utilizzata per calcolare il tensionamento del filo in grammi F è:

$$F = \frac{L^2 d^2 \rho \pi}{g T^2} \quad (3.2)$$

dove L è la lunghezza del filo, d è il diametro del filo, ρ è la densità del filo, T è il periodo di oscillazione, e g è l'accelerazione di gravità.

Per portare la corrente alternata alle estremità del filo sono stati utilizzati dei puntali posizionati sulle piazzole del PCB su cui è saldato il filo. Per il magnete invece, è stato realizzato un sostegno mobile che lo teneva a pochi millimetri dal filo e che permetteva di spostarlo da un filo all'altro mantenendo la sua altezza costante.

Le misure ottenute sui fili di sense e field sono riportate nei seguenti grafici con relativo istogramma.

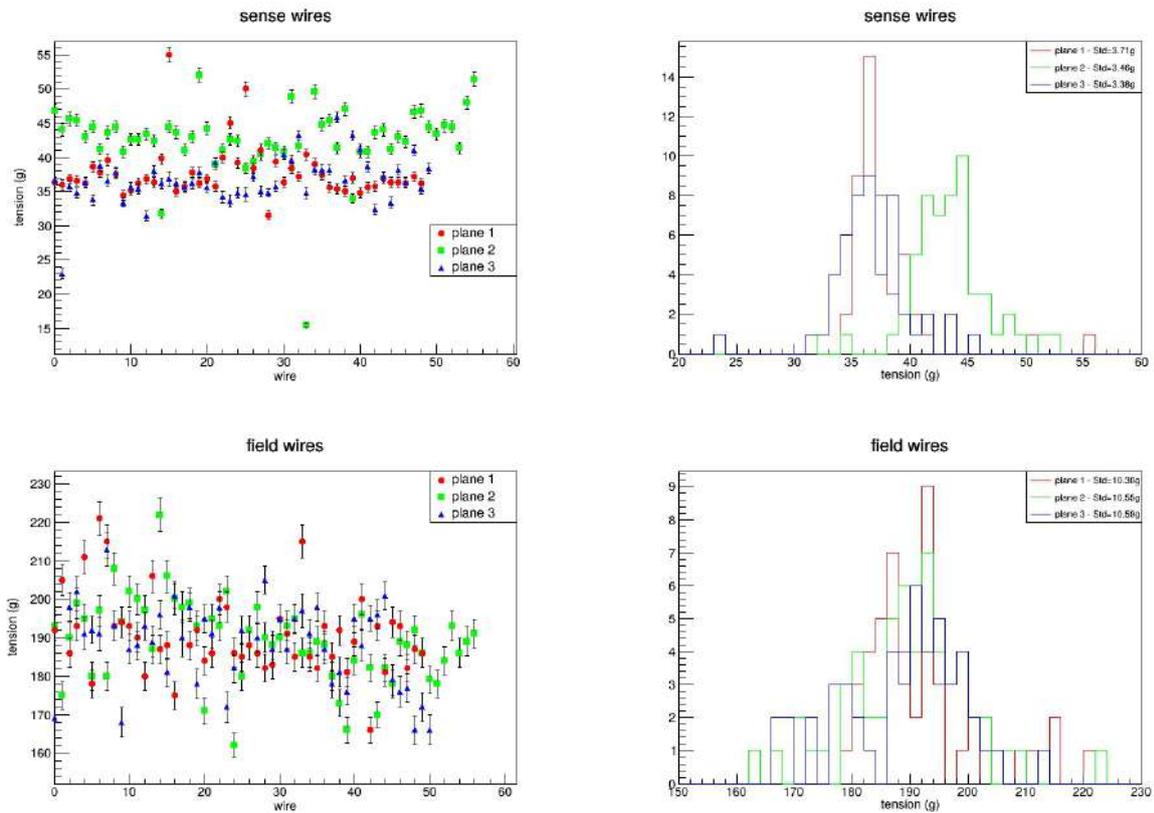


Figura 3.20: I vari colori rappresentano i diversi piani di fili considerati.

Utilizzando i dati ottenuti è possibile trovare la sagitta dei fili di sense e di field attraverso l'equazione 3.1.

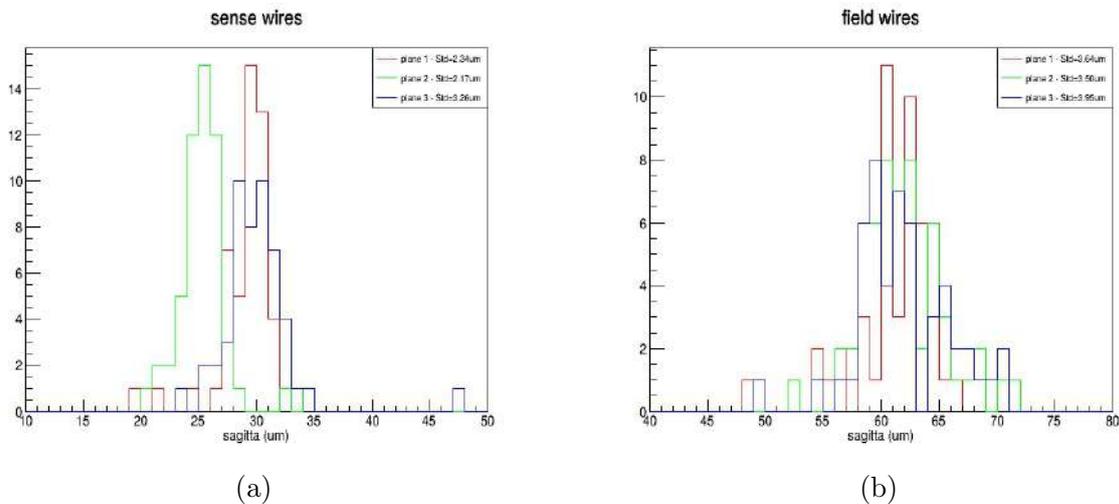


Figura 3.21

Si nota come il valore delle tensioni e di conseguenza delle sagitte non corrispondano alle previsioni. Ciò è stato provocato principalmente dall'attrito del filo sul cilindro scanalato. Infatti, appoggiando prima il filo sul cilindro e poi collegandoci la massa, la forza peso generata dalla massa era contrastata dall'attrito del filo sul cilindro. Nonostante questo risultato inatteso, l'andamento delle tensioni dei fili si è mostrato tutto sommato uniforme tra filo e filo, con una deviazione standard di 3 g per i fili di sense e 10 g per i field.

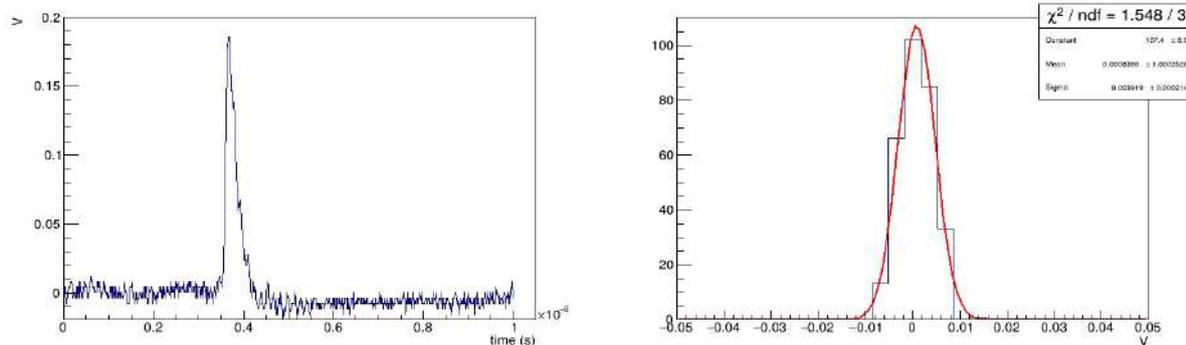
3.7 Messa in funzione della camera

La messa in funzione della camera a deriva è avvenuta in più fasi successive. In un primo momento, la camera è stata sottoposta a un flussaggio continuo di CO_2 alla portata di circa 60 L/h per 24 ore, con l'obiettivo di purificare il volume interno e rimuovere eventuali residui di umidità. Successivamente, è stata impostata la miscela composta da Argon e CO_2 in proporzione 90:10 con un flusso di 10 l/h, che è stata fatta fluire per ulteriori 24 ore.

Terminata questa fase, si è iniziato un graduale incremento della tensione applicata, monitorando il comportamento della camera lungo l'arco di una giornata. La camera ha raggiunto il valore di -1500 V, senza evidenziare scariche né correnti di perdita significative.

Si è quindi scelto un punto di lavoro a -1300 V per effettuare le prime acquisizioni di segnale tramite l'oscilloscopio, utilizzando un amplificatore proveniente dall'esperimento KLOE, caratterizzato da un guadagno pari a 1.5 mV/fC. La figura 3.22a mostra un esempio

di forma d'onda acquisita, con un tempo di salita dell'ordine di 10 ns e un'ampiezza di picco ~ 180 mV.



(a) Segnale acquisito attraverso l'oscilloscopio

(b) Plot della baseline del segnale

Figura 3.22: Grafici di elongazione dei fili in rapporto alla massa assicurata, a sinistra il filo di field e a destra il filo di sense.

È possibile stimare in via preliminare il guadagno G della camera a tale tensione, ipotizzando che il numero medio N di coppie di ioni primari prodotti all'interno del volume sensibile sia pari a 80. L'ampiezza del picco può essere trovata tramite la seguente relazione:

$$A = G_A G N q_e \quad (3.3)$$

dove G_A è il guadagno dell'amplificatore e q_e è la carica dell'elettrone, si ricava il guadagno della camera:

$$G = \frac{A}{G_A N q_e} \quad (3.4)$$

Sostituendo i valori noti si ottiene un guadagno della camera di $G \sim 2 \times 10^4$.

Per caratterizzare il livello di rumore elettronico del sistema di lettura, è stato effettuato uno studio sulla baseline del segnale, prima dell'arrivo del picco, Fig. 3.22a. Il valore medio della baseline risulta centrato intorno allo zero, come atteso, e la distribuzione delle fluttuazioni è stata analizzata ricavandone una deviazione standard σ pari a circa 4 mV, che rappresenta il livello di rumore di fondo del sistema.

Conclusioni

Dal 1998, le oscillazioni dei neutrini sono state oggetto di intensi studi condotti mediante vari esperimenti che coinvolgono neutrini solari, atmosferici, da acceleratore e da reattore. Tali studi hanno permesso di misurare diversi parametri fondamentali, ma restano ancora aperti alcuni quesiti, come la determinazione dell'ordinamento delle masse dei neutrini e la violazione della simmetria CP nel settore leptonic. DUNE è un esperimento di ultima generazione per dare una risposta a questi quesiti.

DUNE è composto da un rivelatore lontano con quattro grandi TPC ad argon liquido per un volume fiduciale di 40 kton e da un complesso di rivelatori vicini formato da tre elementi: ND-LAr e TMS, e SAND. In particolare SAND è un rivelatore ottimizzato per la rivelazione delle incertezze sistematiche e l'analisi delle oscillazioni e per svolgere un ampio programma di fisica del neutrino con incluse ricerche di fenomeni di Beyond the Standard Model.

La sua configurazione prevede un tracciatore che alterna bersagli sottili e moduli di tracciamento di bassa massa. Un rivelatore di argon liquido GRAIN e un calorimetro elettromagnetico ermetico. Il tutto immerso in un campo magnetico solenoidale di 0.8 T.

Le camere a deriva planari sono una delle due tecnologie studiate per il tracciatore. In questo contesto si inserisce il lavoro svolto in questa tesi, nella quale viene descritta la realizzazione e messa in funzione di un prototipo in scala ridotta di questa camera.

Le diverse fasi operative tra cui: il tensionamento meccanico del mylar, la saldatura dei fili e l'assemblaggio della camera, sono discusse in dettaglio. Si presenta poi la fase di messa in funzione del prototipo flussato con una miscela di Argon e CO₂, e sottoposto ai test di alta tensione e di monitor delle correnti indotte.

Infine, sono stati acquisiti i segnali che hanno mostrato segnali con un ottimo rapporto s/m. Una analisi preliminare di questi segnali acquisiti a una differenza di potenziale di 1300 V risulta in un guadagno di circa 2×10^4 in linea con le previsioni delle simulazioni.

Nelle prossime settimane questo prototipo verrà esposto a un fascio di test al CERN per uno studio dettagliato delle sue performance.

Bibliografia

- [1] Sylvie Braibant et al. «Caratteristiche delle interazioni deboli ei neutrini». In: *Particelle e interazioni fondamentali: Il mondo delle particelle* (2012), pp. 187–237 (cit. a p. 5).
- [2] X. Qian e P. Vogel. «Neutrino mass hierarchy». In: *Progress in Particle and Nuclear Physics* 83 (2015), pp. 1–30. ISSN: 0146-6410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2015.05.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641015000307> (cit. a p. 7).
- [3] Ivan Esteban et al. «NuFit-6.0: Updated global analysis of three-flavor neutrino oscillations». In: *Journal of High Energy Physics* 2024.12 (2025), pp. 1–33 (cit. a p. 8).
- [4] B Abi et al. «Experiment simulation configurations approximating DUNE TDR». In: *arXiv preprint arXiv:2103.04797* (2021) (cit. alle pp. 9, 13).
- [5] B Abi et al. «The DUNE far detector interim design report volume 1: physics, technology and strategies». In: *arXiv preprint arXiv:1807.10334* (2018) (cit. a p. 9).
- [6] Federico Battisti. «Monitoring of the DUNE long baseline neutrino beam with SAND detector». In: () (cit. a p. 12).
- [7] M Adinolfi e F Ambrosino. «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> (cit. a p. 18).
- [8] William J Marciano e Zohreh Parsa. «Neutrino–electron scattering theory». In: *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 29.11 (2003), p. 2629 (cit. a p. 23).
- [9] Fabio Sauli. «The Gas Detector (R) evolution». In: *Adv. Ser. Direct. High Energy Phys.* 27 (2017), pp. 115–121 (cit. a p. 23).
- [10] William R Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. Springer Science & Business Media, 1994 (cit. alle pp. 24, 26).

- [11] Hermann Kolanoski e Norbert Wermes. *Particle detectors: fundamentals and applications*. Oxford University Press, 2020 (cit. a p. 25).
- [12] A Rivetti et al. «TIGER: A front-end ASIC for timing and energy measurements with radiation detectors». In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 924 (2019), pp. 181–186 (cit. a p. 32).
- [13] H. Schindler e Rob Veenhof. *Garfield++ website*. Available at <https://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp> [Accessed: 6 March 2025] (cit. a p. 33).