



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Studio sperimentale di tracce di muoni cosmici nel
rivelatore ICARUS T600 al Fermilab

Relatore

Dott. Christian Farnese

Laureando

Luigi Zappacosta

Anno Accademico 2021/2022

Pagina lasciata vuota intenzionalmente.

Abstract

ICARUS T600, un rivelatore Liquid Argon TPC contenente circa 700 tonnellate di Argon liquido, ha iniziato a raccogliere nuovamente eventi di interazione del fascio di neutrini del Booster e NUMI presso il laboratorio del Fermilab, USA, nell'ambito del progetto SBN. L'operazione in superficie comporta un flusso significativo di raggi cosmici che attraversano il rivelatore. Le abbondanti tracce di muoni cosmici possono quindi essere utilizzate per studiare le performance del rivelatore ed in particolare per effettuare la calibrazione dei segnali fisici registrati dai sotto-rivelatori del T600.

Questa tesi si propone di studiare in dettaglio queste tracce di muoni cosmici. L'obiettivo è quello di ottenere una prima valutazione dell'efficienza di identificazione dei segnali registrati sui fili delle TPC di ICARUS.

Indice

1	Introduzione	4
1.1	L'ipotesi del neutrino sterile	4
1.2	ICARUS T600 e l'esperimento SBN	5
1.2.1	Il progetto SBN	5
1.2.2	Descrizione del rivelatore T600	6
1.2.3	Stato del T600 al Fermilab	8
2	Analisi preliminari sulle tracce	9
2.1	Ricostruzione delle tracce in ICARUS	9
2.1.1	Tracce passanti per il catodo	10
2.2	Studio del t_0 e misura della velocità di deriva	11
2.3	Studio della lunghezza e della direzione delle tracce	13
2.3.1	Lunghezza l	13
2.3.2	Angolo θ	14
2.3.3	Discussione sui risultati	15
2.4	Heatmap delle tracce	16
3	Stima di efficienza di identificazione delle hits	19
3.1	Controllo sul funzionamento dei fili	19
3.2	Stima dell'efficienza	21
	Conclusioni	24

Capitolo 1

Introduzione

1.1 L'ipotesi del neutrino sterile

Il neutrino è una delle particelle più abbondanti nel nostro universo, ma nonostante ciò rimane ancora poco conosciuta a causa della sua ridotta probabilità di interagire col resto della materia. È un leptone neutro con massa estremamente piccola, ma non ancora stimata in modo preciso (sappiamo solo che deve essere inferiore all'elettronvolt) e spin semintero. In natura il neutrino si presenta in tre diversi tipi, i quali differiscono per il loro *sapore leptónico*: il neutrino può assumerne uno di tre differenti, ciascuno associato ad un diverso leptone carico (rispettivamente, ν_e all'elettrone, ν_μ al muone e ν_τ al leptone τ). Tale caratteristica è strettamente legata alle interazioni deboli che il neutrino può avere con i nuclei atomici: il sapore determina quale leptone carico verrà generato in caso di interazione in corrente carica (ovvero con scambio di bosone W).

Fra le caratteristiche più peculiari per i neutrini vi è sicuramente il fenomeno di *oscillazione* di sapore, ovvero il processo di trasformazione da un sapore di neutrino all'altro durante il loro moto fra il punto di produzione (sorgente) ed il punto di osservazione (rivelatore). Questo fenomeno implica che il neutrino ha una massa non nulla e per questo le oscillazioni di neutrino risultano essere un chiaro segnale di fisica oltre il Modello Standard delle particelle elementari.

Il fenomeno dell'oscillazione si spiega in particolare ipotizzando che i tre neutrini autostati di sapore siano una sovrapposizione lineare di tre neutrini autostati di massa (quindi con massa ben definita):

$$|\nu_i\rangle = \sum_{j=1}^3 a_j |\nu_j\rangle; a_j \in \mathbb{C}; i \in \{e, \mu, \tau\}$$

Autostati di massa diversa hanno una diversa evoluzione nel tempo e pertanto esiste una probabilità non nulla che un neutrino di un dato sapore, dopo aver percorso una data distanza L , possa essere osservato come un neutrino di sapore differente. La probabilità di oscillazione dipende quindi dalla distanza L percorsa, dall'energia E del neutrino e dai parametri $\Delta m^2 = m_i^2 - m_j^2$, dove m_i ed m_j indicano le masse associate agli autostati di massa. Infine la probabilità di oscillazione dipende dagli angoli di mixing θ_{ij} che descrivono il mescolamento tra i diversi autostati. Le oscillazioni dei neutrini sono state studiate analizzando in dettaglio i segnali associati ai neutrini solari, atmosferici e ai neutrini prodotti dalle reazioni nelle centrali nucleari. Inoltre la produzione di fasci di neutrini agli acceleratori di particelle ha permesso di studiare il fenomeno delle oscillazioni considerando valori di L ed E ben definiti. Questi studi hanno permesso di delineare l'attuale modello a tre neutrini fornendo anche una misura sperimentale dei parametri associati all'oscillazione, in particolare le differenze di masse quadrate $\Delta m_{12}^2 \sim 7.5 \cdot 10^{-5} eV^2$ e $\Delta m_{23}^2 \sim 2.5 \cdot 10^{-3} eV^2$.

Recentemente alcuni esperimenti che studiano i neutrini con rivelatori posti ad una breve distanza dalla sorgente ($L/E \sim m/\text{MeV}$), hanno osservato importanti anomalie sperimentali che sembrano indicare un segnale di nuova fisica oltre il modello a 3 neutrini precedentemente menzionato. In particolare l'esperimento LSND, studiando neutrini di energia fra i 20 ed i 53 MeV in un rivelatore posto a circa 30 m dalla sorgente, ha evidenziato un eccesso di eventi prodotti da antineutrini dell'elettrone che può

essere interpretato come un segnale di oscillazione $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$. Tale risultato definisce una regione dello spazio dei parametri Δm^2 e $\sin^2 2\theta$, con $\Delta m^2 \sim 1.0 \text{ eV}^2$ non compatibile con i risultati forniti dagli studi sulle oscillazioni fino a quel momento noti [1].

Queste anomalie sperimentali possono essere spiegate ipotizzando l'esistenza di un quarto stato di neutrino detto sterile, responsabile di oscillazioni su breve distanza e con Δm^2 molto maggiore rispetto ai valori fino ad oggi misurati per le oscillazioni a 3 neutrini. Il neutrino sterile è una particella teorizzata per la prima volta nel 1957 da Bruno Pontecorvo e che, contrariamente ai neutrini finora sconosciuti, non interagisce tramite forza debole ma risente solo della forza di gravità, rendendola ancor più difficile da studiare. La possibile esistenza dei neutrini sterili richiede quindi di estendere il modello a 3 neutrini introducendo almeno un quarto autostato di massa, con massa dell'ordine dell'eV.

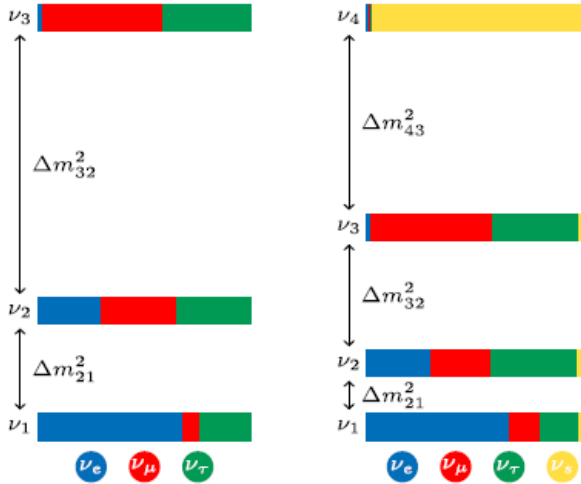


Figura 1.1: Schemi delle gerarchie di massa del neutrino nel modello a 3 (sinistra) e 4 (destra) autostati di sapore. Il modello a destra prevede l'esistenza del neutrino sterile, e dunque presenta quattro autostati di massa.

1.2 ICARUS T600 e l'esperimento SBN

1.2.1 Il progetto SBN

A più di vent'anni dall'evidenza fornita dall'esperimento LSND, non esiste ancora prova dell'esistenza dei neutrini sterili con massa dell'ordine dell'eV. I risultati più recenti continuano infatti a fornire indicazioni interessanti ma non ancora definitive. Tale prova può essere fornita da un esperimento che in primo luogo possa identificare e ricostruire le interazioni di neutrino con elevata efficienza, permettendo quindi di riconoscere il sapore del neutrino e di misurarne l'energia; inoltre questo esperimento deve fornire evidenze chiare di oscillazione di neutrino, utilizzando ad esempio molteplici rivelatori per misurare lo spettro dei neutrini a diverse distanze dalla sorgente dove vengono prodotti i neutrini del fascio. Inoltre una prova definitiva può essere ottenuta ricercando, nello stesso esperimento, i due segnali complementari di comparsa di neutrini dell'elettrone $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, e di scomparsa dei neutrini del muone. Queste tre condizioni descritte potrebbero permettere di fornire quindi una chiarificazione definitiva, con un livello di confidenza di 5σ , sulla natura delle anomalie sopra menzionate.

Il progetto SBN (Short-Baseline Neutrino experiment) al Fermilab soddisfa tutte le condizioni sopra descritte e pertanto vuole appunto fare chiarezza sulle anomalie trovate in particolare dall'esperimento LSND [2]. L'intero esperimento consta di tre rivelatori Liquid Argon Time Projection Chamber LAr-TPC (ICARUS T600, MicroBooneNE, SBND), posti ciascuno a diversa distanza (rispettivamente 600, 470 e 110 m) dalla sorgente in cui viene prodotto il fascio di neutrini Booster Neutrino Beam BNB, con energia media di circa 0.8 GeV. Questa configurazione permette uno studio molto accurato delle oscillazioni di neutrino: l'utilizzo dei rivelatori LAr-TPC permette una eccellente ricostruzione spaziale e calorimetrica delle interazioni registrate nel rivelatore ed una identificazione del sapore del neutrino interagente. Inoltre il confronto fra lo spettro dei neutrini raccolti nei tre diversi rivelatori lungo la linea di fascio permette di evidenziare in maniera chiara un segnale di oscillazione, riducendo

nettamente gli errori sistematici relativi alle sezioni d'urto di interazione dei neutrini e di quelli relativi alle incertezze sul flusso dei neutrini che attraversano i rivelatori.

Un ulteriore studio che verrà svolto nell'ambito dell'esperimento riguarda le misure di sezione d'urto di interazione dei neutrini: ciò sarà possibile grazie all'elevata statistica di eventi raccolti in particolare dal rivelatore *near* SBND. Per ampliare tale studio, ICARUS sarà anche esposto ad un secondo fascio di neutrini di più alta energia (NUMI) permettendo quindi misure di sezione d'urto per i neutrini dell'elettone nel range di energia $0 \div 3$ GeV.

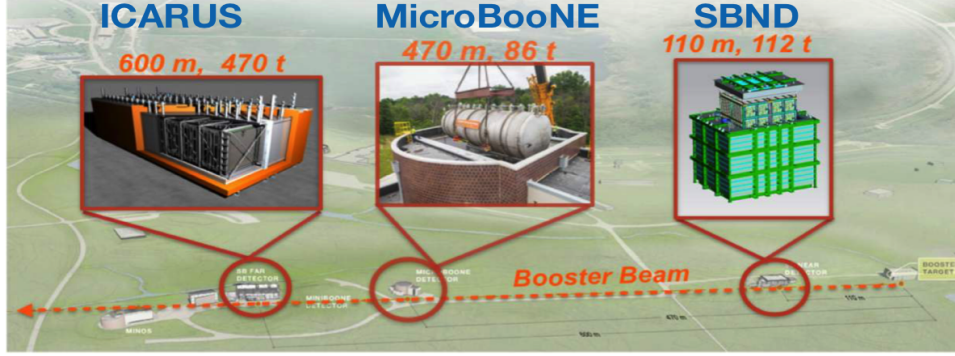


Figura 1.2: Schema del complesso dell'esperimento SBN

1.2.2 Descrizione del rivelatore T600

Il rivelatore ICARUS T600 ha il ruolo, nell'esperimento SBN, di *far detector*, trovandosi a circa 600 m dal punto di produzione dei neutrini. Il T600 è il primo rivelatore Liquid Argon Time Projection Chamber (LAr-TPC) di grande massa (476 tonnellate di Argon attivo) entrato in funzione.

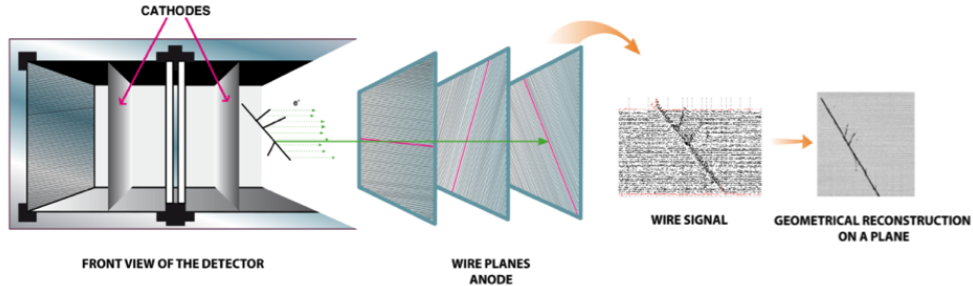


Figura 1.3: Schema del principio di funzionamento del rivelatore, fino a conversione del segnale in piano (w, t) .

Il principio di funzionamento di un rivelatore LAr-TPC si basa su due processi fondamentali: la ionizzazione e la scintillazione. Una particella carica che attraversa l'argon liquido produce una scia di elettroni di ionizzazione ($Ar \rightarrow Ar^+ + e^-$) e fotoni di scintillazione. L'Argon liquido è trasparente a questa luce, pertanto i fotoni si possono propagare nel rivelatore ed essere raccolti: nella TPC sono dunque posti dei fotomoltiplicatori (PMT) che captano questa luce e questo permette di avere un rivelatore *self-triggering*, ovvero che può autonomamente identificare e registrare il passaggio di particelle o gli eventi interessanti al suo interno (come appunto le interazioni di neutrino) [3] [4]. Inoltre, lo studio dell'intensità del segnale raccolto dai diversi PMT permette di localizzare spazialmente e temporalmente l'evento all'interno del rivelatore. La presenza di un campo elettrico uniforme, prodotto da una differenza di potenziale imposta fra catodo e anodo, permette di misurare gli elettroni di ionizzazione: questa carica si muove infatti lungo le linee di campo e viene "raccolta" sul piano anodico, che è composto da piani di fili opportunamente polarizzati e predisposti alla registrazione dei segnali elettronici. I primi piani, più interni, sono detti di induzione, e registrano i segnali indotti sui fili al passaggio degli elettroni in modo non distruttivo mentre il piano più esterno, detto invece di collezione, raccoglie gli elettroni. L'insieme dei segnali raccolti nei piani permette di ricostruire in 3D la traccia prodotta dalle particelle cariche che attraversano l'Argon [5]. I segnali fisici di carica registrati sui vari piani di fili e relativi allo stesso punto della traccia nel rivelatore avranno in comune

la variabile t_{deriva} : questa coordinata permette quindi di associare i segnali tra i diversi piani di fili, assicurando una ricostruzione 3D accurata (precisione dell'ordine del mm); inoltre, poiché il segnale sui fili è proporzionale al numero di elettroni di ionizzazione, è possibile anche stimare l'energia depositata nella TPC dalla particella ionizzante.

ICARUS T600 è composto da due criostati contenenti argon liquido mantenuto a circa 87 K, il quale funge da bersaglio per i neutrini; ciascuna unità è lunga 19.6 m, larga 3.9 m e alta 3.6 m, per un volume totale di circa 275 m³. Il volume attivo di rivelazione, sensibile ai segnali prodotti dalle particelle in Argon liquido, è invece più piccolo, 18 × 3.2 × 3.0 m, ~ 170 m³, per un volume attivo totale di Argon liquido nei due criostati di 476 tonnellate. Ogni criostato contiene due LAr-TPC identiche tra loro ma poste specularmente, con il catodo posto centralmente ed i piani anodici paralleli al catodo. Le altre facce che circondano il volume attivo sono delimitate da un sistema di elettrodi posti ad opportuni potenziali in modo tale da generare complessivamente, all'interno della TPC, un campo elettrico uniforme: in particolare nel T600 la differenza di potenziale applicata tra anodo e catodo è tale da generare un campo elettrico di deriva di 500 V/cm in direzione anodo-catodo. La distanza tra anodo e catodo è di circa 1.5 m, e poiché la velocità degli elettroni di deriva è circa ~ 1.6 mm/μm, il tempo massimo di deriva per gli elettroni risulta quindi circa 1 ms. Le impurità nell'Argon, in particolare la presenza di ossigeno, possono attenuare il segnale degli elettroni di deriva, impedendo una lettura efficace; per questa ragione l'argon viene continuamente purificato ed il livello di impurezze viene continuamente misurato per correggere l'effetto di attenuazione sul segnale raccolto.

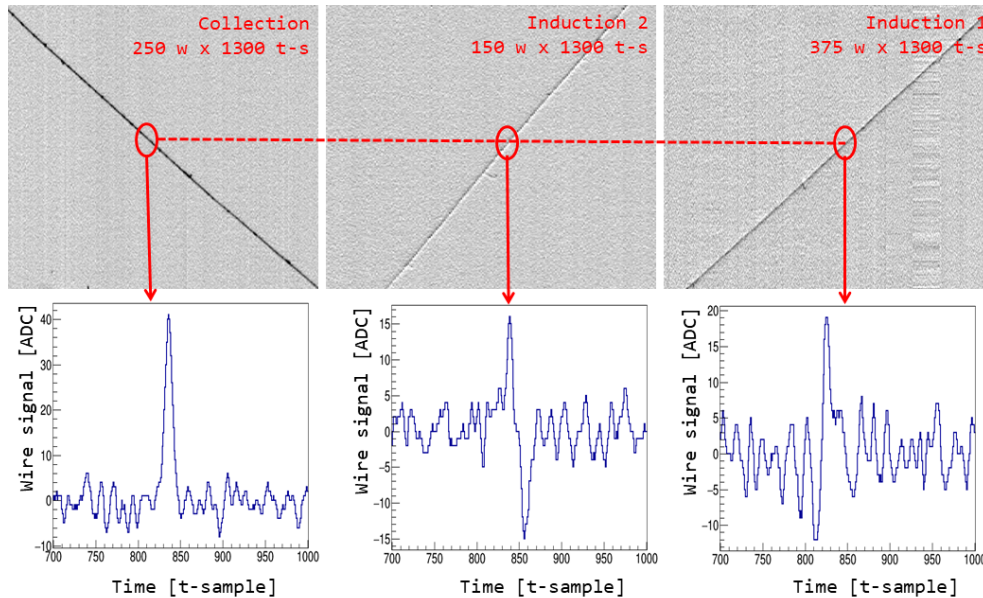


Figura 1.4: In alto immagini di una traccia di muone cosmico registrato in ICARUS T600 e rappresentato nei tre piani di fili. In basso i grafici del segnale registrato su un filo di ciascuno dei tre piani di fili. Da sinistra: Collezione, Induzione 2 ed Induzione 1. Si vede chiaramente la differente forma del segnale (in Collezione è unipolare mentre in Induzione è bipolare).

L'anodo di ciascuna TPC è costituito da tre piani di fili paralleli ad una distanza di 3 mm l'uno dall'altro: i fili del primo piano, detto Induzione 1, hanno direzione orizzontale, mentre i fili degli altri due piani, detti Induzione 2 e Collezione, sono inclinati di 60 gradi ed in versi opposti. I fili sono spazati fra loro di 3 mm. Essendo l'Induzione 1 il primo piano di fili, questo piano funge anche da schermo elettrostatico: questa condizione, unita al fatto che i fili di Induzione 1 siano più lunghi rispetto a quelli degli altri piani¹, rende il piano di Induzione 1 molto più rumoroso rispetto agli altri piani. In ciascuna TPC vi sono 5600 fili di Collezione, 5600 fili di Induzione 2 e 2112 fili di Induzione 1 per un totale, nel rivelatore ICARUS, di 53248 fili. Dietro questi fili vi sono dei fotomoltiplicatori (PMT) che rivelano i segnali di luce interni al T600; ve ne sono 90 in ciascuna TPC, per un totale di 360 tra le due unità [4]. L'elettronica di lettura necessaria per acquisire i segnali si trova all'esterno

¹Lunghezza dei fili di Induzione 1 circa 9 m, lunghezza massima dei fili di Collezione/Induzione 2 circa 3.8 m

del rivelatore e permette una lettura continua dei segnali raccolti sui fili. Ogni scheda registra i segnali provenienti da 2 gruppi di 32 fili che possono appartenere allo stesso piano di fili (ad esempio Induzione 1) oppure a piani di fili diversi (tipicamente un gruppo di 32 fili di Collezione ed uno di Induzione 2) [5]. Il segnale raccolto sui fili viene campionato ogni 400 ns (t -sample) e quando si ha un trigger vengono complessivamente registrati 4096 t -samples, che corrispondono quindi a circa 1.6 ms: dato che il tempo massimo di deriva tra catodo ed anodo è di 1 ms, in ogni evento vengono anche registrati dei campionamenti aggiuntivi attorno a questa finestra temporale (~ 0.3 ms pre-sampling e ~ 0.3 ms post-sampling). Una volta registrato, il segnale sui fili può quindi essere visualizzato, come mostrato in figura 1.4: in ciascuna immagine ogni pixel rappresenta l'intensità del segnale registrato sul filo ad un tempo di campionamento t . Nell'immagine la coordinata w cresce da sinistra a destra mentre la coordinata t cresce dall'alto al basso; il colore associato a ciascun pixel (in scala di grigi) rappresenta l'altezza del segnale raccolto sul filo.

1.2.3 Stato del T600 al Fermilab

Dopo una presa dati durata circa 3 anni (2010-2013) presso i laboratori nazionali del Gran Sasso [6] ed una fase di messa a nuovo presso il CERN, nel 2017 il T600 arriva al Fermilab e fra il 2018 e l'inizio del 2020 il rivelatore viene installato nell'edificio dedicato al *far detector*. Tra il febbraio e l'aprile dello stesso anno, il rivelatore viene riempito di Argon liquido ed ha iniziato a prendere dati, registrando prima solo segnali associati ai raggi cosmici, per studiare le performance del T600 e provare a migliorarne le prestazioni, e successivamente anche relativi ad interazioni di neutrini del Booster e del NUMI. Ad oggi, nonostante le difficoltà e le limitazioni dovute al COVID-19, il rivelatore è pronto per la presa dati ufficiale per lo studio delle oscillazioni di neutrini e la ricerca del neutrino sterile [7]. A differenza della precedente presa dati in un laboratorio sotterraneo, ICARUS al Fermilab prende dati sostanzialmente in superficie e quindi è costantemente attraversato da un intenso flusso di raggi cosmici. Per questa ragione in ogni evento registrato, oltre alla particella (neutrino o traccia dai raggi cosmici) che ha generato il trigger, verranno registrate alcune tracce (~ 10) di muoni cosmici passanti nel rivelatore ad un tempo diverso rispetto al trigger: si deve infatti tenere conto che, a causa della limitata velocità di deriva, il tempo necessario per registrare un evento è dell'ordine del millisecondo ed in questo intervallo di tempo altre tracce possono attraversare la TPC producendo elettroni di ionizzazione che verranno poi registrati sui fili. Per minimizzare il contributo dovuto ai raggi cosmici (in particolare muoni, neutroni e fotoni, i quali potrebbero generare cascate elettromagnetiche confondibili con segnali relativi a ν_e) sopra il rivelatore è posto uno strato di cemento² spesso circa 3 m, in grado di ridurre quasi completamente il flusso di neutroni e fotoni e di ridurre di circa il 30% il numero di muoni cosmici che riescono a raggiungere il volume attivo. Per identificare i restanti muoni cosmici, è stato inoltre installato un rivelatore addizionale detto Cosmic Ray Tagging System (CRT), il quale circonda l'intero T600; esso è composto da tre sottosistemi, ognuno dei quali ha due strati di scintillatori plastici [7]. Questo sistema, unito ai 360 fotomoltiplicatori (PMTs) da 8" presenti in ciascuna TPC [4], permettono di identificare i raggi cosmici entranti nel rivelatore, riducendo i fondi ad essi associati.

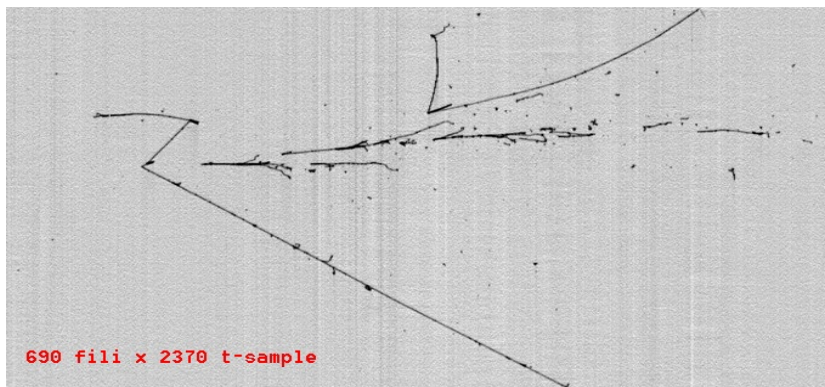


Figura 1.5: Esempio di interazione di neutrino registrata nel T600 sul piano di collezione.

²Al momento della raccolta degli eventi utilizzati in questa tesi, lo strato di cemento non era ancora in posizione

Capitolo 2

Analisi preliminari sulle tracce

Il rivelatore T600 ha iniziato nuovamente a registrare eventi nell'estate del 2020. I primi eventi registrati includevano tracce relative a raggi cosmici, in particolare muoni, e successivamente è iniziata anche la registrazione di eventi associati ai fasci di neutrini. Le tracce associate ai raggi cosmici possono essere utilizzate per valutare le performance del rivelatore, degli algoritmi di identificazione dei segnali fisici nei sotto-rivelatori del T600¹, della ricostruzione e della selezione degli eventi interessanti. In parallelo sono state preparate una serie di simulazioni Monte Carlo, le quali riproducono il passaggio dei raggi cosmici e le interazioni dei neutrini nelle TPC e gli eventi così prodotti possono essere elaborati analogamente agli eventi fisici realmente raccolti. Gli eventi Monte Carlo permettono quindi di sviluppare e migliorare gli algoritmi di ricostruzione; al tempo stesso il continuo confronto con i dati registrati dal rivelatore, ora disponibili, permette di identificare eventuali discrepanze e di rendere quanto più realistiche possibili le simulazioni Monte Carlo.

2.1 Ricostruzione delle tracce in ICARUS

Per ricostruire una traccia prodotta da una particella carica in Argon liquido, si possono innanzitutto utilizzare i segnali registrati dai fili delle TPC. I segnali fisici prodotti dalle particelle (detti *hits*) vengono identificati automaticamente su ciascun filo tenendo conto delle caratteristiche di ciascun piano di fili (Figura 1.4). Sui segnali identificati viene quindi applicato un processo detto *deconvoluzione*, che ha l'obiettivo di rimuovere gli effetti legati alla formatura del segnale introdotta dall'elettronica utilizzata ed ai campi elettrici presenti fra i piani di fili: questo processo permette di rendere la risposta ai segnali fisici nei tre piani di fili uniforme e di forma gaussiana, rimuovendo ad esempio la bipolarità nei segnali su Induzione 1 e 2. Sui segnali associati alle hits viene a questo punto eseguito un fit con una gaussiana. In particolare l'algoritmo di fit riesce a distinguere segnali singoli da segnali multipli: nel caso in cui un segnale risulti di durata temporale particolarmente lunga, la singola hit viene descritta come più segnali ravvicinati, che quindi devono essere registrati separatamente, e si associa a queste hits un parametro detto *molteplicità* ad indicare in quante hits è stato suddiviso il segnale sul filo. Ogni hit viene infine salvata come un punto di coordinate (w, t_{hit}) , con w il parametro identificativo del filo nel piano e nella TPC considerata e t_{hit} il tempo della hit in unità di campionamenti dell'elettronica t_{sample} ($1\ t_{sample} = 0.4\ \mu s$).

Una volta identificati i segnali sui singoli fili, l'algoritmo combina le informazioni presenti sui piani di fili diversi della stessa TPC. Se infatti una hit è associata ad un deposito di energia nel rivelatore, questo deve necessariamente aver prodotto segnali su tutti e tre i piani di fili: pertanto se l'algoritmo di ricostruzione identifica circa allo stesso t_{hit} tre hits su tre fili nei tre piani diversi, il programma collega i dati dei tre segnali e, se geometricamente compatibili, le hits vengono preservate e si dice essere associate ad un punto spaziale 3D. Le coordinate y (verticale) e z (longitudinale) sono ricavabili combinando le informazioni relative ai fili corrispondenti alle hits nei tre piani. Per la coordinata x il processo è più complesso: l'asse x è l'asse sul quale si muovono gli elettroni di ionizzazione sotto

¹Una misura dell'efficienza di identificazione dei segnali sui fili delle TPC verrà discussa nel Capitolo 3 di questa tesi.

l'azione del campo elettrico di deriva, per cui la coordinata x è strettamente correlata al tempo di deriva per raggiungere l'anodo, che risulta in genere diverso dal tempo in cui viene registrata la hit sul filo t_{hit} : poiché nel rivelatore possono passare anche tracce ad un tempo diverso rispetto all'istante del trigger, per poter calcolare correttamente la coordinata spaziale x è necessario conoscere anche questo tempo di passaggio t_0 , che purtroppo è spesso ignoto. Una notevole eccezione sono le tracce passanti per il catodo, per le quali invece è possibile ricavare il t_0 (sezione 2.1.1). Nel caso in cui il tempo di passaggio della traccia sia misurato, vale la relazione $t_{hit} = 850 + t_0 + \Delta t$ ove t_0 è il tempo d'entrata del muone nel rivelatore (convertito in unità t_{sample}), 850 indica il pre-campionamento e quindi rappresenta la posizione dell'anodo nel caso di una particella registrata al tempo del trigger (tempo di passaggio $t_0=0$) e Δt è il tempo di deriva degli elettroni di ionizzazione. Dal tempo t_{hit} è quindi possibile ottenere Δt e utilizzando la velocità di deriva v_{drift} si può estrarre la coordinata x . Una volta identificati i punti 3D associati a depositi di energia nel rivelatore, viene utilizzato un algoritmo di pattern-recognition detto *Pandora* [8]. Le hits vengono prima di tutto raggruppate in *clusters*, cioè dei gruppi di hits vicine tra loro e quindi associate a segnali prodotti dalla stessa particella che attraversa l'Argon. I clusters vengono infine collegati tra loro nei vari piani di fili, ricostruendo la traccia nella sua interezza. La ricostruzione finale ha una precisione dell'ordine del millimetro, il che è notevole considerando la dimensione del volume attivo del T600. *Pandora* permette inoltre di riconoscere se una traccia è associata ai raggi cosmici o ad una interazione di neutrino: in quest'ultimo caso, riesce anche a ricostruire il vertice d'interazione e a raccogliere insieme tutte le tracce e gli sciami elettromagnetici prodotti al vertice.

I segnali registrati sui fili permettono non solo di ricostruire spazialmente le tracce, ma anche di misurarne l'energia depositata: l'integrale del segnale associato alla hit è proporzionale alla carica raccolta sul filo che, a sua volta, è proporzionale all'energia depositata dalla particella in Argon. Pertanto la misura dell'area delle hit e del pitch (ovvero la lunghezza proiettata del segmento di traccia la cui carica viene raccolta sul filo) permettono di stimare anche il dE/dx lungo la traccia e questo può essere utilizzato per riconoscere quale particella ha attraversato il rivelatore (ad esempio studiando il dE/dx lungo la traccia si può distinguere chiaramente un muone da un protone).

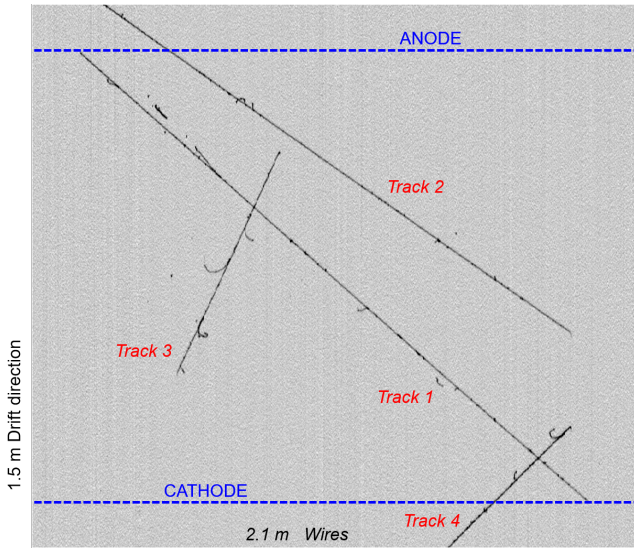


Figura 2.1: Esempio di segnali di muoni nel rivelatore T600, rappresentati sul piano (w, t_{hit}) . La traccia 1 è un esempio di traccia anodo-catodo e per questa traccia sono indicate le posizioni di catodo e anodo. Si possono inoltre notare i raggi δ prodotti al passaggio del mu in Argon, che permettono di identificare la direzione di moto del muone. Nell'immagine sono visibili anche altre tracce di muone passanti ad un tempo diverso rispetto alla traccia 1: ad esempio la traccia 2 ha attraversato il rivelatore ad un tempo antecedente rispetto alla traccia 1, mentre la traccia 4 ad un tempo successivo.

2.1.1 Tracce passanti per il catodo

Le tracce selezionate per le analisi descritte in questa tesi sono quelle passanti per il catodo centrale del criostato West (si veda un esempio in figura 2.1); questa loro proprietà permette di conoscere esattamente il loro tempo di passaggio t_0 . Questa informazione, come descritto nel paragrafo precedente, è infatti essenziale per poter calcolare correttamente la coordinata x : nel caso di una traccia passante per il catodo, per costruzione, la distanza percorsa dagli elettroni generati dalle hit vicine al catodo è nota $\Delta x \approx 1.5$ m, e dunque anche il tempo di deriva Δt ad esso corrispondente può essere stimato utilizzando la velocità di deriva ($\Delta t \approx 2360 t_{sample}$) o, come si descriverà in seguito, può essere

estratto direttamente dai dati (si veda sezione 2.2). È possibile dunque, conoscendo il tempo della hit t_{hit} associato al punto 3D in cui la traccia attraversa il catodo, ricavare il tempo di passaggio t_0 .

Per riconoscere una traccia passante per il catodo, l'algoritmo di ricostruzione parte dai dati raccolti nelle due TPC a destra e sinistra del catodo. L'algoritmo verifica se è possibile associare una traccia che si trova in una TPC con una delle tracce nella TPC adiacente: se viene identificata una traccia nella TPC adiacente che si raccorda nella direzione 3D e nelle coordinate y e z con la traccia considerata, le due tracce vengono unite in una sola traccia e le hits il cui segnale sul filo hanno il tempo t_{hit} più alto saranno le hits corrispondenti al passaggio al catodo (t_{catodo}), per cui ad esse sarà associata la coordinata x_{catodo} . Fissati questi punti, è quindi possibile definire le coordinate x anche per tutti gli altri punti della traccia. Inoltre sarà possibile stimare per questa traccia il tempo di passaggio t_0 utilizzando la relazione sopra menzionata $t_0 = t_{catodo} - 850 - 2360$ (in unità di t_{sample}).

Le informazioni relative alle tracce passanti per il catodo vengono salvate su dei file contenenti **tree** di ROOT dette *n-tuple di calibrazione*. Lo scopo di questi file è di poter utilizzare queste tracce per studi relativi alla calibrazione del rivelatore. Da questi files è possibile infatti accedere facilmente a tutte le informazioni relative alla geometria della traccia e su tutte le hits ad essa associate. In particolare, per l'analisi svolta in questa tesi sono stati utilizzati i seguenti parametri: **length**, ovvero la lunghezza della traccia; **start_x(y,z)** e **end_x(y,z)**, coordinate di inizio e fine della traccia; **dir_x(y,z)**, la direzione iniziale della traccia lungo un determinato asse; **t0**, il tempo, rispetto al trigger, in cui la particella passa nel rivelatore; inoltre per ciascuna hit era disponibile l'informazione relativa a dove la hit era stata identificata (criostato,TPC, piano di fili), il numero di filo colpito w e il tempo della hit t_{hit} , il pitch, ovvero la lunghezza in cm di un segnale sul singolo filo, e la molteplicità. L'algoritmo di ricostruzione permette anche di riconoscere le diverse tipologie di tracce e di salvare questa informazione in un parametro **selected**; in questa analisi fra le tracce passanti per il catodo sono state considerate tre tipologie di tracce: con tracce passanti (indicate con **selected=2**) indichiamo tracce di particelle che entrano ed escono dal T600; le tracce anodo-catodo (**selected=1**) sono tracce, come suggerisce appunto il nome, passanti per almeno uno dei due anodi e per il catodo centrale; con *stopping* (**selected=0**) indichiamo invece le tracce di muoni che, per l'appunto, si fermano nel rivelatore. La distinzione fra questi tre tipi di tracce permette di effettuare i *cross-check* necessari e di eseguire le analisi necessarie per calibrare il rivelatore.

2.2 Studio del t_0 e misura della velocità di deriva

Lo studio delle tracce passanti per il catodo permette di fare alcune considerazioni importanti sia sul tempo t_0 di entrata della particella, sia relativamente alla velocità di deriva degli elettroni di ionizzazione.

In primo luogo per ogni traccia identificata sono stati considerati i due segmenti di traccia contenuti in ciascuna TPC ed è stata identificata per ogni segmento la hit nel piano di fili di Collezione con il tempo t_{hit} minimo (t_{min}) e quella con tempo t_{hit} massimo, che corrisponde al punto della traccia sul catodo (t_{catodo}). Dato che il tempo t_{hit} è strettamente correlato al tempo di deriva e quindi alla distanza del punto della traccia dai fili ed essendo il punto caratterizzato da t_{min} un punto che si trova fra anodo e catodo, la distribuzione della differenza $\Delta t_{track} = t_{catodo} - t_{min}$ può variare fra 0 ed un valore massimo, che corrisponde al caso in cui il punto associato a t_{min} si trova esattamente sull'anodo. Questo valore massimo corrisponde quindi al tempo massimo di deriva per gli elettroni di ionizzazione prodotti al catodo, e nota la distanza anodo-catodo (≈ 1482 mm) è possibile da questo estrarre una misura della velocità di deriva. La distribuzione Δt_{track} per le tracce studiate è mostrata in Figura 2.2: come atteso, è presente un picco la cui larghezza è legata alla precisione con cui vengono identificate le hit. Per determinare il limite superiore del Δt si è studiato nel dettaglio questo picco, effettuando un fit con una funzione Crystal Ball:

$$f(x; \alpha, n, \bar{x}, \sigma) = N(\alpha) \cdot \begin{cases} \exp\left(-\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right), & \text{per } \frac{x-\bar{x}}{\sigma} > -\alpha \\ A(\alpha) \left(B(\alpha) \frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^{-n}, & \frac{x-\bar{x}}{\sigma} \leq -\alpha \end{cases}$$

Troviamo il picco della distribuzione a $2357.0 \pm 0.1 \text{ } t_{\text{sample}} \approx 943 \mu\text{s}$. Da questa stima è possibile quindi estrarre la velocità di deriva, che risulta essere pari a $v_{\text{drift}} = 1482 \text{ mm}/943 \mu\text{s} = 1.57 \text{ mm}/\mu\text{s}$. L'informazione ottenuta può anche essere utilizzata per riconoscere le tracce anodo-catodo, che il programma di ricostruzione indica con **selected=1**: infatti una traccia in una TPC con $\Delta t_{\text{track}} = t_{\text{catodo}} - t_{\text{min}} \approx 2357 \text{ } t_{\text{sample}}$ può essere classificata come passante anche per l'anodo.

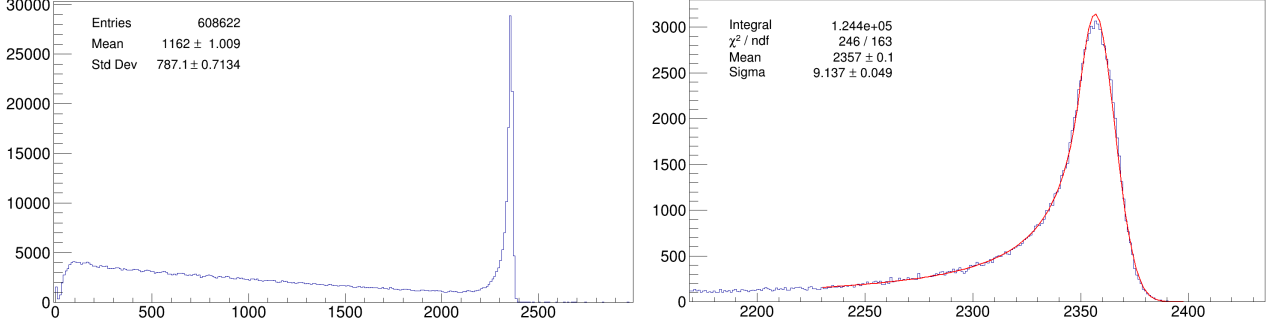


Figura 2.2: Sinistra: distribuzione del Δt . Destra: zoom e fit del picco.

Le tracce selezionate per l'analisi sono passanti per il catodo e ciò ha delle implicazioni anche sulla distribuzione del t_0 delle tracce che possiamo osservare nel rivelatore: come appena visto gli elettroni di ionizzazione impiegano circa 0.943 ms per percorrere la distanza catodo-anodo, più precisamente $2357 \text{ } t_{\text{sample}}$; inoltre il sistema di acquisizione che registra i segnali sui fili raccoglie complessivamente $4096 \text{ } t_{\text{sample}}$ per evento e ne riserva 850 per il *pre-sampling*, ovvero la registrazione di ciò che avviene prima del trigger nel rivelatore. Questo impone delle condizioni sui t_0 delle tracce passanti per il catodo che possono essere osservate: è possibile infatti osservare il punto di passaggio di una traccia per il catodo solamente se per la hit associata $0 < t_{\text{hit}} < 4096$, dove come descritto in precedenza $t_{\text{hit}} = 850 + t_0 + \Delta t$ e Δt vale $\approx 2357 \text{ } t_{\text{sample}}$. Pertanto deve valere la condizione $0 < 850 + t_0 + 2357 < 4096$ in t_{sample} : si ricava dunque che la distribuzione del t_0 dovrà essere contenuta nell'intervallo $[-1283, 356] \mu\text{s}$.

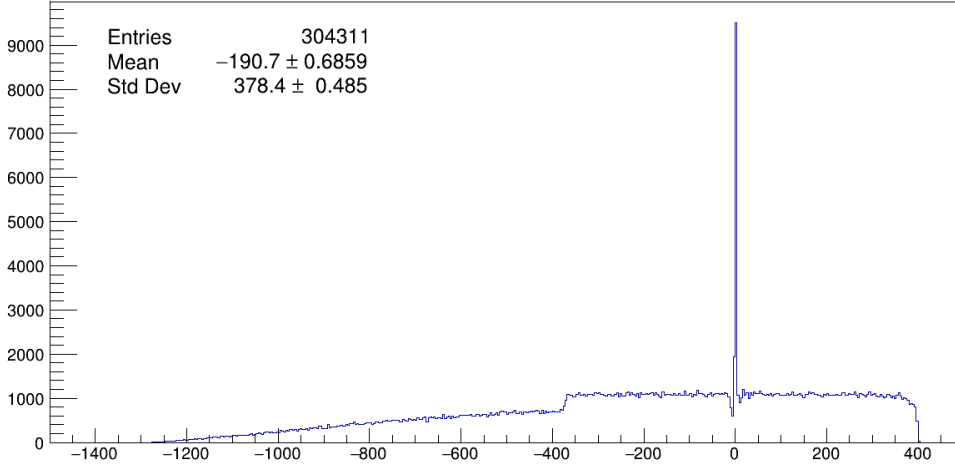


Figura 2.3: Distribuzione del t_0

La distribuzione dei tempi t_0 per le tracce studiate è mostrata in Figura 2.3. La distribuzione è caratterizzata da un picco molto pronunciato attorno a $t_0 = 0$, cioè corrispondente al tempo del trigger: questo picco è prodotto dal fatto che gli eventi studiati sono associati solo ai raggi cosmici e quindi la traccia che genera il trigger, attivando la registrazione di ciò che accade nel rivelatore, è un muone cosmico, che potrebbe passare per il catodo ed in tal caso sarebbe selezionata. Pertanto mentre le tracce fuori tempo rispetto al trigger sono distribuite nel tempo in modo uniforme, il tempo $t_0=0$ risulta un tempo preferenziale per il quale ci sarà una traccia in ogni evento e pertanto risulta mag-

giormente probabile trovare a questo tempo una traccia. Queste tracce non saranno utilizzate, poiché nella simulazione considerata non è stato simulato l'effetto del trigger e quindi tale picco non risultava replicato.

Si può inoltre osservare che la distribuzione non termina a $t_0 = 356 \mu s$ come teorizzato precedentemente ma si estende fino a $400 \mu s$: queste tracce con un t_0 così alto ($356 \div 400 \mu s$) sono tracce che attraversano il rivelatore troppo tardi rispetto al trigger e quindi il segmento di traccia relativo all'attraversamento del catodo non è registrato nei 4096 campionamenti dei fili delle TPC; nonostante ciò, l'algoritmo di ricostruzione riesce comunque a ricostruire la traccia passante, collegando il segnale da ambo le parti del catodo nonostante il *gap* risulti grande (fino a qualche centimetro).

Notiamo inoltre che la distribuzione non è costante, ma ha un andamento crescente fino a $t_0 \approx -350 \mu s$, per poi diventare costante. La ragione di questo andamento è sempre legato alla selezione di tracce passanti per il catodo: per $t_0 \in [-350, 350]$ le tracce vengono registrate per intero anche nel caso in cui siano anodo-catodo, poiché i segnali di tutta la traccia sono registrati entro i $4096 t_{sample}$. Per $t_0 < -350 \mu s$ invece i segnali troppo vicini all'anodo vanno persi dal rivelatore, perché sarebbero registrati ad un campionamento precedente al primo campionamento $t_{hit}=0$ registrato sul filo, il che può compromettere il riconoscimento della traccia, la quale appare, anche nel caso venga ricostruita, troncata. Questi effetti sono tanto più evidenti tanto più il muone passa in anticipo rispetto al trigger, da qui il profilo linearmente crescente della curva per $t_0 < -350 \mu s$.

2.3 Studio della lunghezza e della direzione delle tracce

Studiare la proprietà geometriche delle tracce è importante sia per controllare eventuali errori relativi alla ricostruzione spaziale, sia per ottimizzare la selezione delle tracce che possono essere utilizzate per gli studi di calibrazione della TPC. L'analisi descritta in questa sezione è incentrata principalmente su due parametri: l'angolo θ di ingresso del muone rispetto alla verticale, e la lunghezza l della traccia. Verranno in particolare confrontate queste quantità misurate su eventi registrati durante la fase di messa a punto del rivelatore al Fermilab con i risultati ottenuti su simulazioni MC. Per tenere conto delle particolarità riscontrate sul t_0 descritte precedentemente, nei successivi confronti col Monte Carlo verranno considerate solo tracce per le quali $|t_0| \in [30, 300] \mu s$: questo permetterà di studiare tracce completamente ricostruite e visibili nel rivelatore, in modo da avere un confronto tra dati reali e simulazioni MC quanto più simili possibile senza ridurre troppo la statistica dell'analisi.

È stata infine posta un'ultima condizione alle tracce studiate in questa sessione: tutte le tracce devono avere una lunghezza di almeno 50 cm; questa condizione permette di selezionare tracce con una stima della loro direzione più accurata e di scremare la maggior parte delle tracce non associate a muoni cosmici o mal ricostruite.

Le due statistiche sono leggermente diverse; considerando le condizione imposte, si avranno: 168 568 tracce da circa 125 000 eventi Monte Carlo, con dunque una media di 1.35 tracce per evento; 146 470 tracce da circa 115 000 eventi registrati nel T600, e una media di 1.27 tracce per evento. La differenza di statistica tra le due serie di dati risulta significativa ($\approx 6\%$); il motivo di tale differenza è ad oggi oggetto di studio, le due ipotesi ritenute più probabili sono un *rate* di raggi cosmici diverso tra simulazione e rivelatore reale, o una diversa efficienza nella identificazione e ricostruzione delle tracce tra eventi simulati ed eventi reali. La differenza è tale da non poter essere ignorata, pertanto nei prossimi grafici lo studio sarà fatto su distribuzioni normalizzate a 1 per permettere un confronto a parità di numero di tracce.

2.3.1 Lunghezza l

La lunghezza di ciascuna traccia è fornita dal programma di ricostruzione ed è ricavabile all'interno dei file ROOT tramite la variabile `length`. Confrontiamo le distribuzioni di l ottenute da Monte Carlo e dai dati reali per trovare eventuali discrepanze.

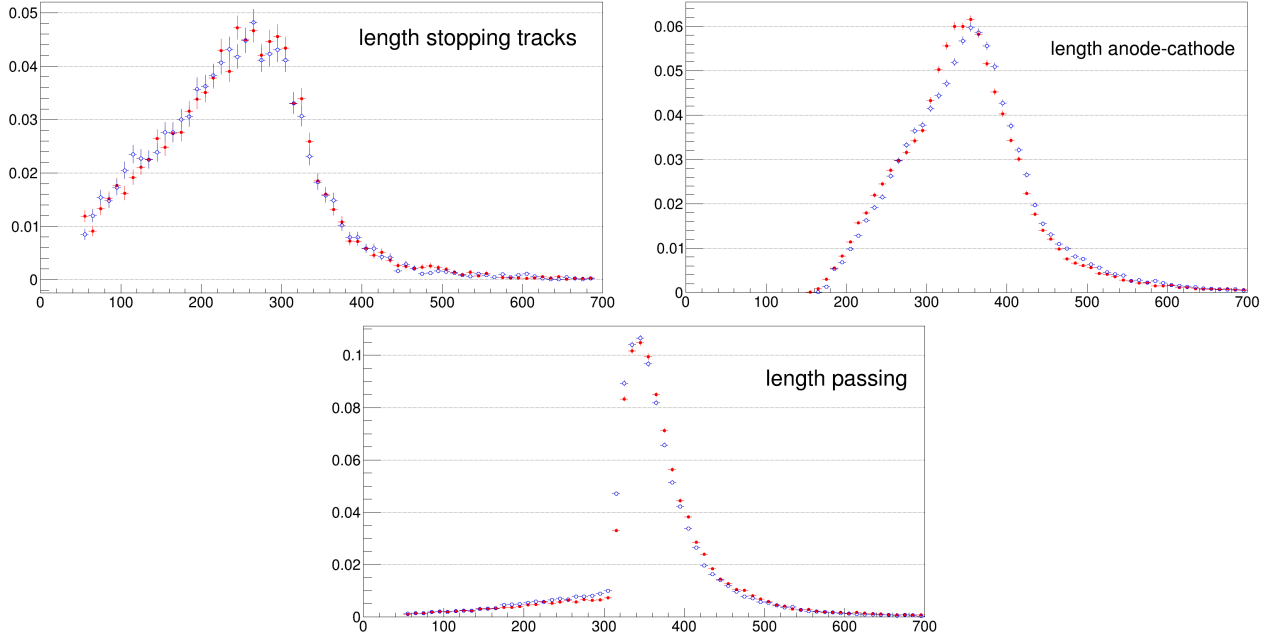


Figura 2.4: Distribuzioni normalizzate di l per le tracce passanti (in alto a sinistra), anodo-catodo (in alto a destra) e stoppanti (in basso a sinistra) e dati relativi alle tre distribuzioni. Gli istogrammi in blu vuoti si riferiscono ai dati fisici, quelli rossi pieni ai dati del Monte Carlo.

Nella tabella sotto sono riportati i dati relativi ai grafici:

	Dati	No. tracce (%)	trk/evt	l media (cm)	RMS
0	DATA	7921 (5.41%)	0.069	241 ± 1	94.29
	MC	9341 (5.54%)	0.075	243 ± 1	93.46
1	DATA	63969 (43.67%)	0.556	351.8 ± 0.3	79.8
	MC	80966 (48.03%)	0.648	345.8 ± 0.3	78.7
2	DATA	74580 (50.92%)	0.649	356.9 ± 0.3	76.3
	MC	78261 (46.43%)	0.626	361.6 ± 0.3	77.5

Le due statistiche sono leggermente diverse ma possono essere ugualmente confrontate guardando la ripartizione percentuale delle tracce.

2.3.2 Angolo θ

L'angolo θ di ingresso della particella è ricavabile dai dati salvati sulle n-tuple: nei files `tree` delle run i dati sulla direzione di ogni singola traccia sono salvati come una terna di valori `dir_x`, `dir_y` e `dir_z`, componenti di un vettore unitario 3D che denominiamo $\vec{d}$. Indicando con Y la componente verticale orientata verso il basso, si può calcolare l'angolo di incidenza rispetto alla verticale come $\theta = \cos^{-1}(Y)$. Ci aspettiamo che la quasi totalità delle tracce presenti un angolo compreso tra 0 e $\frac{\pi}{2}$, poiché la maggioranza dei muoni provengono dall'alto.

Di seguito il grafico delle distribuzioni di θ nelle due serie di dati e la relativa tabella dei dati:

	Totale			$\theta \in [0, \pi/2]$		
	N. tracce	Media (rad)	RMS	N. tracce	Media (rad)	RMS
MC	168 568	0.784 ± 0.001	0.3621	163 000	0.7400 ± 0.0007	0.272
DATA	146 470	0.729 ± 0.001	0.3568	142 600	0.6913 ± 0.0007	0.273

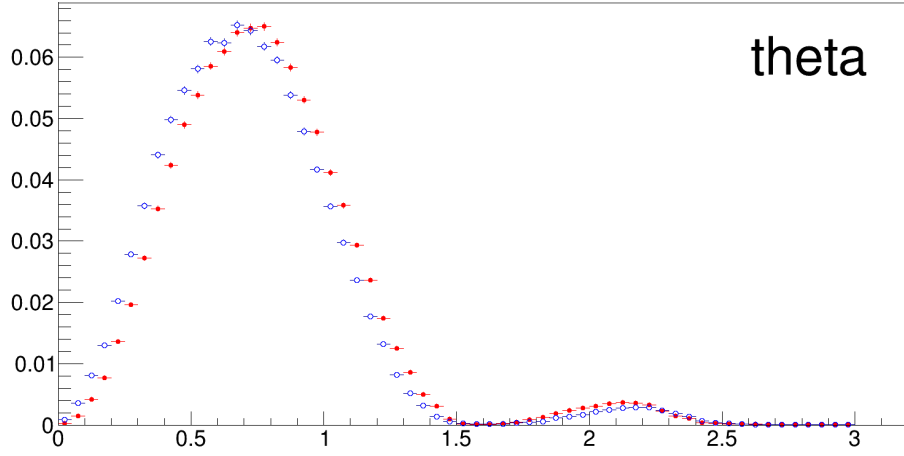


Figura 2.5: Distribuzione normalizzata di θ nei dati fisici (in blu vuoto) e nel Monte Carlo (in rosso pieno).

La distribuzione è circa quella attesa, sia nel Monte Carlo che nei dati fisici, ma le due serie di dati non sono congruenti: i dati della simulazione sono distribuiti verso valori più alti rispetto ai dati fisici con una differenza fra le due medie di $\sim 7\%$. Si nota inoltre che una parte delle tracce (circa il 2%) hanno angolo maggiore di $\frac{\pi}{2}$, ovvero sono particelle che viaggiano dal basso verso l'alto. Non ci aspettiamo una statistica così alta da questa popolazione, per cui analizziamo nel dettaglio queste tracce.

Distinguiamo innanzitutto le tracce in passanti, anodo-catodo e stoppanti:

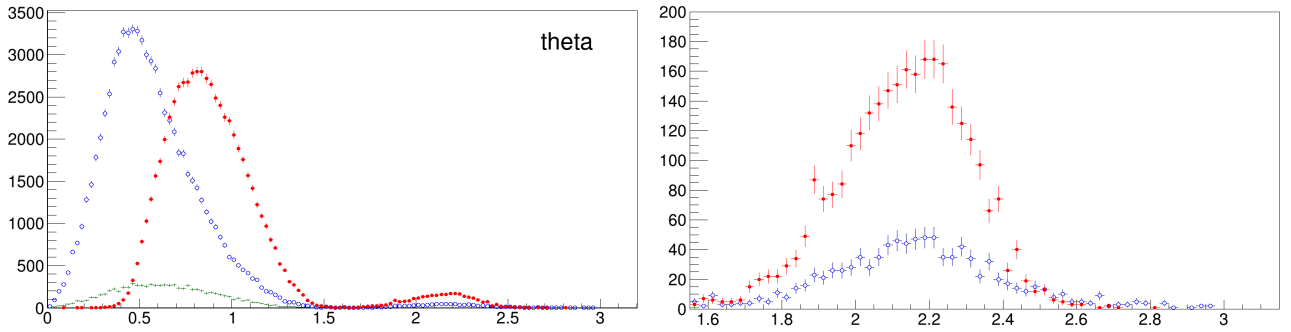


Figura 2.6: Distribuzioni di θ nei dati fisici per le tracce passanti (in blu vuoto), anodo-catodo (in rosso pieno) e stoppanti (in verde a croce). A destra, zoom su angoli nell'intervallo $[\pi/2, \pi]$ rad.

	Totale			$\theta \in [0, \pi/2]$			MC, $\theta \in [0, \pi/2]$	
	N. tracce	Media (rad)	RMS	N. tracce	Media (rad)	RMS	Media (rad)	RMS
0	7921	0.636(3)	0.268	7921	0.636(3)	0.268	0.678(3)	0.264
1	63 969	0.920(1)	0.3321	61 070	0.862(1)	0.204	0.908(1)	0.206
2	74 580	0.576(1)	0.3028	73 640	0.556(1)	0.243	0.582(1)	0.230

Dai grafici vediamo come la maggior parte delle tracce con $\theta > \frac{\pi}{2}$ siano anodo-catodo. Inoltre, da un rapido *cross-check* sulla direzione delle tracce, notiamo come la quasi totalità di quelle con $\theta > \frac{\pi}{2}$ ha $\text{dir}_z > 0$. Si nota infine come anche in questo caso le medie delle distribuzioni non siano tra loro compatibili.

2.3.3 Discussione sui risultati

Le informazioni sulla geometria delle tracce raccolte nelle sezioni precedenti possono essere utilizzate per un confronto diretto fra quanto viene registrato negli eventi e quanto simulato dal Monte Carlo. Si notano alcune chiare differenze: innanzitutto, il *rate* di tracce identificate per evento è diverso per Monte Carlo e per dati fisici (1.35 tracce/evento contro 1.27). Un minore *rate* nei dati fisici può indicare delle inefficienze nella rivelazione/ricostruzione che hanno come effetto una perdita di alcune delle tracce di muone: uno studio relativo all'efficienza di rivelazione dei segnali sui fili verrà pertanto

effettuato e descritto nel dettaglio nella Sezione 3.2.

Le differenze tra le due serie di dati sono anche di natura geometrica: le tracce *passanti* appaiono percentualmente meno numerose nel Monte Carlo (46.80% contro il 52.22% trovato dai dati fisici), mentre il numero delle tracce *anodo-catodo* appare maggiore (48.03% contro il 43.67% nelle tracce fisiche); le prime appaiono inoltre mediamente più corte nel Monte Carlo che nei dati fisici (351.8 cm contro i 345.8 cm nei dati fisici) e le seconde più lunghe (361.6 cm contro i 356.9 cm nei dati fisici); questa differenza nella lunghezza è sicuramente correlata alle differenze nella distribuzione angolare descritta nella sezione 2.3.2. Tutte queste differenze sono difficilmente correlabili alle sole inefficienze nella identificazione dei segnali fisici e nella ricostruzione delle tracce ed hanno probabilmente una seconda fonte: la teoria più plausibile è che la descrizione del rivelatore e dei materiali che lo circondano (criostato, edificio...) utilizzata nel Monte Carlo non è sufficientemente accurata nel riprodurre le strutture reali poste attorno alla TPC. Ci potrebbero in aggiunta essere delle differenze proprio nello spettro iniziale utilizzato per simulare i raggi cosmici che si propagano fino al rivelatore.

Si è inoltre visto, nella Sezione 2.3.2, che è presente una popolazione di tracce dirette verso l'alto: uno studio più dettagliato ha mostrato che la quasi totalità di queste tracce risulta avere direzione positiva lungo l'asse z e che per la maggior parte sono tracce *anodo-catodo*. Essendo gli eventi studiati associati ai raggi cosmici, queste tracce non sono realmente provenienti dal basso, ma vi è un errore nel programma di ricostruzione. Una teoria che potrebbe spiegare tale asimmetria è che l'algoritmo di ricostruzione delle tracce prediliga, per alcune topologie, associare alle tracce una direzione caratterizzata da un dir_z positivo, direzione lungo la quale si muovono i neutrini del fascio del Booster, e quindi preferenziale nella ricostruzione: imporre $\text{dir}_z > 0$ vorrebbe dire quindi scambiare il punto d'ingresso con il punto di uscita, ottenendo una traccia che, nella maggior parte dei casi, entra dal basso ed esce passando per l'anodo.

Un'analisi che qui manca è quella relativa allo spettro in energia associato a queste tracce. Si può tuttavia dedurre, con un certo margine di cautela, che vi sia un discreto accordo fra dati e Monte Carlo per le particelle entranti nel rivelatore: la percentuale di tracce *stopping* è infatti molto simile tra Monte Carlo e dati reali (5.54% contro 5.41%). Inoltre, la lunghezza media delle tracce *stopping* risulta in accordo (241 cm nei dati reali contro i 243 cm nel MC). Dato che queste tracce si fermano nel rivelatore, la lunghezza di traccia è strettamente correlata all'energia cinetica che le particelle hanno al loro ingresso nel rivelatore pertanto questo risultato ci dice che lo spettro in energia di queste tracce è circa simile nonostante il diverso *rate* con il quale arrivano. È dunque possibile usare queste tracce *stopping* per la calibrazione dei segnali della TPC e per stimare la conversione fra segnale raccolto ed energia depositata: il Monte Carlo è in effetti in fase di utilizzo per sviluppare la procedura di calibrazione poi applicata sui dati raccolti nel T600.

2.4 Heatmap delle tracce

Un altro studio che può fornire informazioni interessanti sullo stato del rivelatore è l'analisi della distribuzione spaziale delle tracce. Questa analisi sarà puramente di confronto qualitativo tra le simulazioni Monte Carlo e i dati reali per controllare l'accuratezza del modello usato nelle simulazioni. Al tempo stesso questo studio può fornire informazioni utili per comprendere eventuali problemi presenti nel rivelatore attualmente in funzione.

Sono state preparati per questa analisi degli istogrammi 2D, definiti "heatmap", ottenuti mappando le coordinate 3D x , y e z di tutti i punti di ogni traccia. Si può ottenere così un'immagine, lungo il piano xy o lungo il piano yz , che rappresenta la densità dei segnali in ogni punto del rivelatore.

Lo studio relativo alle heatmap per il piano xy mostra subito che la simulazione Monte Carlo non tiene conto di alcune strutture interne alle TPC; si possono notare infatti, nel grafico relativo ai dati reali, la striscia più scura centrale dove è posto il catodo, ed in particolare in questa zona centrale sono presenti delle zone di forma più o meno circolare (in alto, in basso ed al centro) dove vi è una netta riduzione delle tracce passanti. Ciò è dovuto alla presenza del catodo e dei supporti che percorrono il rivelatore lungo l'asse z per sostenere i pannelli che lo costituiscono: in questi supporti e nel catodo stesso ovviamente non si ha la produzione di elettroni di ionizzazione e quindi in questi punti 3D non possono essere presenti hits. In particolare il catodo risulta costituito da pannelli forati e per questa

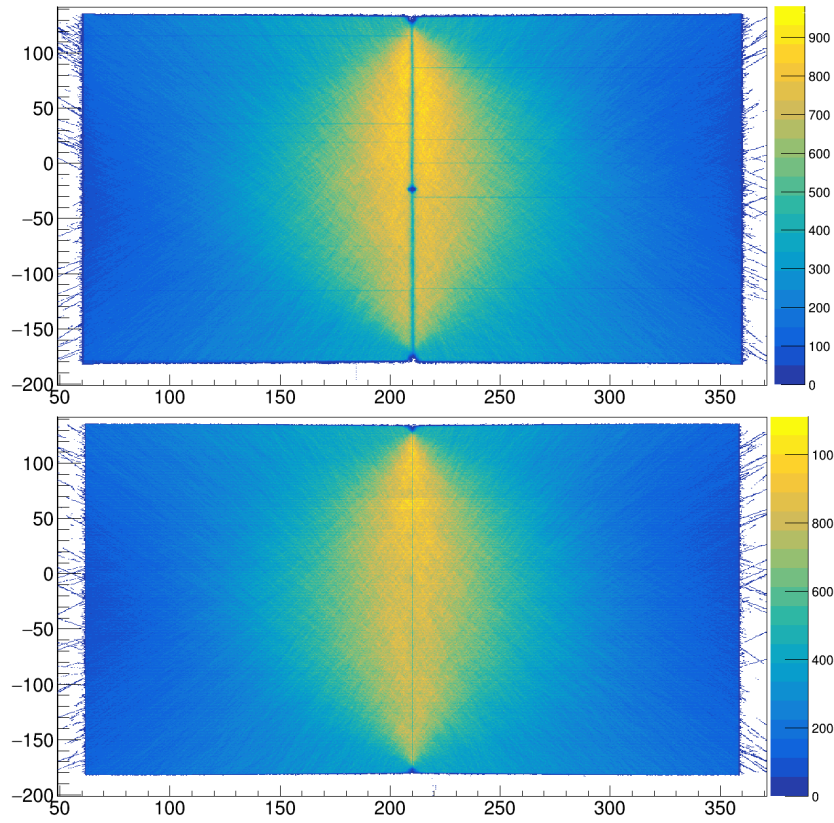


Figura 2.7: Heatmap delle tracce nel rivelatore (sinistra) e nel Monte Carlo (destra); sezione trasversale dell'unità criogenica su piano xy .

ragione, se la traccia attraversa il catodo dove sono presenti i fori, è possibile osservare dei segnali e questo spiega perché, in corrispondenza del catodo è comunque possibile vedere alcuni segnali. Il confronto con la heatmap equivalente per le simulazioni MC mostra che le strutture associate al catodo non sono state modellate in dettaglio e dovranno essere introdotti per migliorare la simulazione e avere un miglior confronto con i dati reali. In ambo le heatmap si possono inoltre notare alcune tracce ricostruite al di fuori dei limiti laterali effettivi del rivelatore; si tratta, con tutta probabilità, di tracce alle quali l'algoritmo di ricostruzione ha assegnato un t_0 sbagliato: un errore sul t_0 si ripercuote sulla ricostruzione della traccia, in particolare sulle coordinate x delle hits (la relazione tra t_0 e x è già stato visto nella sezione 2.1). Si tratta in ogni caso di una popolazione molto esigua di tracce ed ai fini dell'analisi in questa tesi questo problema risulta trascurabile.

Per investigare ulteriormente l'accuratezza delle strutture simulate nel Monte Carlo rispetto alle strutture reali del rivelatore, si è studiata una seconda coppia di heatmap, questa volta ottenuta studiando le coordinate y e z delle tracce, ottenendo così una sezione longitudinale della TPC.

Questo tipo di mappa permette di evidenziare in maniera immediata la presenza di schede elettroniche usate per la lettura dei segnali sui fili della TPC che non funzionano in modo proprio. È in particolare visibile una banda inclinata a circa 60 gradi a sinistra che corrisponde ad una scheda di collezione: se un gruppo di fili in uno dei piani non funziona in modo proprio, questo ha come effetto che per le tracce passanti e i cui segnali sarebbero raccolti da quei fili non è possibile ricostruire in modo opportuno i punti 3D lungo la traccia e per questa ragione la zona corrispondente viene messa in evidenza da questi plot. La presenza di queste schede difettose può avere un impatto nella ricostruzione delle tracce, producendo ad esempio tracce spezzate: questi plot risultano quindi utili per segnalare questi problemi e cercare di affrontare e risolvere questo eventuale mal funzionamento.

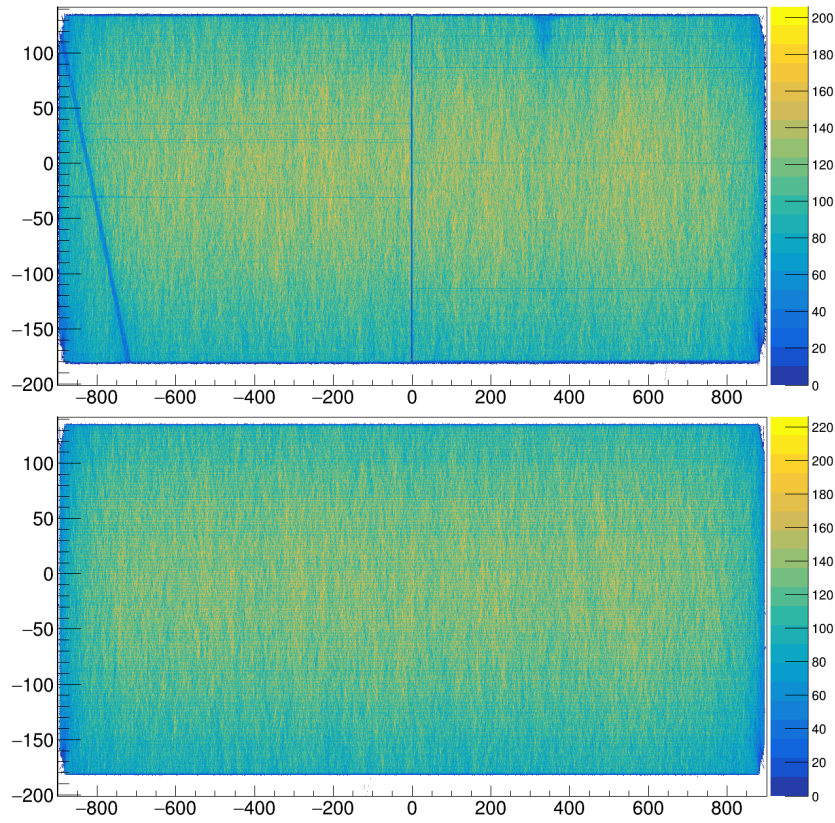


Figura 2.8: Heatmap delle tracce nel rivelatore (sinistra) e nel Monte Carlo (destra); sezione longitudinale lungo il piano yz .

Risulta inoltre evidente una linea centrale, corrispondente ad una zona in cui sono presenti meno hits, presente nei dati reali e non nel Monte Carlo: questa corrisponde alla struttura centrale che sorregge i fili di Induzione 1: questi fili orizzontali sono infatti divisi in due al centro del rivelatore, riducendone così la lunghezza. Dall'immagine risulta quindi che questo genera un effetto nella ricostruzione delle tracce: attorno a $z=0$ vediamo quindi meno segnali fisici e questo significa che tracce passanti in quella zona potrebbero essere meno accurate. È evidente che questa struttura non sia stata modellata opportunamente nel Monte Carlo. Anche questo effetto può in parte giustificare alcune delle differenze osservate nella ricostruzione delle tracce fra dati e MC. Ciò di cui invece è stato tenuto conto nella simulazione è la mancanza dei fili più corti negli angoli dell'anodo: proprio per la ridotta lunghezza si è preferito non instrumentare quelle piccole zone del rivelatore, e ciò ha come conseguenza un'assenza di segnali di tracce negli angoli del rivelatore. Si nota infine una zona di minor segnale nella regione di coordinate $y \in [100, 180]\text{cm}$, $z \in [200, 400]\text{cm}$ la cui origine è tuttora non spiegata.

Lo studio di queste mappe ha quindi messo in evidenza che la simulazione Monte Carlo richiede degli aggiustamenti e che queste differenze possono in parte giustificare alcune delle discrepanze osservate nella ricostruzione delle tracce. Inoltre queste mappe possono essere utilizzate come strumento utile per monitorare costantemente lo stato del rivelatore.

Capitolo 3

Stima di efficienza di identificazione delle hits

Con efficienza intendiamo la percentuale di segnali prodotti dalle particelle ionizzanti passanti nel volume attivo e registrati sui fili delle TPC che l'algoritmo utilizzato per la ricostruzione riconosce. Questo valore può variare in funzione di molti fattori: la presenza di canali dell'elettronica usati per la lettura dei segnali difettosi o rumorosi, così come la presenza di impurità elettronegative nell'argon, che riducono il segnale che può essere registrato sui fili, o errori di ricostruzione delle tracce. In questo capitolo studieremo nel dettaglio questo parametro, per cercare di fornirne una prima stima utilizzando le tracce passanti per il catodo.

3.1 Controllo sul funzionamento dei fili

Preliminarmente al calcolo dell'efficienza, ci assicuriamo che i fili sugli anodi funzionino a dovere. Come abbiamo già visto dalle heatmap, ci sono fili (o intere schede) con un minor numero di segnali fisici registrati; ciò può indicare un malfunzionamento dei canali dell'elettronica utilizzati per registrare i segnali sui fili che risultano meno sensibili. Un altro caso è un filo (o scheda) con troppi segnali registrati, che può indicare un eccessivo rumore elettronico o un problema legato al trattamento del segnale e alla rimozione del rumore di fondo; questi fenomeni abbassano quindi le performance del rivelatore, poiché possono compromettere la ricostruzione delle tracce. Un ulteriore controllo da effettuare è sulla molteplicità delle hits, per capire la densità di segnali sui fili.

Va inoltre specificato che il programma di ricostruzione suddivide ciascun criostato del T600 in quattro "TPC logiche", due per ciascuna "TPC fisica" a destra e a sinistra del catodo centrale: poiché i fili su Induzione 1 sono suddivisi a metà lunghezza ($z=0$) da un supporto, come visto studiando le "heatmap", per l'Induzione 1 saranno presenti 4 distinti gruppi di 1056 fili relativi a 4 zone distinte di rivelatore. Mentre la corrispondente suddivisione in quattro "TPC logiche" è stata ignorata per i piani di Collezione ed Induzione 2, è stata invece preservata ai fini dell'analisi per l'Induzione 1; le tracce utilizzate per questa analisi sono state poi studiate in base alla loro occupazione nella "TPC logica/fisica": avremo quindi 4 serie di dati da Induzione 1, 2 da Induzione 2 e 2 da Collezione. Essendo una mole significativa di dati, riporteremo dove possibile solo dei grafici esemplificativi relativi ad una delle TPC logiche/fisiche.

Per studiare nel dettaglio la distribuzione delle hits nei fili, è stato preparato, per ogni piano di fili, un istogramma in cui ad ogni filo viene corrisposto il numero totale di hits ricostruite nel campione di eventi studiato. Da un grafico simile siamo in grado di isolare fili con pochi o troppi segnali. Per questa analisi partiremo dal piano Induzione 1 che essendo il più interno ed essendo caratterizzato da fili molto lunghi risulta essere il piano più rumoroso.

Di seguito due grafici esemplificativi:

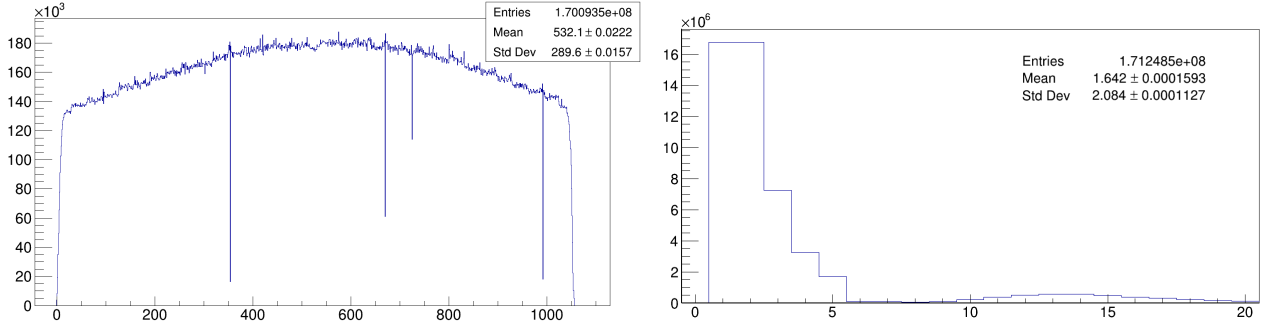


Figura 3.1: Istogrammi delle hit sui fili (sinistra) e della molteplicità delle hits (destra); Piano Induzione 1, TPC logica 0.

Vediamo subito dal grafico dei fili sui quali sono riportati molti meno segnali rispetto alla media: il malfunzionamento di questi fili potrebbe essere causato da problemi sui canali dell'elettronica di lettura o da problemi sul filo stesso, come ad esempio alla polarizzazione. La distribuzione ha circa la forma aspettata: i fili centrali sono a circa metà altezza del rivelatore, dove ci aspettiamo vi siano più tracce per via della condizione posta sul passaggio per il catodo e per la distribuzione angolare osservata. La distribuzione del parametro *molteplicità* presenta una popolazione ridotta di hits con valore che supera 5 mentre la maggior parte sono segnali su fili considerati come singola hits o al massimo sono suddivisi in due hits, come ad esempio nel caso siano presenti raggi delta lungo la traccia.

Di seguito riportiamo i dati relativi al piano Collezione:

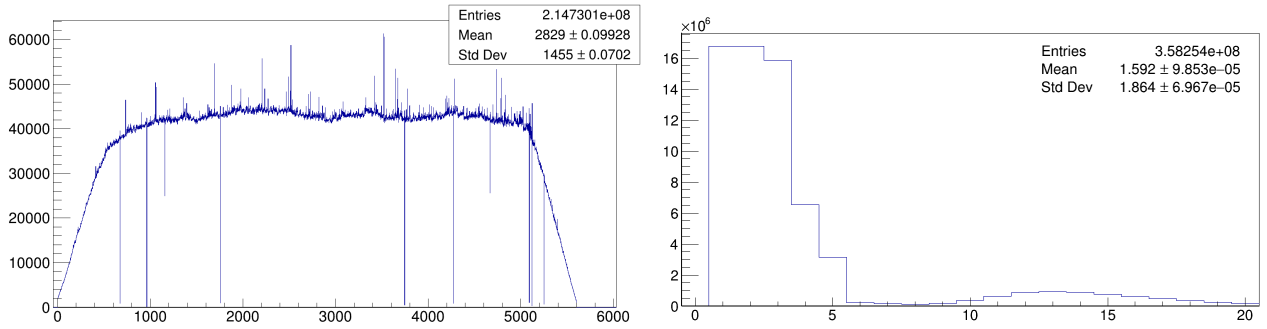


Figura 3.2: Istogrammi delle hit sui fili (sinistra) e della molteplicità delle hits (destra); Piano Collezione, TPC logica 0.

Come per Induzione 1, si notano fili con segnale molto ridotto, sui quali andrebbero fatti studi ulteriori per capire la natura del problema; anche le distribuzioni della molteplicità sono simili. La forma trapezoidale della distribuzione, diversa dalla precedente, è causata dalla geometria dei fili su questo piano: i fili sono posti obliquamente a 60 gradi rispetto alla normale, per cui i fili agli estremi saranno più corti e registreranno dunque meno hits. Si nota anche la presenza di fili su cui sono registrate un numero maggiore di hits: questo surplus di segnali è indice di un alto rumore di fondo o di un problema sul filo. Sono quindi necessarie ulteriori indagini per capire l'origine di tale problema.

Analizzando tutti e tre i piani di entrambe le TPC del criostato WEST (fili totali 26624), sono stati individuati in totale 115 canali che hanno registrato un numero ridotto di hits e pertanto non funzionanti, cioè circa lo 0.4% del totale. Di questi 115 canali, 32 appartengono tutti ad una singola scheda del piano Collezione per cui è probabile che si possa ovviare a questo difetto cambiando o riparando la scheda elettronica imputata, diminuendo il totale a 83 fili inaccurati, lo 0.3% dei fili totali. Si dovrà quindi tenere conto di questo valore durante l'analisi dell'efficienza delle hits. La presenza di una scheda difettosa può invece comportare una suddivisione in tracce in segmenti più corti, questi singoli canali saranno visti nell'analisi successiva come mancanza di efficienza. Infine è importante osservare che questo strumento può permettere un continuo monitoraggio dello stato del rivelatore.

3.2 Stima dell'efficienza

Passiamo ora alla stima dell'efficienza di identificazione delle hits. Per questa analisi abbiamo leggermente modificato le condizioni di selezione delle tracce da utilizzare: oltre la lunghezza minima, come fatto finora, abbiamo considerato per ciascuna traccia solamente il segmento contenuto nella TPC col maggior numero di fili colpiti e si è considerata la TPC logica nel caso del piano di Induzione 1 mentre per Induzione 2 e Collezione l'intera TPC fisica. Questo permette di studiare segmenti di tracce sufficientemente lunghe, migliorando la precisione nella stima dell'efficienza.

Sia N il numero totale di fili che la traccia occupa, ovvero il numero di fili tra il primo e l'ultimo con segnali relativi alla traccia, e sia n il numero di fili associati alla traccia che presentano un effettivo segnale registrato e riconosciuto come hit: il parametro efficienza per la traccia sarà dunque esprimibile come rapporto tra questi due valori $r = \frac{n}{N}$. Questo parametro è stato studiato in funzione di diverse proprietà della traccia e separando i vari piani di fili; in particolare, nella nostra analisi abbiamo notato una relazione forte con il *pitch* associato alle hits della traccia. Si definisce *pitch* la lunghezza del segmento di traccia visto da un filo. Una particella che attraversa l'argon liquido deposita energia nel rivelatore con un dE/dx che è descritto dalla formula di Bethe-Bloch; la carica prodotta per ionizzazione viene poi raccolta sui fili ed ogni filo raccoglie la carica prodotta da un segmento dx di traccia: tale segmento dx è il *pitch* associato al segnale fisico registrato sul filo. Il calcolo del *pitch* medio può avvenire in due modi: considerando la lunghezza totale in 3D della traccia e suddividendola per il numero N di fili; oppure calcolando la media dei *pitch* associati a ciascuna hit e forniti dal programma di ricostruzione. Per questa analisi abbiamo considerato questo secondo metodo. La figura 3.3 mostra il parametro efficienza medio sulle tracce considerate in funzione del *pitch* e suddiviso nei tre piani di fili. A *pitch* bassi ($pitch \in [0.3 \div 0.45]\text{cm}$) si nota una drastica diminuzione dell'efficienza, in particolare in induzione 2.

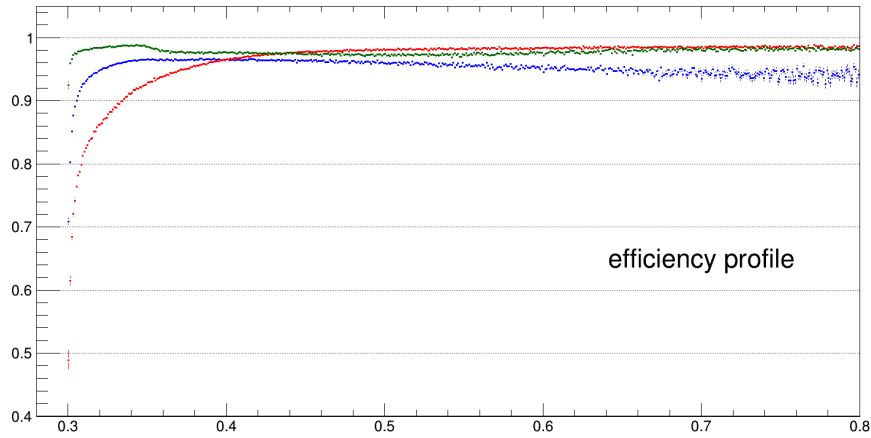


Figura 3.3: Efficienza r in funzione del *pitch* sul piano Induzione 1 (blu), Induzione 2 (rosso) e Collezione (verde).

I dati, calcolati su un totale di circa 730 000 tracce, sono riportati di seguito:

	Totale		<i>pitch</i> > 0.8cm		MC		<i>pitch</i> > 0.8cm	
	r medio	RMS	r medio	RMS	r medio	RMS	r medio	RMS
0	0.956	0.053	0.982	0.084	0.947	0.072	0.982	0.030
1	0.896	0.056	0.984	0.030	0.971	0.052	0.995	0.015
2	0.978	0.042	0.984	0.032	0.987	0.034	0.994	0.020

Per avere un informazione quanto più completa, riportiamo qui anche il grafico che rappresenta il numero medio N di fili associati alla traccia al variare del *pitch*.

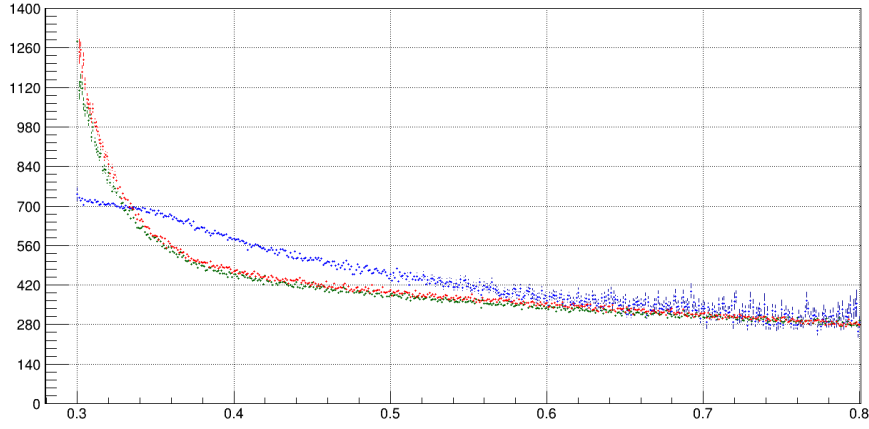


Figura 3.4: Numero medio di fili nei tre piani occupato dalle tracce in funzione del pitch: Induzione 1 (blu), Induzione 2 (rosso) e Collezione (verde).

Dai grafici appare evidente la diminuzione dell'efficienza al calare del pitch ed al tempo stesso il fatto che a pitch più corti le tracce occupano mediamente più fili. Il pitch medio delle traccia tende a diminuire quanto più il piano nel quale si muove la particella è parallelo al piano dei fili, e va al minimo (3 mm) per tracce parallele al piano di fili ma con direzione perpendicolare ai fili. Data la distribuzione caratteristica della lunghezza delle tracce che sono studiate, risulta chiaro che per una data lunghezza riducendo il pitch il numero di fili occupati deve necessariamente crescere, da qui l'andamento inversamente proporzionale tra i due valori. Il fatto che le tracce a pitch basso siano quelle che attraversano più fili implica che saranno anche quelle più affette dai fili non funzionanti ma questo non è sufficiente a spiegare l'intera diminuzione di efficienza. Va infatti notato che i segnali osservati sono prodotti dalla perdita di energia dE/dx della particella in Argon: su ogni filo viene infatti registrata una carica di ionizzazione dQ che è proporzionale al dE depositato lungo il segmento dx osservato dal filo, che altro non è che il pitch; per queste ragioni si può assumere che al crescere del pitch medio lungo la traccia anche il segnale di carica dQ registrato cresca: le tracce con pitch piccolo saranno quindi caratterizzate da segnali più piccoli quindi più difficili da rivelare e per questo complessivamente per esse ci aspettiamo una efficienza di identificazione delle hits minore.

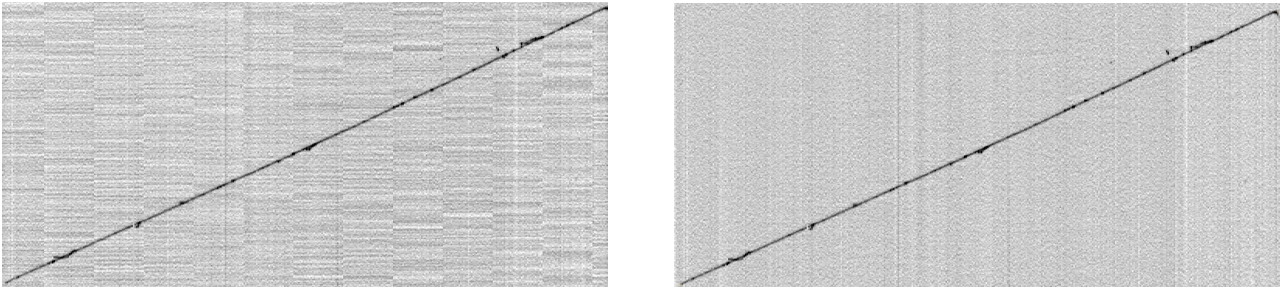


Figura 3.5: Esempio di rimozione del rumore da elettronica: a sinistra piano (w, t_{hit}) con segnale di rumore, a destra lo stesso dopo rimozione. Dati da piano Collezione.

Un ulteriore effetto tende a diminuire l'efficienza a pitch bassi: sui fili delle TPC, oltre ai segnali fisici, viene registrato il rumore di fondo, come mostrato anche nelle figure 1.4. Questo rumore presenta due componenti: un rumore intrinseco, presente in ciascun filo, ed un rumore correlato, legato al gruppo di fili che sono letti dalla stessa scheda [9]. Questo rumore correlato, se plottato su un piano (w, t_{hit}) , appare come una serie di bande orizzontali di diversa intensità e diverse da scheda a scheda; la sorgente di questo rumore correlato è tuttora in fase di studio ma proprio per la sua caratteristica correlazione su gruppi di 64 fili (canali registrati da una scheda) può essere rimosso a valle della registrazione dei segnali e prima di iniziare la ricostruzione dell'evento, come mostrato in Figura 3.5. Ciò può interferire con la ricostruzione delle tracce che nel piano di fili risultano parallele a queste bande di

rumore. Come già accennato prima, il pitch medio tende al minimo per tracce parallele al piano ma di direzione perpendicolare ai fili; queste tracce appaiono, nei piani (w, t_{hit}) , parallele al rumore coerente, e dunque segnali fisici più deboli potrebbero andare persi. Il motivo non è dunque la riduzione del pitch in sé, quanto le implicazioni geometriche che ciò ha sulla traccia.

L'impatto della rimozione del rumore coerente è stata anche osservata confrontando diverse tecniche di rimozione. Si è deciso inizialmente di rimuovere tale rumore su gruppi di 32 fili, considerando cioè metà dei canali associati ad una scheda. Lo studio sulle tracce ha mostrato che la rimozione a gruppi di 32 riduceva nettamente l'efficienza per i pitch tendenti al minimo. Si è deciso quindi di passare ad una stima del rumore di fondo su tutti e 64 i fili di una singola scheda: l'idea è che mediando i dati su 64 fili invece che su 32 sia possibile stimare il rumore in modo più preciso, permettendo di distinguere meglio i segnali fisici ed evitandone la rimozione. I grafici di seguito confrontano i risultati per i due metodi di rimozione del rumore coerente:

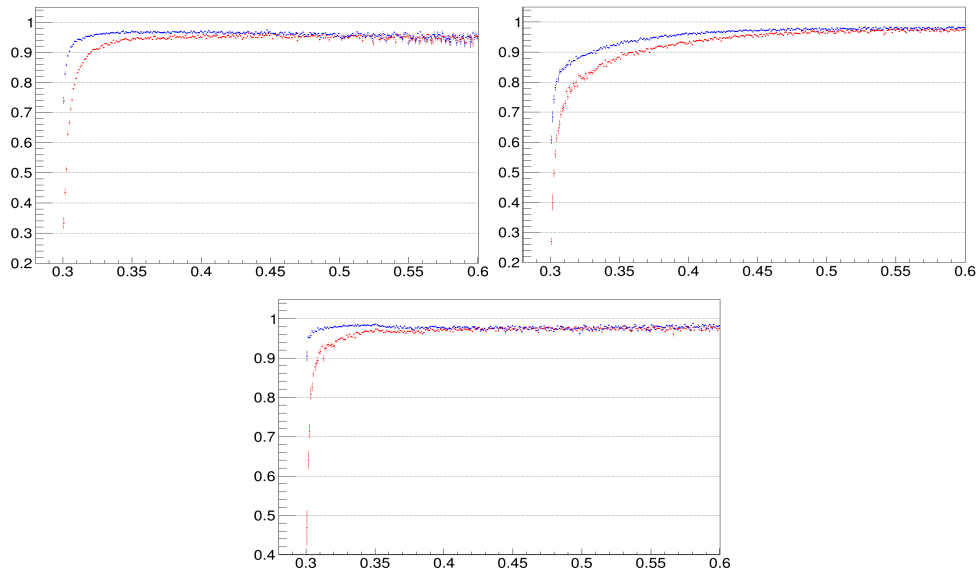


Figura 3.6: Efficienza r in funzione del pitch sul piano Induzione 1 (sinistra) e Collezione (destra): in rosso i dati con rimozione del rumore coerente a 32 fili, in blu rimozione a 64 fili.

Si vede chiaramente dai grafici quanto detto sopra: seppur non in modo perfetto, il calcolo del rumore di fondo a 64 fili migliora nettamente l'efficienza a pitch molto bassi; a pitch più alti ($pitch > 0.5$) la differenza risulta non apprezzabile con i dati a nostra disposizione.

Per avere un maggior controllo dei risultati ottenuti, un'analisi di efficienza è stata effettuata anche su eventi Monte Carlo: si vede come l'efficienza stimata tenda ad essere più alta di quella ricavata dai dati fisici, il che è probabilmente dovuto ad una simulazione non del tutto accurata del rumore elettronico nel Monte Carlo, leggermente più basso di quello del rivelatore. La simulazione, inoltre, non tiene conto di possibili fili o schede malfunzionanti o eccessivamente rumorose, come abbiamo già potuto vedere nella sezione 2.4.

Va fatta infine un'importante considerazione riguardo l'analisi svolta sull'efficienza. Questo studio è stato effettuato su tracce già riconosciute e ricostruite dall'algoritmo: non vengono quindi considerate in questa analisi tracce presenti nel rivelatore ma non ricostruite. La possibile presenza di queste ulteriori inefficienze tenderebbe ad abbassare l'efficienza stimata. Per tenere conto di ciò risulta però necessario uno studio più accurato, basato anche su un controllo visuale, per valutare quante tracce in effetti non sono identificate e valutarne le ragioni. Un'analisi aggiuntiva che andrebbe fatta è quindi una stima di r basata sui singoli segnali fisici raccolti dai fili indipendentemente dalle tracce già ricostruite. Per il momento ci limiteremo a dire che le nostre stime su r potrebbero essere sovrastimate ed indicheranno un limite superiore dell'efficienza di identificazione dei segnali fisici.

Conclusioni

In questa tesi abbiamo analizzato i dati registrati dal rivelatore ICARUS T600 e associati ai muoni cosmici e abbiamo confrontato i risultati ottenuti anche su simulazioni Monte Carlo. Questo lavoro fornisce informazioni utili per valutare lo stato del rivelatore, le proprietà degli eventi registrati e l'efficienza di rivelazione dei segnali fisici sui fili delle TPC. Inoltre questo lavoro ha permesso di mettere in evidenza eventuali discrepanze tra la simulazione sviluppata e la realtà del T600. Le informazioni fornite da questo studio, seppur in alcuni casi solo qualitative, risultano importanti perché forniscono dei feedback che permetteranno di migliorare la ricostruzione spaziale delle tracce, come ad esempio l'osservazione di tracce con direzione invertita, l'identificazione di zone con minore efficienza e l'identificazione di tracce spezzate. Gli strumenti sviluppati e le distribuzioni ottenute potranno essere utilizzate anche nel corso di tutta la presa dati del T600 come metodo di monitoraggio per verificare la stabilità del sistema ed evidenziare l'impatto di eventuali migliorie nel programma di ricostruzione.

Nella prima parte dell'analisi ci siamo concentrati sulle caratteristiche geometriche delle tracce muoniche: dopo uno studio preliminare sul t_0 e sul Δt , che ha fornito anche una stima della velocità di deriva degli elettroni in Argon liquido, abbiamo studiato nel dettaglio la lunghezza media, l'angolo d'ingresso e la distribuzione spaziale delle tracce. Da questa analisi abbiamo appurato che ci sono alcuni dettagli della simulazione Monte Carlo, in particolare per quanto riguarda la geometria del rivelatore, da correggere per ottenere un modello più accurato da confrontare con i dati fisici. Abbiamo inoltre visto, studiano l'angolo e la direzione delle tracce, che c'è un possibile errore di ricostruzione che implica un'inversione della direzione della traccia, probabilmente dovuto a delle preferenze intrinseche dell'algoritmo di ricostruzione legate alla natura delle tracce di neutrino. Sono dunque necessarie ulteriori analisi sull'accuratezza delle ricostruzioni.

Nella seconda parte abbiamo invece studiato il segnale depositato sui fili per controllarne il funzionamento e stimare l'efficienza di identificazione dei segnali registrati. In prima battuta ci siamo concentrati sul funzionamento corretto dei fili, studiandone il comportamento e stimando la percentuale di fili che non funzionano in modo proprio in quanto registrano un numero esiguo di segnali, che risulta di circa 0.3-0.4 %. Per lo studio dell'efficienza ci siamo invece concentrati sulla relazione che essa ha col pitch medio della traccia: come abbiamo visto, l'efficienza di identificazione delle hits risulta elevata, in molti casi sopra il 95% ma tende a diminuire con il diminuire del pitch associato alla hit, a causa in particolare della ridotta altezza del segnale, della probabilità più alta di incontrare fili difettosi e a causa del processo di rimozione del rumore coerente. Va però ribadito che la stima su r potrebbe essere sovrastimata, poiché è stata fatta con tracce già ricostruite e non tiene conto di possibili casi in cui l'algoritmo di ricostruzione fallisce. Si segnala quindi l'importanza di ulteriori studi che valutino l'efficienza a partire direttamente dai segnali registrati sui fili, senza passare attraverso la ricostruzione delle tracce. Lo studio effettuato in questa tesi risulta infine fondamentale per valutare la capacità di identificare i segnali fisici al variare delle condizioni del rivelatore e degli strumenti e parametri utilizzati dall'algoritmo di ricostruzione, come dimostrato nel caso del differente approccio per la rimozione del rumore coerente.

Bibliografia

- [1] A. Aguillar et al. (LSND Collaboration), 2001, *Evidence for neutrino oscillations from the observation of ν_e appearance in a ν_μ beam*, Phys. Rev. D 64, 2001, 112007
- [2] R. Acciarri et al., 2015, *A Proposal for a Three Detector Short-Baseline Neutrino Oscillation Program in the Fermilab Booster Neutrino Beam*, arXiv:1503.01520 (2015)
- [3] C. Rubbia, 1977, *The Liquid Argon Time Projection Chamber: A New Concept for Neutrino Detectors*, (CERN- EP/77-08)
- [4] B. Ali-Mohammadzadeh et al., 2020, *Design and implementation of the new scintillation light detection system of ICARUS T600*, JINST 2020, 15, T10007
- [5] L. Bagby et al., 2018, *New read-out electronics for ICARUS-T600 liquid Argon TPC. Description, simulation and tests of the new front-end and ADC system*, JINST 2018, 13, P12007
- [6] C. Rubbia et al. (ICARUS Collaboration), 2011, *Underground operation of the ICARUS T600 LAr-TPC: first results*, (JINST 2011, 6, P07011)
- [7] C. Farnese et al. (ICARUS Collaboration), 2021, *Short-Baseline Neutrino oscillation searches with the ICARUS detector*, J Phys.: Conf. Ser. 2156 012141
- [8] R. Acciarri et al. (MicroBooNE Collaboration), 2017, *The Pandora multi-algorithm approach to automated pattern recognition of cosmic-ray muon and neutrino events in the MicroBooNE detector*, arXiv:1708.03135
- [9] L. Bagby et al., 2021, *Overhaul and installation of the ICARUS-T600 liquid argon TPC electronics for the FNAL Short Baseline Neutrino program*, JINST 2021, 16(1), P10307

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto il mio relatore, il Dott. Christian Farnese, senza il quale questa tesi non sarebbe stata possibile.

Ringrazio i miei genitori, mia sorella Bianca, i miei nonni e i miei zii per avermi sempre sostenuto e motivato durante questo percorso.

Ringrazio i miei compagni di università, Claudio, Lorenzo, Pietro R. e Pietro S., per avermi accompagnato nel percorso universitario e soprattutto per essere stati i miei insostituibili compagni di laboratorio.

Ringrazio le mie coinquiline, Ilaria, Carlotta, Emma e Alice, senza le quali la mia permanenza a Padova non sarebbe stata altrettanto colorata e movimentata.

Ringrazio i miei amici, Lisa, Giuseppe, Chiara, Leyla ed Elia, che ciascuno a modo suo mi ha spronato a continuare e mi ha sostenuto sia nello studio che nelle mie passioni.

Ringrazio, infine, F. Manzali, autore della maggior parte degli appunti sui quali ho studiato questi anni.