

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

CORSO DI LAUREA IN FISICA

TESI DI LAUREA

**Test sulla nuova elettronica del  
rivelatore Icarus T600, finalizzata  
all'esperimento Short Baseline  
Neutrino (SBN) al FermiLab**

*Relatore:*

Dr. Christian Farnese

*Laureando:*

Marco Bottene

ANNO ACCADEMICO 2017-2018



# Indice

1	Introduzione . . . . .	5
1.1	Il rivelatore ICARUS T600 . . . . .	5
1.2	Performance del rivelatore a LNGS . . . . .	7
1.3	Ricerche di ICARUS T600 a LNGS . . . . .	7
2	Il programma <i>Short Baseline Neutrino</i> (SBN) a FNAL . . . . .	9
2.1	Un nuovo programma di fisica al Fermilab . . . . .	9
2.2	Aggiornamento del T600 al CERN e installazione al Fermilab . . . . .	10
3	Nuova elettronica di lettura di ICARUS T600 . . . . .	11
4	Introduzione all'attività di tesi . . . . .	12
4.1	Struttura dei test e segnali . . . . .	13
5	Analisi degli RMS . . . . .	14
5.1	Fase di sviluppo . . . . .	14
5.2	Fase di analisi . . . . .	15
5.3	Esposizione dei risultati dell'analisi degli <i>RMS</i> . . . . .	19
6	Analisi dei TP . . . . .	20
6.1	Fase di sviluppo . . . . .	20
6.2	Fase di analisi . . . . .	22
6.3	Esposizione dei risultati dell'analisi dei TP . . . . .	25
6.4	<i>Matching</i> fra i risultati delle due analisi . . . . .	26
7	Conclusioni . . . . .	27



# 1 Introduzione

## 1.1 Il rivelatore ICARUS T600

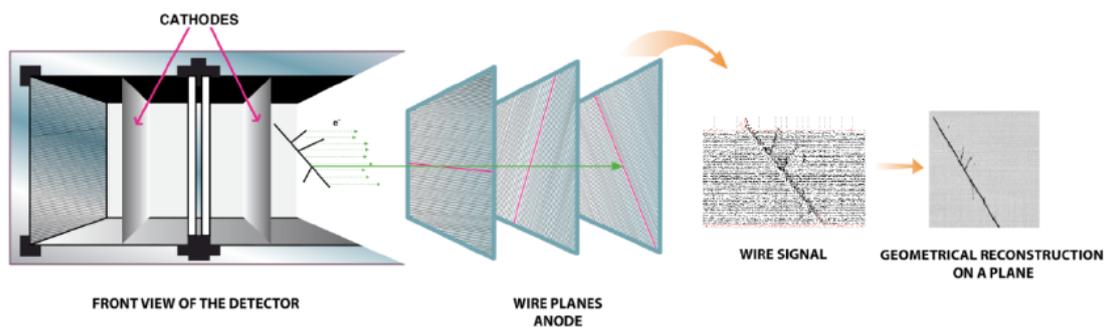
Una tecnica particolarmente semplice per poter rivelare il passaggio di una particella carica all'interno di un fluido dielettrico si basa sull'utilizzo di una coppia di elettrodi posti a potenziale diverso. Il campo elettrico così generato mette in moto verso gli elettrodi di polarità opposta gli elettroni e gli ioni positivi prodotti dalla ionizzazione. Il movimento delle cariche genera sugli elettrodi un segnale che può essere misurato. La scelta dell'Argon Liquido (LAr) come dielettrico per la rivelazione di tracce ionizzanti è dettata in particolare dalla elevata mobilità degli elettroni in questo mezzo e dal fatto che, essendo abbondante in natura, si presta a realizzare rivelatori di grande massa a costi contenuti. La tecnologia LAr-TPC (*Liquid-Argon Time Projection Chamber*), che mette in atto il meccanismo sopra esposto, fu proposta per la prima volta nel 1977 da Carlo Rubbia (Nobel 1984) [1]. Una LAr-TPC è a tutti gli effetti una "camera a bolle elettronica", un rivelatore *self-triggering* in grado di acquisire eventi in modo continuo e fornire dettagliate ricostruzioni 3D degli eventi ionizzanti e precise misure calorimetriche.

ICARUS T600 è un grande rivelatore LAr-TPC (476 ton di massa attiva) entrato in funzione per tre anni (2010-2013) nella *Hall B* (Figura 1) dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (INFN). Il T600 consiste in un grande criostato diviso in due moduli identici adiacenti, nel complesso riempiti con 760 ton di argon liquido mantenuto alla temperatura di 89K da opportuni sistemi di criogenia. Ogni modulo ospita due TPC composte da tre piani di fili paralleli (passo: 3mm, sia fra i piani che fra i fili di un piano), il primo composto da fili orizzontali, gli altri due da fili posti a  $\pm 60^\circ$  rispetto all'orizzontale (Figura 2). Grazie ad appropriate tensioni impostate per il catodo e per l'anodo, i due piani di fili che si affacciano alla regione di deriva (Induzione 1 e 2) registrano i segnali indotti dalle cariche che non vengono però raccolte, cosa che invece accade nell'ultimo piano (Collezione). In ogni modulo le due TPC sono separate da un catodo comune e la massima lunghezza di deriva è di  $\sim 1.5\text{m}$  (distanza massima fra catodo e piani di fili), a cui corrisponde un massimo tempo di deriva di  $\sim 1\text{ms}$  (velocità di deriva degli elettroni  $\sim 1.6\text{mm}/\mu\text{s}$  in presenza di un campo elettrico uniforme di  $500\text{ V/cm}$ ).

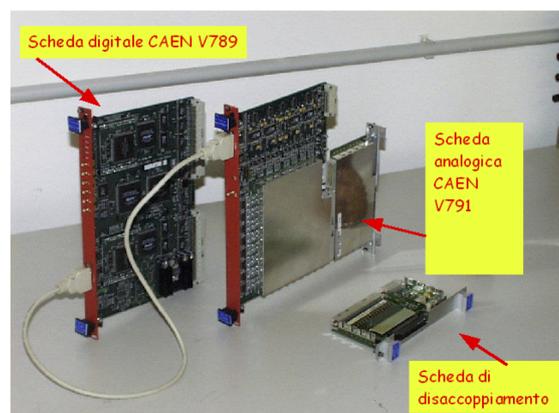
La catena elettronica (Figura 3) utilizzata per acquisire i segnali sui fili di ICARUS è posta all'esterno del rivelatore ed è ottimizzata per permettere una lettura continua dei segnali raccolti sui fili. Per ciascun gruppo di 32 fili è presente prima di tutto una scheda di disaccoppiamento, che riceve 32 segnali analogici dai fili della TPC e li disaccoppia dall'alta tensione per mezzo di un condensatore da  $4.7\text{ nF}$ . Il segnale raccolto viene quindi processato dalla scheda analogica CAEN V791 che ospita 32 preamplificatori e gestisce la conversione dei dati mediante flash ADC a 10 bit (campionamento del segnale ogni  $400\text{ ns}$ ). In particolare sono state utilizzate due distinte versioni della scheda V791: la CAEN-V791C, per i segnali di Collezione, produce in uscita segnali la cui ampiezza è proporzionale alla corrente sui fili, essendo la costante di tempo di feedback dell'amplificatore ( $3\ \mu\text{s}$ ) piccola rispetto alla durata tipica del segnale sui fili mentre la CAEN-V791Q, utilizzata per i segnali di Induzione, produce in uscita segnali la cui ampiezza è proporzionale alla carica indotta sui fili, essendo la costante di tempo di feedback dell'amplificatore ( $100\ \mu\text{s}$ ) grande rispetto alla durata tipica del segnale sui fili. Infine i segnali giungono alla scheda digitale, CAEN V789, la quale gestisce la compressione dei dati e ospita i buffers di memoria ed i chip Super-DAEDALUS sui quali è implementato un algoritmo di identificazione dei segnali di tracce passanti basato direttamente sul segnale registrato dai fili e che può quindi essere utilizzato per il sistema di trigger [2].



**Figura 1:** ICARUS T600 ai LNGS: si possono vedere i due moduli del rivelatore (tratteggio bianco) e la zona dove sono montate le componenti dell'elettronica di acquisizione (tratteggio rosso).



**Figura 2:** Principio di funzionamento di una LAr-TPC e prospetto trasversale dei moduli interni di ICARUS T600.



**Figura 3:** Immagine delle tre schede che costituiscono l'elemento base della catena di acquisizione di ICARUS utilizzata durante la presa dati al Gran Sasso.

Dietro ai piani di fili sono posti dei PMT atti a captare la luce di scintillazione generata dalle particelle che interagiscono con il LAr ed il segnale registrato risulta essere la base per il sistema di *trigger*. Più specificatamente, quando le particelle cariche attraversano l'argon generano, oltre agli elettroni di ionizzazione, anche luce di scintillazione per diseccitazione delle molecole dell'argon stesso o per ricombinazione degli elettroni con gli ioni precedentemente generati. La luce di scintillazione all'interno del LAr ha una lunghezza d'onda di 128nm ed è composta da una componente veloce, emessa in  $\sim 6\text{ns}$ , e da una componente lenta emessa in  $\sim 1.6\mu\text{s}$ . La luce di scintillazione verrà poi convertita tramite un *wavelength-shifter* posto sulla calotta dei PMT per ottenere una luce ad una lunghezza d'onda tale da poter essere registrata dai fototubi. Il *set-up* sperimentale per i PMT utilizzato al Gran Sasso consisteva in un totale di 74 PMT.

Una delle difficoltà principali di questo sistema è rendere l'argon abbastanza puro: infatti la presenza di impurezze elettronegative, specialmente  $O_2$ , tende a catturare parte del segnale che dovrebbe essere raccolto sui fili e, se il livello di tali impurezze risulta eccessivo, il segnale può ridursi al punto da essere indistinguibile dal rumore dell'elettronica. La purezza del LAr viene pertanto costantemente monitorata e l'Argon liquido è sottoposto di continuo a sofisticati metodi di filtraggio e ricircolo che portano ad avere livelli di impurezze  $< 50\text{ppt}$  e corrispondenti ad un'attenuazione massima del segnale osservabile su 1.5m di deriva di  $\sim 13\%$ .

### 1.2 Performance del rivelatore a LNGS

I dati raccolti durante la presa dati al Gran Sasso hanno dimostrato che le LAr-TPC sono particolarmente indicate per lo studio di eventi rari come le interazioni di neutrino. Questo è dovuto alla buonissima granularità raggiunta dall'apparato, si ottengono infatti risoluzioni spaziali di  $\sim 1\text{mm}^3$  in tutto il volume attivo a disposizione del rivelatore ( $340\text{m}^3$ ). Inoltre questa tecnica di rivelazione fornisce una ottima risoluzione nella risposta calorimetrica:  $\sigma_E/E \simeq 0.03/\sqrt{E(\text{GeV})}$  per gli sciame elettromagnetici (range *sub-GeV*) e  $\sigma_E/E \simeq 0.30/\sqrt{E(\text{GeV})}$  per gli sciame adronici (energie di decine di GeV). In aggiunta, l'elevata frequenza di campionamento -corrispondente a circa il 2% della lunghezza di radiazione- e il notevole rapporto segnale/rumore di  $\sim 10/1$  nel singolo filo consentono di misurare con molta precisione il  $dE/dx$  e, nota la ricostruzione topologica dell'evento, di procedere all'identificazione delle particelle ionizzanti arrestate nel volume del rivelatore [3].

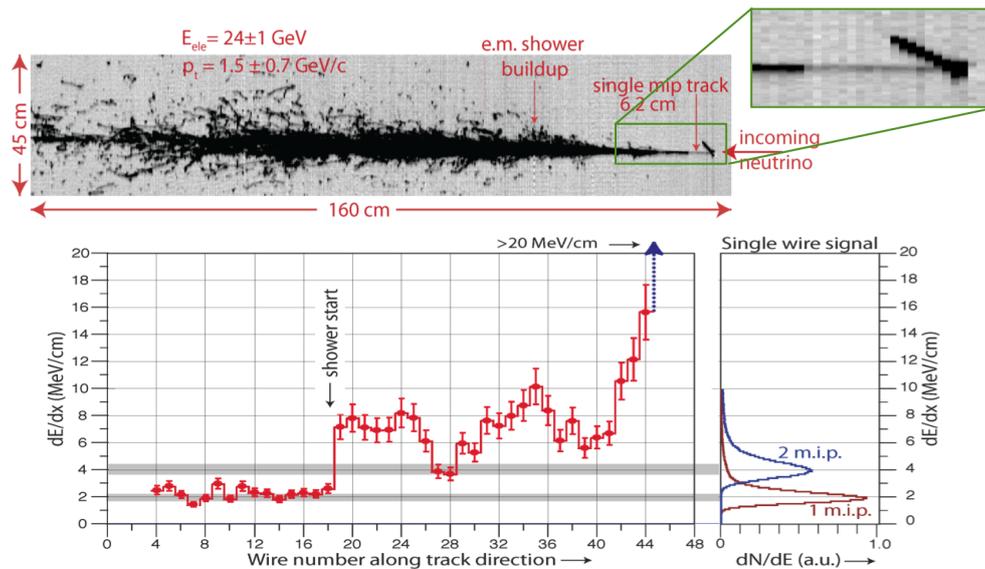
### 1.3 Ricerche di ICARUS T600 a LNGS

Uno degli studi più importanti effettuati dal rivelatore ICARUS ai LNGS, riguarda la ricerca di un'evidenza per la possibile esistenza di un quarto stato di neutrino, detto *neutrino sterile*  $\nu_s$ . Questa particella, proposta per la prima volta da B. Pontecorvo, non interagirebbe per mezzo delle interazioni fondamentali descritte dal Modello Standard, eccetto che per la gravità. Tale studio è scaturito dal fatto che, recentemente, alcuni esperimenti hanno osservato alcune anomalie sperimentali che sembrano indicare un segnale di nuova fisica oltre il Modello Standard a 3 neutrini. In particolare due diverse categorie di anomalie sono state osservate: un'evidenza di un eccesso di eventi associati a interazioni di  $\nu_e$  in esperimenti con neutrini agli acceleratori (LSND/MiniBooNE) ed una evidenza di una scomparsa di segnale in eventi di anti- $\nu_e$  misurati in prossimità di reattori nucleari e in eventi di  $\nu_e$  durante *run* di calibrazione utilizzando sorgenti radioattive negli esperimenti dedicati ai neutrini solari e basati sull'utilizzo del Gallio (GALLEX/SAGE).

Queste anomalie sperimentali possono essere spiegate ipotizzando l'esistenza di un quarto stato di neutrino *sterile* responsabile di oscillazioni su breve distanza con  $\Delta m^2 \leq 1eV^2$ , molto oltre i valori attualmente misurati per le oscillazioni a 3 neutrini.

Per verificare l'ipotesi dell'esistenza dei neutrini sterili, la collaborazione ICARUS ha messo in atto uno studio sperimentale basato sugli eventi raccolti al fascio di neutrini CNGS. Il rivelatore, installato presso i LNGS, è stato infatti esposto nel periodo 2010-2012 al fascio di neutrini CNGS inviato dall'SPS del CERN a distanza  $L=732$  km. Questo fascio, composto principalmente da  $\nu_\mu$  con  $E \sim 20$  GeV, ha permesso, grazie alla piccola contaminazione  $< 1\%$  di  $\nu_e$ , di effettuare una sensibile ricerca di possibili anomalie in comparsa attraverso lo studio dell'oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ . A partire dall'ottobre 2010 fino al dicembre 2012 ICARUS ha registrato eventi di interazioni di neutrini provenienti dal fascio CNGS nel range di energie che va dai 10 ai 30 GeV. La capacità di ricostruire il vertice di interazione del neutrino, di identificare e misurare gli sciami elettromagnetici generati dagli elettroni primari e l'accuratezza di misura della massa invariante delle coppie generate da fotoni nei decadimenti dei pioni neutri consentono di ottenere con grande efficienza l'identificazione di eventi generati da neutrini elettronici e di scartare gli eventi di fondo in corrente neutra (NC) per lo studio delle transizioni  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  (fondi residui dalle NC inferiori al per mille).

ICARUS ha selezionato e studiato a fondo 2650 interazioni di neutrino, corrispondenti a  $7.9 \cdot 10^{19}$  p.o.t. (protoni su bersaglio) con lo scopo di riconoscere le interazioni prodotte dai neutrini dell'elettrone. Questi eventi sono stati riconosciuti tramite l'identificazione dell'elettrone prodotto al vertice primario di interazione: complessivamente sono stati rivelati 7 eventi da neutrini elettronici contro gli  $8.5 \pm 1.1$  che ci si aspettava dall' $\sim 1\%$  della composizione intrinseca del fascio proveniente dal CERN e dalle tre oscillazioni standard di sapore. Questo risultato, compatibile con i valori attesi, ha permesso di restringere lo spazio dei parametri che descrivono l'oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  associata ai neutrini sterili a valori centrati attorno a  $\Delta m^2 \sim 0.5eV^2$  [4].



**Figura 4:** In alto immagine dell'evento generato da un  $\nu_e$ : sono visibili il protone e l'elettrone (ingrandimento) e lo sciame elettromagnetico generato dall'elettrone; in basso misura del  $dE/dx$  nei primi fili dell'elettrone, prima che inizi a svilupparsi lo sciame elettromagnetico.

A titolo di esempio mostriamo in Figura 4 uno dei 7 eventi sovracitati. Possiamo vedere dall'ingrandimento il vertice di interazione del neutrino nel quale sono prodotti un protone (traccia più spessa) e un elettrone. Fatta la ricostruzione 3D dell'evento è stata misurata quanta energia veniva raccolta in ciascun filo che ha registrato il segnale prodotto dall'elettrone e si è stimato quindi il  $dE/dx$  all'inizio dello sciame elettromagnetico, visibile nel plot in basso di Figura 4. Nei primi fili (canali 4-19) si nota bene che il  $dE/dx$  è compatibile con una singola m.i.p (particella al minimo di ionizzazione), si tratta quindi di un elettrone; la verifica viene fatta perché nel caso in cui il  $dE/dx$  fosse stato compatibile con due m.i.p. si sarebbe allora trattato di uno sciame generato non da un elettrone, bensì da un fotone che, interagendo, avrebbe prodotto una coppia elettrone positrone. Un altro elemento essenziale è il fatto che vediamo la traccia dell'elettrone partire proprio dal vertice di interazione del neutrino: tutto ciò suggerisce il fatto che si tratti proprio di un neutrino dell'elettrone.

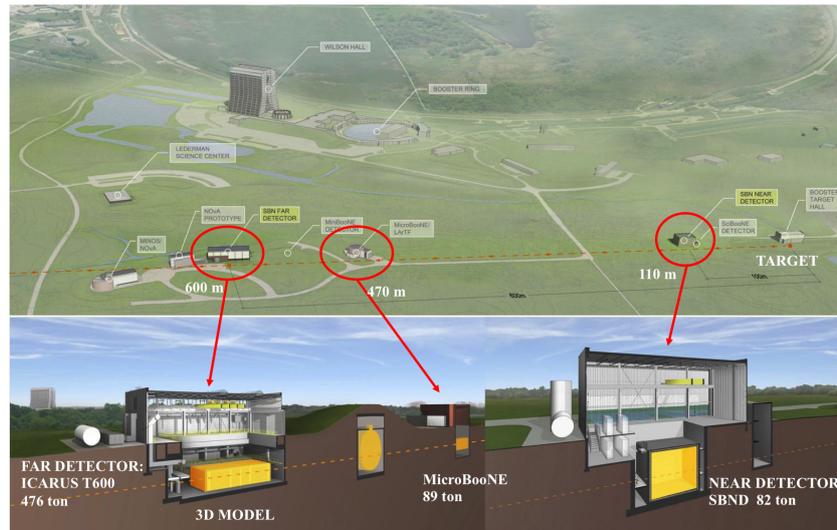
## 2 Il programma *Short Baseline Neutrino* (SBN) a FNAL

### 2.1 Un nuovo programma di fisica al Fermilab

Per chiarire in modo definitivo il puzzle relativo alla possibile esistenza dei neutrini sterili con massa dell'ordine dell' $eV$  risulta tuttora necessario un nuovo esperimento che miri a verificare con un livello di  $5\sigma$  la natura delle anomalie sperimentali sopra accennate. Questo progetto pone le sue basi su due concetti innovativi: l'uso della tecnologia LAr-TPC, che fornisce eccellenti performance nell'ambito della ricostruzione spaziale e calorimetrica di tutte le interazioni che avvengono nel rivelatore, e l'uso di molteplici stazioni di misura dello spettro del neutrino a diverse distanze dal bersaglio (*target*) dove vengono prodotti i neutrini del fascio. I segnali di oscillazione, infatti, vengono identificati come differenze negli spettri dei neutrini rilevate a diverse distanze dal *target*, mentre spettri identici indicano un' assenza di oscillazioni nel fascio. Inoltre il confronto fra i segnali raccolti in diversi rivelatori lungo la linea di fascio permette una forte riduzione degli errori sistematici nello studio dell'oscillazione, in particolar modo di quelli relativi alle sezioni d'urto di interazione dei neutrini e di quelli relativi alle incertezze sul flusso dei neutrini che attraversano i rivelatori.

Un programma basato sulle caratteristiche appena descritte è ora in preparazione al *Fermi National Accelerator Laboratory* (FNAL): l'esperimento *Short Baseline Neutrino* (SBN) coinvolge tre LAr-TPC (SBND, MicroBooNE e ICARUS T600) installate lungo la linea del fascio di neutrini BNB (*Booster Neutrino Beam*) rispettivamente a 110m, 470m e 600m di distanza dal bersaglio (schema visibile in Figura 5). Questo programma permetterà una ricerca molto precisa di oscillazioni del neutrino tramite diversi canali, accumulando  $6.6 \cdot 10^{20}$  p.o.t. in tre anni [5].

Elemento principale di questo programma sarà l'analisi simultanea degli eventi in corrente carica di  $\nu_e$  e  $\nu_\mu$  nello stesso esperimento e utilizzando molte stazioni lungo la linea di fascio: questo permette di studiare in maniera dettagliata sia la possibile comparsa di neutrini dell'elettrone associata all'oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ , sia il possibile segnale in scomparsa dei neutrini muonici, necessario per confermare se il segnale osservato sia proprio dovuto ai neutrini sterili. L'uso, quindi, di questo genere di rivelatori posti lungo il fascio BNB dovrebbe arrivare a fornire una risposta definitiva relativamente all'esistenza dei neutrini sterili con massa dell'ordine dell' $eV$  con un livello di confidenza di almeno  $5\sigma$  in tre anni di presa dati.



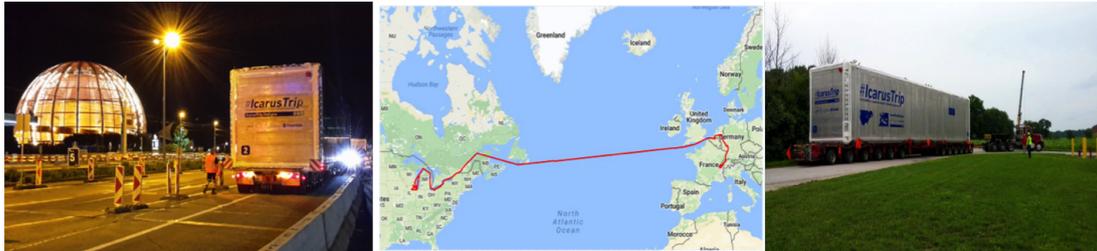
**Figura 5:** Prospetto della disposizione dei rivelatori nel programma SBN lungo il BNB, ICARUS è visibile nella posizione più distante dal bersaglio come *Far Detector* (rivelatore più a sinistra).

## 2.2 Aggiornamento del T600 al CERN e installazione al Fermilab

A partire dal dicembre del 2014 ICARUS T600 è stato trasportato al CERN per consentire di apportare le dovute modifiche all'intero apparato in modo che fosse pronto per iniziare nuovamente a prendere dati nell'ambito del nuovo programma di ricerca al FermiLab. Il T600 è stato sottoposto ad un significativo aggiornamento che introduce alcuni sviluppi tecnologici mantenendo al contempo le prestazioni raggiunte durante la precedente acquisizione dati. Le modifiche più importanti che sono state apportate comprendono:

- una nuova e più performante elettronica di lettura: un sistema di elettronica di *front-end* più veloce, un campionamento sincronizzato (400ns) di tutti i canali dell'intero rivelatore e un *set-up* molto più compatto che consente di ospitare sia l'elettronica analogica che digitale in un' unica scheda;
- la realizzazione e installazione di un nuovo sistema di rilevazione della luce di scintillazione [6]: i 74 fotomoltiplicatori precedentemente utilizzati sono stati sostituiti con 360 nuovi fotomoltiplicatori (90 per ogni camera). Questo *upgrade* garantisce una efficiente rivelazione anche di eventi di bassa energia ( $\sim 100$  MeV) ed una miglior risoluzione temporale ( $\sim 1$ ns) sul tempo di interazione di ciascuna particella nel rivelatore: questo renderà l'apparato sensibile all'evoluzione temporale di tutti gli eventi raccolti all'interno del volume attivo, permettendo anche una localizzazione degli eventi e contribuendo a ridurre i fondi per la ricerca dei neutrini;
- costruzione di nuove coibentazioni per i moduli e revisione della struttura di isolamento termico passiva;
- revisione dei sistemi di criogenia e di filtraggio del LAr;
- riduzione delle deformazioni presenti sui piani catodici mediante specifici trattamenti termomeccanici.

Il processo di aggiornamento del T600 si è concluso nel giugno 2017 con l'invio dei due moduli al Fermilab. Giunti nel sito dell'esperimento il 26 luglio 2017, i due moduli del T600 sono stati poi posizionati nella loro sede definitiva il 14 agosto di quest'anno (Figura 6). Le attività per completare l'installazione stanno procedendo e si prevede quindi di iniziare il riempimento del rivelatore con Argon Liquido all'inizio del 2019 e pertanto, già durante il prossimo anno, ICARUS inizierà ancora una volta a raccogliere nuove interazioni di neutrino.

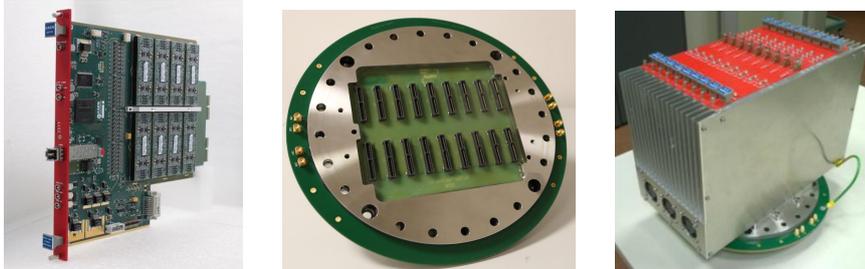


**Figura 6:** Foto che riportano il momento in cui ICARUS viene inviato dal CERN il 12 giugno 2017 (sinistra), il momento in cui arriva al FermiLab il 26 luglio 2017 (sinistra) e il viaggio che ha compiuto nel complesso (centro).

## 3 Nuova elettronica di lettura di ICARUS T600

L'elettronica di ICARUS, usata presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso e con il fascio di neutrini CNGS, ha permesso di raccogliere in maniera molto efficiente interazioni di neutrino ed eventi associati ai raggi cosmici con una precisione e qualità di raccolta dei dati molto elevate. La messa a nuovo dell'apparato in vista del nuovo programma di ricerca al FermiLab ha dato la possibilità di progettare una nuova versione dell'elettronica di lettura. Il miglioramento più importante, finalizzato a una migliore qualità di ricostruzione degli eventi, riguarda prima di tutto la parte analogica: uno *shaping-time* più veloce, da  $\sim 1.5\mu\text{s}$ , viene ora utilizzato sia per i fili di Induzione sia per i fili di Collezione per ottenere una miglior ricostruzione della posizione dei segnali fisici nei fili (*hit*), una drastica riduzione dell'*undershoot* nella risposta del preamplificatore, così come del rumore a bassa frequenza permettendo allo stesso tempo di incrementare il rapporto segnale rumore (*SNR*) rispetto alla presa dati precedente. L'introduzione, dopo ogni amplificatore associato ad ogni canale, di un ADC a 12 bit permette di evitare l'uso dei *multiplexer*, dispositivi "poco maneggevoli", e di ottenere un campionamento a 400 ns che sia sincrono per tutti i canali del rivelatore. Il flusso di dati di ciascun canale viene convogliato verso una FPGA (*Fiel-programmable gate array*) altamente performante che procede alla compressione dei dati e alla trasmissione di questi verso il DAQ (*Data Acquisition*). La *rate* di processazione dei dati attraverso il sistema di lettura è stata portata a 10Hz rimpiazzando gli accessi sequenziali alle singole schede con dei moderni *switch I/O*, realizzando inoltre connessioni in fibra ottica capaci di sostenere transazioni di dati dell'ordine del Gigabit/s. Infine, un design più compatto per l'elettronica di *front-end* è stato studiato per consentire l'installazione delle componenti elettroniche sia della parte analogica sia digitale su di una singola scheda A2795 (Figura 7 a sinistra) che gestisce il segnale proveniente da 64 canali (32 di fili di Induzione e 32 di fili di Collezione). Le schede sono poi installate a gruppi di 9 in un *mini-crate*, per un totale di 576 canali (Fi-

gura 7 a destra), che viene connesso direttamente sulla flangia passante costruita *ad-hoc* per il rivelatore (Figura 7 in centro). Le flange verranno installate su camini posti in cima al rivelatore permettendo così l'estrazione e registrazione dei segnali raccolti sui fili all'interno della TPC [7]. Questa nuova elettronica di *read-out* è stata di recente testata per validarne le performance utilizzando una mini TPC ad Argon Liquido installata al CERN ed esposta ai raggi cosmici e le schede sono attualmente in fase di produzione.



**Figura 7:** A sinistra una delle schede A2795 a 64 canali disegnate e implementate grazie a una stretta collaborazione con la CAEN S.p.a.; in centro una delle flange progettate per ospitare nove schede; a sinistra un esempio di flangia con nove schede installate.

## 4 Introduzione all'attività di tesi

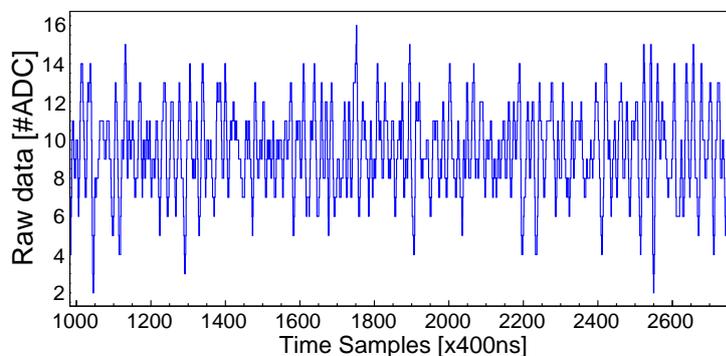
Nell'ambito del rinnovamento dell'elettronica di ICARUS T600, finalizzata all'esperimento SBN, sono stati condotti presso i laboratori del CERN dei test sulle nuove schede dell'elettronica recentemente prodotte. Il *set-up* sperimentale utilizzato per questo scopo è stato curato in modo da riprodurre il più possibile le condizioni di lavoro nelle quali il T600 opererà all'interno del nuovo programma. Lo scopo principale del lavoro esposto in questa tesi è quello di fornire dei metodi di monitoraggio dei canali presenti nelle varie schede per consentire di identificare quali fra essi risultino problematici o difettosi, in modo da poter intervenire tempestivamente per un'eventuale riparazione. Le varie tipologie di anomalie che si possono riscontrare saranno identificate analizzando il segnale raccolto durante una presa dati di prova sia in presenza sia in assenza di un segnale di carica iniettato sul canale in fase di studio. In particolare, l'analisi sviluppata verrà applicata su di un campione di schede già pronte e su cui sono state già effettuate delle acquisizioni di prova. Fine ultimo è quindi individuare i canali difettosi e valutarne la percentuale in questo gruppo di schede.

Come già preannunciato lo scopo di questo lavoro è sicuramente la preparazione degli strumenti di monitoraggio e di test per i canali dell'elettronica, ma è importante sottolineare che i sistemi di controllo sviluppati ed applicati in questa tesi saranno utilizzati anche come strumento ufficiale per i successivi test che verranno eseguiti sulle nuove schede tuttora in produzione e saranno inoltre l'elemento di partenza per lo sviluppo degli strumenti che verranno utilizzati per verificare *online* il corretto funzionamento dei singoli canali durante la futura acquisizione dati al Fermilab. La presenza di canali difettosi durante la presa dati può infatti ridurre l'efficienza con cui si ricostruiscono ed identificano gli eventi: si pensi ad esempio alla stima del  $dE/dx$  all'inizio degli sciami elettromagnetici. La continua verifica *online* del funzionamento e delle prestazioni in termine di rumore dei canali dell'elettronica diventa quindi elemento chiave per il funzionamento del rivelatore.

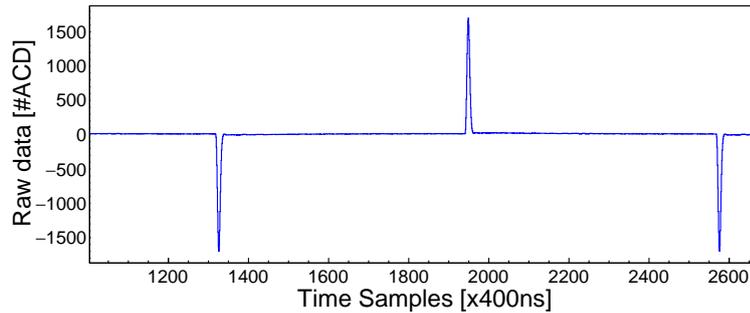
Il lavoro di programmazione in C++ e analisi dei dati è stato impostato all'interno del codice che già in passato gestiva la raccolta dei dati e la ricostruzione degli eventi nell'esperimento. Il procedimento svolto è stato suddiviso in due momenti strettamente connessi e successivi l'uno all'altro: una prima fase detta di sviluppo e una fase successiva detta di analisi. La fase di sviluppo consiste nello strutturare dei metodi, che verranno di seguito spiegati, per ricavare le informazioni utili all'analisi delle risposte dei canali dai campionamenti registrati in ciascun filo (*raw data*): in altri termini in questa fase vengono sviluppati gli algoritmi che definiscono i parametri da utilizzare per valutare il funzionamento del canale studiato. Tali metodi utilizzano in particolare i segnali raccolti in un evento acquisito: per ciascun canale in ogni evento, infatti, vengono registrati 4096 campionamenti in conteggi ADC con un tempo di campionamento (detto anche *t-sample*) pari a 400ns. La fase di analisi invece consiste nella strutturazione di strumenti (nel caso specifico *macro* di *Root*) che permettono di analizzare complessivamente i risultati ricavati precedentemente combinando insieme le informazioni di ciascun canale ottenute su più eventi registrati e forniscono vari tipi di informazione sul modo in cui i parametri dei vari canali si distribuiscono ad esempio all'interno di una scheda o all'interno di un filo nei vari gruppi di eventi. Nel mezzo delle due fasi spiegate avviene la cosiddetta fase di *processing* nella quale il codice implementato nella fase di sviluppo viene eseguito su tutti gli eventi di uno o più *Run* al fine di ricavarne i valori delle variabili precedentemente definite. Gli algoritmi implementati nella fase di sviluppo sono stati ottimizzati in modo da mantenere tempi di processazione di circa 1 secondo per evento.

### 4.1 Struttura dei test e segnali

Durante i test condotti al CERN e presi in considerazione per queste analisi, per ciascun gruppo di schede analizzate erano state eseguite tre diverse acquisizioni (*Run*): i *Run* denominati "Z" sono quelli nei quali non è stato iniettato alcun segnale di carica e sono quelli dai quali si ricaverà il valore dell'RMS del rumore, cioè quelli che saranno utilizzati per capire le condizioni di rumore di fondo dei canali. Nei *Run* denominati con "O" e con "E" invece è stato iniettato un segnale di carica opportunamente calibrato, detto *test-pulse* (TP): per i *Run* "O" (*Odd*) i TP sono stati iniettati solo nei canali dispari, mentre per i *Run* "E" (*Even*) solo nei canali pari; nei fili in cui non è stato iniettato alcun segnale (pari per i *Run* "O" e dispari per gli "E") risulta presente un segnale minore indotto dal segnale TP nei fili adiacenti.



**Figura 8:** Segnale *raw* senza TP dove è possibile vedere il rumore di fondo.



**Figura 9:** Tre picchi visibili in un canale ove è stato iniettato un segnale TP.

È importante sottolineare che ogni gruppo di 3 *Run* fa riferimento ai test condotti con un gruppo di al massimo nove schede montate sul *mini crate*, come visto in precedenza. Si ottiene quindi che per ogni tripletta di *Run* abbiamo al massimo 288 canali di Induzione e 288 canali di Collezione per un totale di 576 canali. Inoltre ogni *Run* è costituito all'incirca da 500 eventi ed in ogni evento, per ciascun canale, sono registrati 4096 campionamenti, ognuno dei quali della durata di 400ns (tempo complessivo 1.6384 ms). Nelle Figure 8 e 9 vediamo due esempi di segnale *raw* estratto da canali arbitrari. Nello specifico, vediamo in Figura 8 il segnale registrato per un canale che funziona correttamente e in cui non sono stati iniettati TP: si vede come sia strutturato il rumore di fondo e come la *baseline* sia impostata a  $\sim 10\#ADC$ . Con il termine *baseline* viene definito il valore attorno a cui si ha l'oscillazione prodotta dal rumore di fondo e che, in prima approssimazione, coincide con il valore medio dei campionamenti registrati. In Figura 9, invece, sono riportati alcuni dei picchi presenti in un canale non difettoso ove è stato iniettato un segnale di *test pulse*.

## 5 Analisi degli RMS

Entrambe le analisi svolte, sia quella per valutare gli RMS dei segnali sui fili sia quella relativa agli eventi con segnali di TP, sono state inizialmente effettuate su di una terna di *Run* corrispondenti ad un gruppo di 9 schede per sviluppare e verificare che il codice funzionasse a dovere. Inoltre i risultati ottenuti sono stati anche verificati visualizzando il segnale raccolto. Specifichiamo inizialmente che, nell'ambito del codice ufficiale di ICARUS, i dati *raw* di ogni canale vengono forniti all'interno di un *vector*, chiamato *wire\_Adc*, con 4096 elementi, dove ogni elemento corrisponde al valore in conteggi ADC del segnale registrato ad uno specifico campionamento temporale.

### 5.1 Fase di sviluppo

Il codice strutturato per analizzare i *Run* privi di segnali di TP va a calcolare prima di tutto, per ciascun canale, la *baseline* del segnale, calcolando nello specifico, la media aritmetica dei valori riportati in sequenza nel *vector wire\_Adc*. Come già detto, tale valore si aggira attorno a 10 e questo sarà valido sia per i *Run* privi di TP che per quelli che li includono. Il calcolo della *baseline* è fondamentale per calcolare l'RMS del segnale, dato che questa quantità va calcolata dopo aver sottratto al segnale la sua *baseline*. Inoltre, come si vedrà successivamente, ci sono dei casi in cui il valore della *baseline* non

risulta costante ma può variare lungo il corso dei 4096 campionamenti temporali: ecco quindi che il calcolo di una *baseline* locale associata ad ogni campionamento fornisce uno strumento aggiuntivo per cercare di rendere più precisa la valutazione dell'RMS.

Descriveremo di seguito le varie metodologie con cui sono stati effettuati questi calcoli all'interno del codice.

```
[...]
for(int i = 64; i < 4031; i++){
    sum_sqr += (wire_Adc[i]-baseline)*
              (wire_Adc[i]-baseline);
}
wire_rms = sqrt(sum_sqr/3968);
[...]
```

Il codice sopra riportato è un esempio di come siano stati calcolati gli RMS nei *Run* privi di TP, che risulta del tutto equivalente al calcolo dell'RMS della distribuzione dei 4096 campionamenti. La variabile `wire_Adc[i]` indica il contenuto in conteggi ADC dell'elemento *i*-esimo del `vector`, quindi del campionamento *i*-esimo di tempo. In questo caso si è calcolato un unico valore della *baseline* lungo tutta la durata del segnale registrato. Come si può notare nel ciclo `for` sono stati esclusi i primi 64 e gli ultimi 64 campionamenti. Questo taglio è stato introdotto per permettere di effettuare dei calcoli consistenti col successivo metodo di valutazione dell'RMS. Quest'ultimo prevede infatti il calcolo di una *baseline* locale, cioè associata a ciascun campionamento di ogni canale analizzato. In particolare, il calcolo locale viene eseguito facendo la media aritmetica sui 128 campionamenti attorno al campionamento *i*-esimo che stiamo considerando, quindi fra i 64 precedenti e i 64 successivi. Si definisce quindi un nuovo vettore detto `wire_Adc_Nobase`, i cui valori `wire_Adc_Nobase[i]` sono definiti come la differenza fra il valore del campionamento *i*-esimo `wire_Adc[i]` e la sua *baseline* locale associata. Il calcolo dell'RMS senza *baseline* locale, detto  $RMS_m$ , viene quindi svolto di seguito con la stessa espressione riportata precedentemente per il calcolo di RMS, ma utilizzando `wire_Adc_Nobase`.

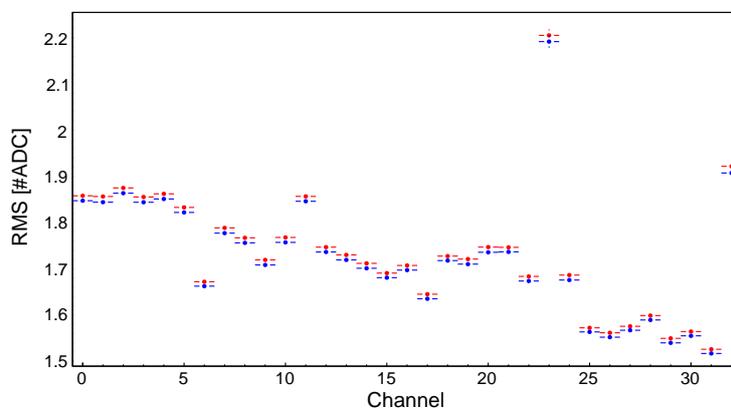
Un altro metodo identico a questo era stato impostato con il calcolo della *baseline* locale a 64 campionamenti (32 prima e 32 dopo), tuttavia, dai test effettuati su alcuni eventi, si è evidenziato che i risultati che restituiva non si discostavano in maniera evidente o significativa dai risultati forniti dal calcolo svolto con 128 campionamenti e pertanto si è deciso di considerare per l'analisi un solo valore di *baseline* locale. Il calcolo della *baseline* locale è stato inserito nella previsione in cui ci potessero essere risposte da parte di alcuni canali che includevano valori di *baseline* che variavano lungo il corso dei 4096 campionamenti temporali.

### 5.2 Fase di analisi

Come già detto in precedenza, la fase di analisi consiste nella raccolta dei dati ricavati nella fase precedente e nella loro analisi per estrarre delle informazioni globali su ciascun canale ottenute combinando le informazioni da più eventi acquisiti. È importante sottolineare che nelle *macro* strutturate per questa analisi sono state calcolate le medie e gli errori relativi all'RMS di ciascun canale di ciascun *Run* su tutti gli eventi presenti nel *Run* stesso.

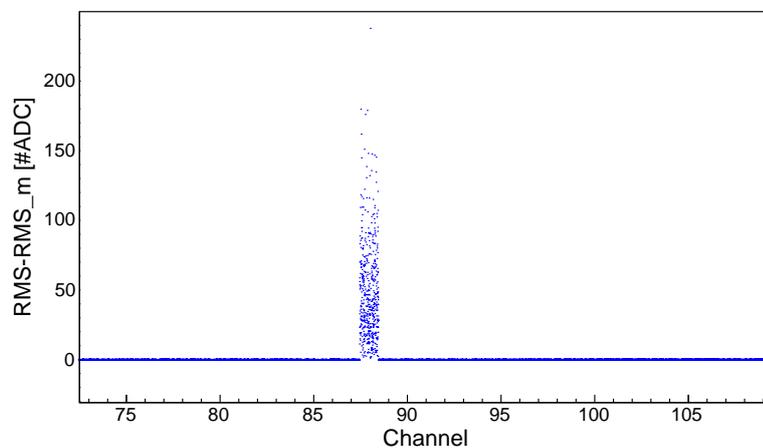
### Anomalie evidenziate nei canali e primi risultati

Uno dei primi risultati evidenziati è il fatto che non ci sia, come già detto, essenzialmente differenza fra l'RMS calcolato sottraendo la *baseline* locale calcolata con 128 e 64 campionamenti. Ecco perché fin da subito si è deciso di mettere da parte il calcolo dell'RMS con *baseline* a 64 campionamenti e far fede solo al calcolo svolto con 128 per cercare di trovare canali in cui la *baseline* avesse un andamento anomalo rispetto al *trend* generale. Vediamo prima di tutto in Figura 10 un caso relativo ad un singolo *Run* che non presenta anomalie riguardo al valore della *baseline*. Possiamo vedere come i valori di RMS e  $RMS_m$  per i primi 32 canali si discostino di poco gli uni dagli altri, fatto che porta a pensare appunto che il valore della *baseline* sia circa costante per tutta la durata dei 4096 campionamenti.



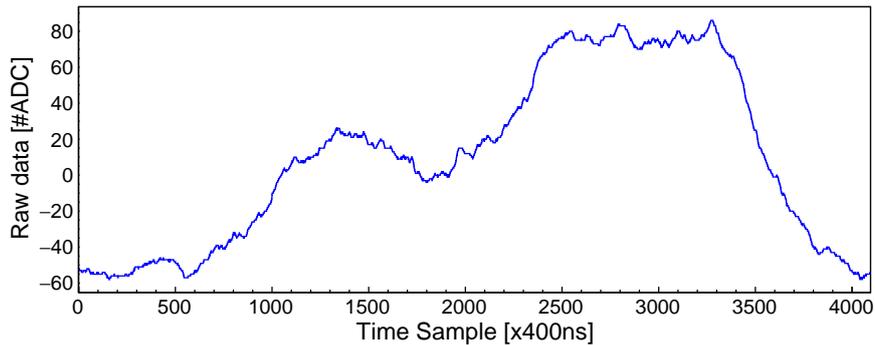
**Figura 10:** Plot che mette a confronto i valori medi di RMS (blu) e  $RMS_m$  (rosso) per 32 canali.

Un primo esempio di *baseline* con un comportamento anomalo è riscontrabile dai risultati sul plot visibile in Figura 11. Nel grafico sono visibili i canali in ascissa e in ordinata sono presenti i valori assoluti di  $\Delta_{RMS}$ , ovvero della differenza  $RMS - RMS_m$ , per i vari eventi presenti in questo specifico *Run*.



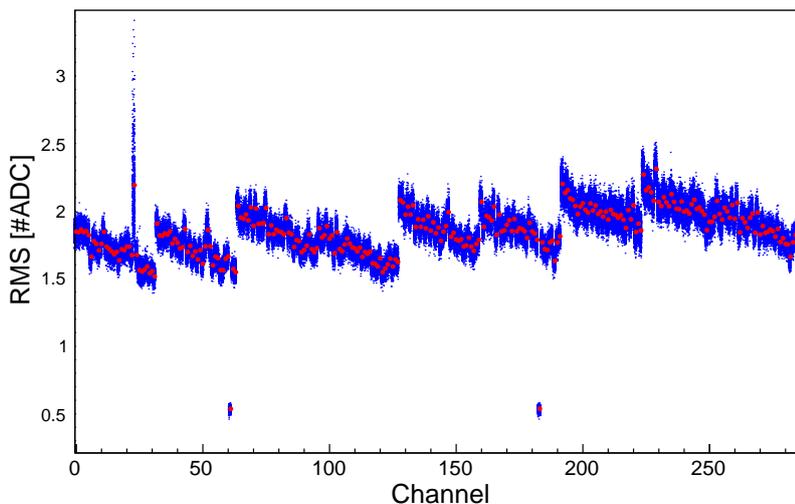
**Figura 11:** Plot canale vs  $\Delta_{RMS}$  ove è visibile la differenza anomala riscontrata in un solo canale.

È subito visibile come, per questo specifico canale, i valori delle differenze in tutti gli eventi si discostano di molto dai restanti valori, distribuiti attorno allo zero. Infatti il valore medio di  $RMS_m$  in questo canale per questo *Run* è  $\sim 2$ , mentre per  $RMS$  è  $\sim 50$ , quindi, come visibile in Figura 11, la differenza in media si aggira intorno a  $\sim 48$ . Un canale con un'anomalia di questo tipo veniva quindi segnalato, applicando dei tagli sui valori raccolti nell'analisi, come verrà spiegato successivamente. Il segnale presente nel canale che evidenziava tali anomalie è visibile in Figura 12. Si nota senza difficoltà che la *baseline* varia di molto rispetto al classico segnale privo di TP dove è ben visibile il solo rumore di fondo (Figura 8).

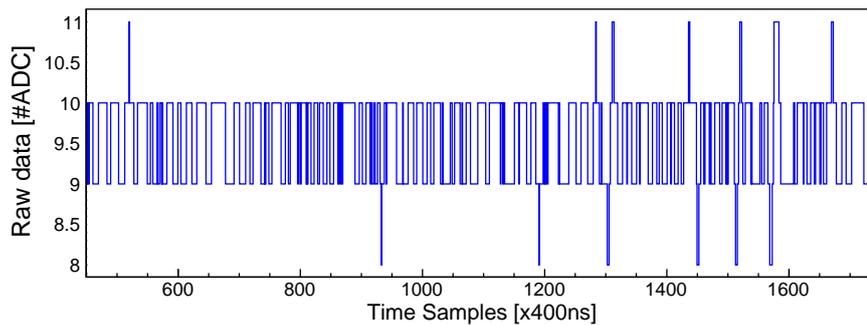


**Figura 12:** Segnale con valore di *baseline* che varia di molto rispetto all'andamento generale e presente nel canale evidenziato per i valori anomali di  $\Delta_{RMS}$  visibili in Figura 11.

Un altro problema molto rilevante che fin da subito è stato riscontrato è la presenza di canali dove sia l' $RMS$  che l' $RMS_m$  hanno valori che si aggirano attorno a 0.5 (Figura 13). Il fatto che questa anomalia sia presente sia per l' $RMS$  che per l' $RMS_m$  suggerisce il fatto che il problema non sia collegato ad una variazione anomala della *baseline*. Il segnale presente in questi specifici canali è visibile in Figura 14.



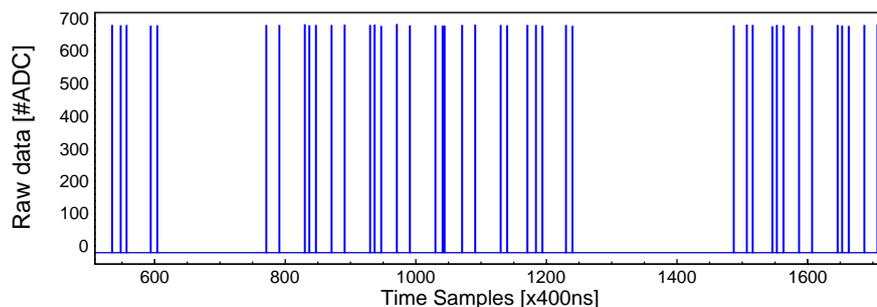
**Figura 13:** Plot che riporta i valori degli RMS per ogni evento per ogni canale (blu) e media dei valori per ogni canale calcolata su tutti gli eventi (rosso).



**Figura 14:** Segnale presente nel canale ove l'RMS e l'RMS<sub>m</sub> hanno valori che si aggirano attorno a 0.5.

Dalla struttura del segnale acquisto, si capisce fin da subito che essa presenta caratteristiche anomale ed è altrettanto facile intuire il motivo per il quale i valori di RMS siano tutti attorno a 0.5: il segnale infatti assume principalmente i valori 9 e 10. Il motivo di questo particolare problema è fatto risalire al preamplificatore, associato a quel particolare canale, che potrebbe essere non ben installato o fuori uso. Un'anomalia di questo tipo è prioritaria perché significa che quel particolare canale risulta non funzionante e si deve quindi intervenire per una riparazione. Il metodo utilizzato per riuscire a mettere in evidenza anche questo tipo di problema verrà spiegato successivamente, ma possiamo dire brevemente che rientra in alcuni limiti che sono stati impostati durante la fase di analisi, limiti che servono a discriminare i canali che presentano caratteristiche nella norma dai canali che presentano comportamenti visti come anomali, come ad esempio il fatto che l'RMS di un canale si discosti di molto (come nel caso visto dello  $\sim 0.5$ ) dal *trend* generale della maggior parte dei valori di quel particolare *Run*, o meglio, come già detto, di quella particolare scheda.

Sempre con i metodi di taglio effettuati sui valori si è arrivati a mettere in luce anche dei canali in cui il valore dell'RMS era eccessivamente alto. Nel caso di seguito esposto questo fatto viene correlato anche ad un valore di RMS<sub>m</sub> alto, fatto che porta a pensare, come già detto in precedenza, che il problema non sia correlato a una variazione del valore della *baseline*, ma che sia dovuto ad altri tipi di anomalie e mal funzionamenti presenti nell'elettronica associata a quello specifico canale. Un esempio di segnale di questo tipo è riportato in Figura 15.



**Figura 15:** Segnale presente in un canale con RMS molto più alto rispetto al normale della scheda e del *Run* più in generale.

Come già detto in precedenza per effettuare una selezione dei canali che risultavano problematici si è deciso di impostare vari criteri di selezione stabiliti in base a dei grafici preventivi effettuati su *Run* di test. In particolare per RMS ed  $RMS_m$  si calcolava per ogni scheda la media dei valori su tutti i canali. Se la media  $M$  dei valori della scheda era nulla in tutti i casi (sia RMS che  $RMS_m$  e sia in Collezione che in Induzione) allora la scheda veniva segnalata come non presente. Questo perchè era noto a priori che in alcuni casi, erano stati acquisiti dei *Run* con un numero inferiore a 9 schede. Se invece i valori erano presenti veniva effettuata la selezione di tutti quei valori di RMS ed  $RMS_m$  che erano superiori ad  $M+0.3$  o inferiori a  $M-0.3$ : questo permetteva di scovare quali fossero i canali con RMS sufficientemente alto o basso rispetto al resto da essere considerati canali con comportamento anomalo. Per la selezione sui canali con alto  $\Delta_{RMS}$ , invece, si è stabilito un valore limite di 0.05 sopra al quale il canale veniva segnalato.

### Selezione delle schede problematiche

Per la selezione dei canali difettosi, sono stati per prima cosa impostati alcuni sistemi di selezione per evidenziare casi in cui ci fossero intere schede che risultavano problematiche. Il calcolo della media degli RMS su ciascuna scheda veniva fatto accettando solamente canali con un RMS compreso fra 1 e 3, questo per evitare che casi in cui l'RMS si discostava totalmente dal *trend* andassero a inficiare sul calcolo della media rendendolo poco consistente. Tuttavia, con un'analisi svolta a posteriori, ci si è resi conto che intere schede potevano presentare valori di RMS tutti al di fuori dei valori massimo (3) o minimo (1) precedentemente impostati e ciò aveva come effetto che la media risultasse 0, come per le schede mancanti. Si è proceduto quindi con l'impostazione del calcolo di una ulteriore media sulla scheda che includesse tutti i canali. A questo punto, se tutti i tipi di media (sia quella con la selezione fra 1 e 3, sia quella calcolata senza selezione) erano nulli la scheda veniva segnata come assente, se invece le medie con la selezione erano nulle, ma non lo erano quelle senza selezione significava che la scheda presentava in tutti i suoi canali dei valori anomali di RMS, che davano una media complessiva molto maggiore o minore del comportamento che ci si aspetterebbe solitamente; la scheda era quindi segnata come problematica e da tenere sotto controllo in futuro, durante lo svolgimento di nuovi test. Un ulteriore controllo era inserito nel caso in cui la media degli RMS della scheda fatta con la selezione fra 1 e 3 fosse diversa da zero, ma comunque più alta di 2.5 o più bassa di 1.5. Questi due casi non sono stati evidenziati come problematici e urgenti, ma comunque si è voluto inserire un controllo ulteriore per accertarsi che tutte anomalie, anche lievi, venissero in ogni modo segnalate per consentire in futuro di avere a portata di mano dei metodi per monitorare al meglio ogni tipo di risposta da parte dei canali singoli o di intere schede.

### 5.3 Esposizione dei risultati dell'analisi degli RMS

Riportiamo di seguito i risultati riscontrati nella fase di analisi effettuata su un campione di 95 *Run* (817 schede, 52288 canali nel complesso), specificando i problemi riscontrati nei singoli canali e nelle singole schede con le frequenze numeriche di riscontro di tutte le anomalie studiate riportate a lato. Indicheremo di seguito con il valore  $M$  la media degli RMS riferita alla scheda in cui si trovano i canali interessati e con  $M_m$  la stessa media per i valori dell' $RMS_m$ .

**Tabella 1:** Risultati relativi ai singoli canali

Induzione		Collezione	
$RMS$ e $RMS_m \sim 0.5$	81	$RMS$ e $RMS_m \sim 0.5$	59
$ RMS - RMS_m  > 0.05$	5	$ RMS - RMS_m  > 0.05$	21
$RMS$ e $RMS_m \geq M \pm 0.3$	286	$RMS$ e $RMS_m \geq M \pm 0.3$	147
$RMS \geq M \pm 0.3$	0	$RMS \geq M \pm 0.3$	1
$RMS_m \geq M \pm 0.3$	7	$RMS_m \geq M \pm 0.3$	5

In Tabella 1, nelle ultime due righe, notiamo che i risultati sono stati riscontrati solo per il valore di  $RMS$  o per il valore di  $RMS_m$ . Nei casi precedenti invece i problemi sono stati riscontrati per entrambi i valori. Come già detto, nel primo caso, siamo in presenza di valori variabili di *baseline* che fanno in modo che i valori di  $RMS$  ed  $RMS_m$  si discostino fra di loro. Nel complesso sono stati evidenziati 612 canali difettosi, l'1.17% sul totale.

Come specificato precedentemente, sono state fatte anche delle verifiche sulle media degli RMS sulle schede nel loro complesso e sono stati riscontrati i seguenti risultati:

**Tabella 2:** Risultati relativi alle schede

Induzione		Collezione	
$RMS$ e $RMS_m = 0$	0	$RMS$ e $RMS_m = 0$	0
$M > 3$ o $M < 1$	0	$M > 3$ o $M < 1$	1
$M > 3$ o $M < 1$ (Induzione e Collezione)		2	

Nel complesso le schede intere evidenziate come difettose nel loro insieme sono 3. Considerando il fatto che una riguarda solo i canali di Collezione e 2 riguardano invece entrambe le viste possiamo dire che la percentuale di schede difettose è pari allo 0.3% sul totale. Un'altra frazione di 36 schede è stata catalogata per aver riportato valori di medie di  $RMS$  e  $RMS_m$  sull'intera scheda o compresi fra 1 e 1.5 o fra 2.5 e 3, tuttavia queste non sono state considerate come schede difettose, ma da monitorare nelle successive prese dati.

## 6 Analisi dei TP

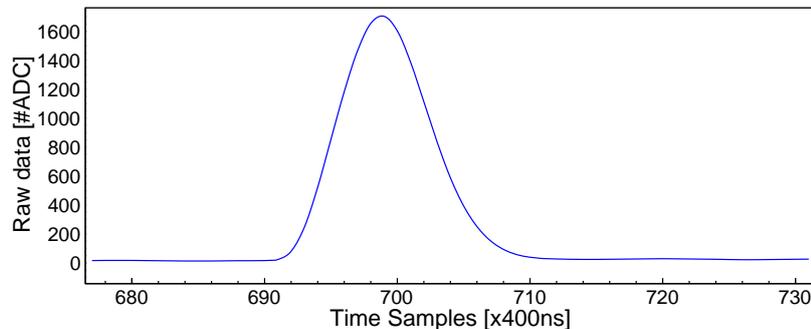
Dopo aver analizzato i *Run* di tipo "Z" privi di TP, si è proceduto all'analisi dei *Run* "O" e "E" nei quali erano stati iniettati dei segnali di carica, i TP appunto, nei fili rispettivamente dispari (O) e pari (E).

### 6.1 Fase di sviluppo

In questa fase sono stati preparati dei metodi per l'identificazione dei segnali caratteristici dei TP e per ricavarne le proprietà fondamentali: campionamento temporale di inizio e

fine, altezza, campionamento in cui si trova il punto più alto del picco, durata e area. Anche in questo caso si presentava il problema della *baseline*. Come prima cosa, durante l'elaborazione dei dati, si è proceduto al calcolo di tale valore.

Questa prima fase di calcolo era strutturata in modo da riuscire a trovare l'inizio dei vari picchi nel segnale. Il codice andava alla ricerca dei punti in cui il valore in conteggi era superiore (picco positivo) o inferiore (picco negativo) di 50 conteggi rispetto al campionamento precedente e ivi il programma segnalava l'inizio del picco in considerazione. Successivamente veniva scartata una quantità pari a 100 campionamenti prima dell'inizio del picco e 150 dopo, questo per essere sicuri di aver eliminato tutti i campionamenti riguardanti il picco: i valori rimanenti venivano salvati su un *vector*. La ricerca del picco successivo ripartiva a distanza di 150 campionamenti dopo quello trovato. Si procedeva poi, tramite tutti i valori salvati prima nel vettore, al calcolo della *baseline*, come già visto in precedenza, con la semplice media aritmetica dei valori in esso salvati. È utile precisare che è sette il massimo numero di picchi presente nel segnale di un canale in cui è stato iniettato un TP. Si procedeva poi alla identificazione dei vari picchi presenti nel segnale registrato di ciascun canale.



**Figura 16:** Ingrandimento di un picco relativo al segnale di TP iniettato in un canale.

In Figura 16 è possibile vedere l'ingrandimento fatto su uno dei picchi presenti in un canale dove sono stati iniettati dei TP. Si può subito notare che il segnale di un picco presente in un canale funzionante ha altezza  $\sim 1700$  e durata  $\sim 20$ . A partire da un'analisi qualitativa, si sono fissati dei criteri quantitativi per riconoscere e descrivere questi segnali. In particolare si è deciso di stabilire l'inizio del picco quando il contenuto in conteggi ADC di un campionamento  $(i+1)$ -esimo superava di almeno 50 conteggi il contenuto del campionamento  $i$ -esimo. Soddisfatta tale condizione, l'inizio del picco era fissato al conteggio  $(i-3)$ -esimo per accertarsi che tutta la parte di conteggi iniziale venisse inclusa. Per i picchi negativi si ripeteva lo stesso ragionamento considerando però che il programma fissava l'inizio quando il contenuto del campionamento  $(i+1)$ -esimo era inferiore di almeno 50 conteggi ADC rispetto al contenuto del campionamento  $i$ -esimo. Un ulteriore controllo, che verificava se i conteggi iniziali al picco erano positivi o negativi, era inserito per evitare che il programma segnalasse come inizio di un picco positivo la risalita verso la *baseline* da parte di un picco negativo o, viceversa, che segnasse come inizio di un picco negativo la discesa verso la *baseline* di un picco positivo. Si procedeva poi alla ricerca del massimo del picco che veniva identificato quando il contenuto in conteggi dell' $i$ -esimo campionamento era maggiore sia del contenuto del campionamento  $(i-1)$ -esimo che del contenuto del campionamento  $(i+1)$ -esimo. Era anche registrato il campionamento in cui il picco raggiungeva il suo valore massimo. Successivamen-

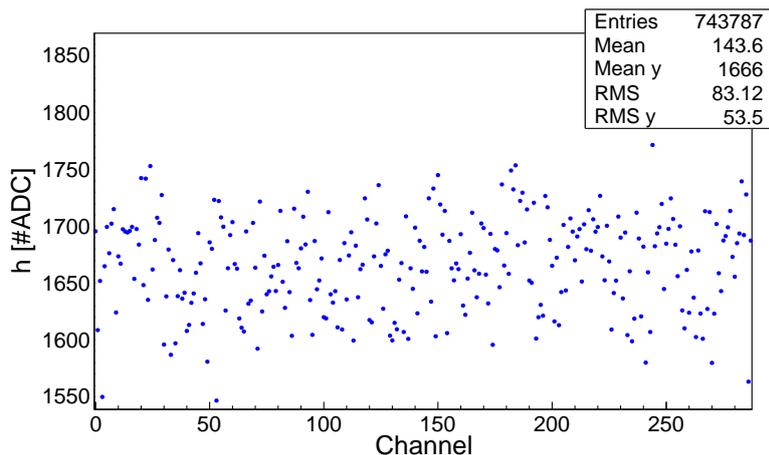
te il processo di ricerca della fine del picco era svolto segnando come termine il punto in cui il valore dei conteggi raggiungeva un valore inferiore a  $baseline+10$ : questo per garantire che anche la coda del picco, visibile in figura, venisse inclusa al suo interno. Si procedeva poi al calcolo della durata temporale del picco ( $end-start$ ) e al calcolo dell'area. Quest'ultimo, in particolare, era svolto sommando fra loro tutti i conteggi ADC contenuti dall'inizio alla fine del picco, dopo che, ad ognuno di essi era stata sottratta la  $baseline$ . Per accertarsi di aver superato del tutto il picco in questione, la ricerca del picco successivo iniziava 150 campionamenti dopo la fine fissata per il picco del quale si erano appena trovati e registrati i risultati.

## 6.2 Fase di analisi

L'algoritmo sviluppato per la selezione e ricostruzione dei TP è stato per prima cosa applicato a livello di test su alcuni eventi in cui erano presenti segnali di  $test-pulse$ . Per come sono composti i segnali di TP iniettati nei canali in questi  $Run$ , ci si aspetta di trovare un numero di picchi pari a sei o sette nella maggior parte dei casi ed, in effetti, solo in una piccola frazione di casi (inferiore all'1.35%) il numero di picchi rivelati è inferiore a sei e maggiore di zero. Specifichiamo che i casi in cui vengono contati zero picchi sono dovuti in piccola parte a mal funzionamenti dei canali, ma nella stragrande maggioranza dei casi al fatto che i TP sono iniettati in un  $Run$  solo nei canali pari o dispari. Per questa ragione nella fase di analisi vengono combinati due run "O" ed "E" permettendo di riconoscere i canali effettivamente non funzionanti.

### Anomalie riscontrate

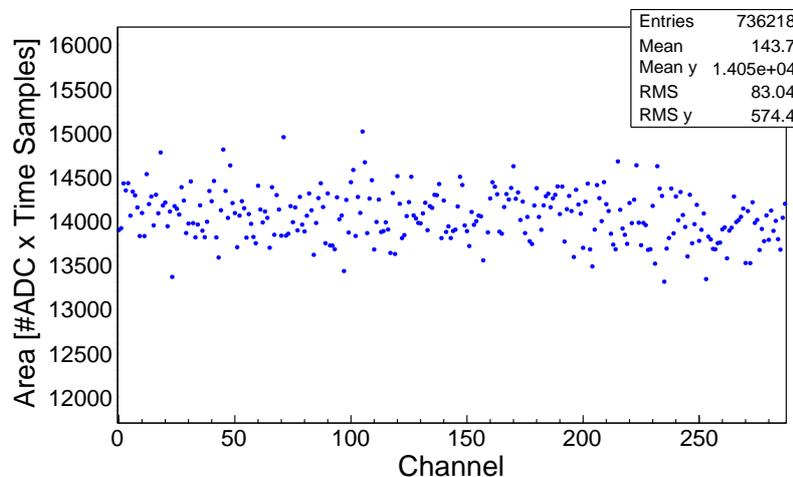
Al fine di valutare il comportamento dei canali analizzando i  $Run$  di TP, si sono studiate fondamentalmente due informazioni: l'altezza del picco e la sua area. Queste due informazioni sono strettamente correlate.



**Figura 17:** Plot che riporta i valori delle medie delle altezze dei picchi presenti nei segnali dei vari canali fatte sugli eventi presenti in una coppia di  $Run$  "O" "E".

Analizzando le caratteristiche dei picchi all'interno dei canali e conoscendone anticipatamente la risposta che essi dovrebbero fornire a test di questo tipo, è possibile risalire ai canali che presentano un comportamento anomalo, in poche parole, quelli danneggiati

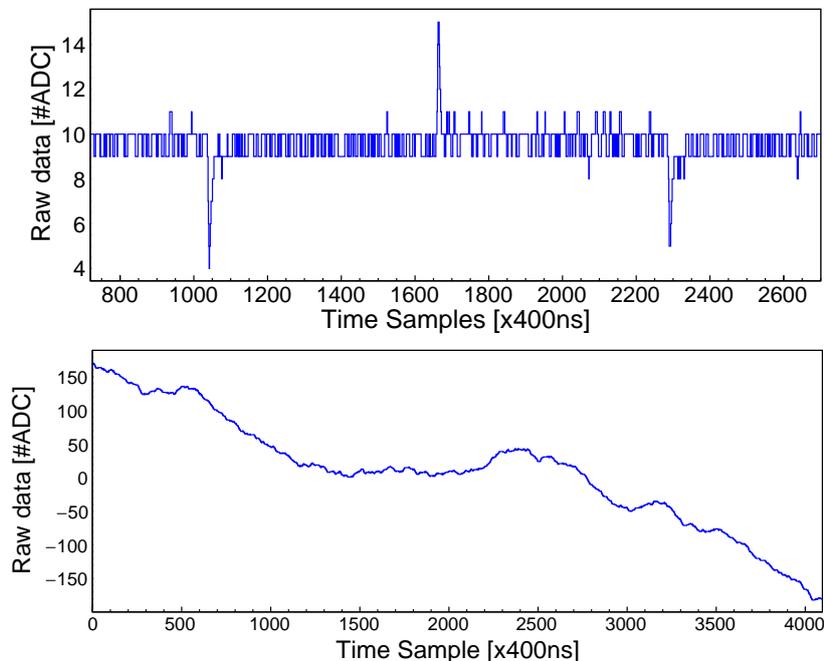
o da tenere sotto controllo. Inizialmente si è notato che i picchi presenti nei segnali indotti avevano altezza inferiore a 200 e area inferiore a 2000. Per questi motivi si è deciso di impostare un taglio proprio a questi due valori al fine di prendere in considerazione, durante la fase di analisi, i valori di aree e altezze dei picchi solo in quei canali ove il segnale non è stato indotto, bensì iniettato direttamente. In Figura 17 possiamo vedere a titolo di esempio i valori delle altezze ricavate dai picchi presenti nei canali mediati su molti eventi di una coppia di *Run* "O" "E". Come si nota la media  $M$  è  $\sim 1650$  ed i valori variano fra  $\sim 1550$  ( $M-100$ ) e  $\sim 1750$  ( $M+100$ ), quindi si è deciso di impostare dei tagli per segnare un canale come difettoso nel momento in cui l'altezza dei picchi era superiore o inferiore alla media  $M \pm 300$ , quindi se inferiore a 1350 o superiore a 1950. Lo stesso ragionamento è stato applicato alle aree impostando valori limite di 11000 e 17000.



**Figura 18:** Plot che riporta i valori delle medie delle aree dei picchi presenti nei segnali dei vari canali fatte sugli eventi presenti in una coppia di *Run* "O" "E".

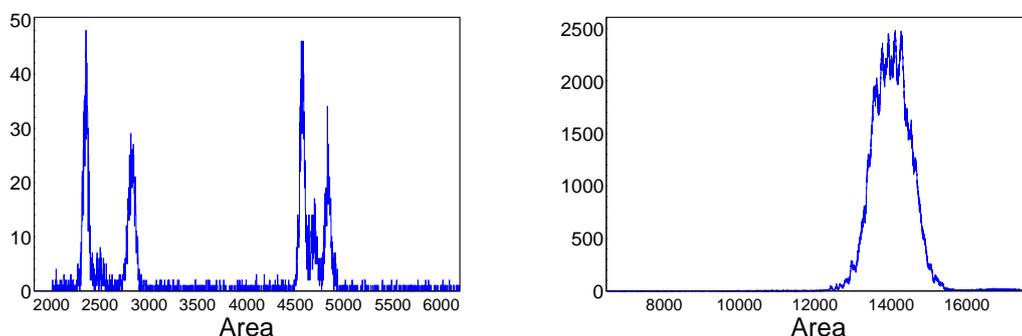
Sottolineiamo che per essere accettato come non problematico, un canale doveva presentare valori nella norma o per l'area dei picchi o per la loro altezza, era superfluo infatti richiedere che entrambi i valori fossero anomali dato che sono strettamente correlati. In Figura 18 possiamo vedere invece la distribuzione di aree presa da altri due *Run* accoppiati con presenza di segnali TP. Nonostante non si noti dalla figura, l'analisi ha riportato valori mancanti di area per i canali 61 e 183: ciò significa che, in questo caso, non si sono riscontrati picchi per questi due canali. Il fatto è interpretabile come un'anomalia perché canali che dovrebbero presentare dei picchi con delle caratteristiche ben definite non hanno riportato risultati. Si noti inoltre che i canali in questione sono gli stessi difettosi visibili nella Figura 13. Il problema riscontrato in questo caso non è imputabile a una risposta del canale che riporta dei picchi troppo bassi, inferiori a  $M - 300$ , ma, come visibile in Figura 19, è dovuto a una risposta che si discosta completamente da ciò che ci si aspetta. Il caso in questione è quello visibile in Figura 19 in alto dove sono presenti dei picchi che però non superano la soglia di 200 come limite minimo impostato, hanno infatti altezza  $\sim 15$ : il problema è del tutto simile a quello mostrato in Figura 14. Nell'altro caso invece (Figura 19 in basso) abbiamo una risposta completamente diversa senza la presenza di alcun picco. In particolare, per questo ultimo esempio, si può notare come la risposta presente in questo canale sia un tipico caso di *baseline* variabile,

il canale in questione è esattamente lo stesso che è stato presentato come problematico durante l'analisi degli RMS (il gruppo di schede prese in considerazione è lo stesso) la quale anomalia è riscontrabile dal plot in Figura 11. Questo risultato supporta il fatto che le due analisi considerate siano consistenti l'una con l'altra e che gli strumenti costruiti al fine di svolgerle funzionino a dovere.



**Figura 19:** Esempio di due segnali di canali in cui sono stati iniettati dei segnali di TP che presentano delle caratteristiche anomale rispetto a quelle attese: picchi eccessivamente bassi (alto) e *baseline* variabile senza picchi (basso).

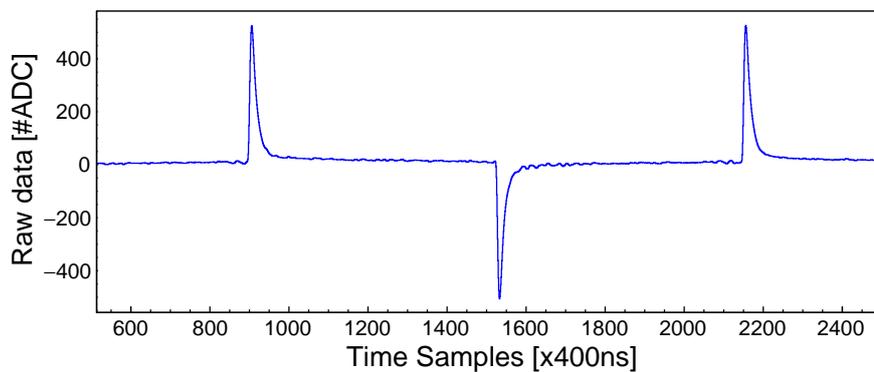
Come già spiegato ci possono anche essere dei casi in cui i picchi sono presenti, ma con caratteristiche anomale che portano a segnalare successivamente il canale come danneggiato. Un chiaro esempio di questo fatto è riscontrabile in Figura 20.



**Figura 20:** Distribuzione delle aree dei picchi dei segnali nei canali di una coppia di *Run*, a destra la distribuzione della maggior parte delle aree e a sinistra l'ingrandimento delle aree inferiori a 6000 presenti in canali difettosi.

In questo istogramma, infatti, viene mostrata la distribuzione delle aree associate ad una coppia di *Run* "O" "E" e l'attenzione è posta su due parti diverse dell'asse delle ascis-

se. Si scorge in primo luogo come tutti i valori siano distribuiti attorno a  $\sim 14000$  (destra), come atteso. La cosa interessante in questo istogramma è però che ci sono anche alcuni picchi con un'area distribuita fra 2000 e 6000 (sinistra); nella Figura 20 a sinistra infatti sono visibili le distribuzioni di aree di picchi presenti in canali difettosi, molto inferiori alle aree che ci aspetterebbe dalla risposta di un canale con un comportamento che rientra nella norma. Canali con questo comportamento presentano una risposta ai TP come quella visibile dal segnale riportato in Figura 21. Si capisce bene che il comportamento non rientra nella norma perché la media dell'altezza dei picchi è attorno a 1650, qui invece si nota un'altezza massima di 500, sia per i picchi positivi che per quelli negativi. Come già detto in precedenza non si riscontrano casi in cui l'altezza o l'area dei picchi siano superiori ai limiti impostati, questo perché i canali difettosi danno risposte che limitano il segnale e non lo amplificano.



**Figura 21:** Segnale con picchi di altezza e area anomale presente in un canale difettoso.

### 6.3 Esposizione dei risultati dell'analisi dei TP

Anche in questo caso vengono esposti i risultati relativi ai problemi riscontrati nei canali secondo l'analisi degli eventi presenti in *Run* ove sono stati iniettati dei TP. Sottolineiamo che il campione di *Run* preso in considerazione, quindi nelle sue parti "O" e "E" per l'analisi degli eventi con presenza di TP, va a completare, a gruppi di tre *Run* "Z", "O" e "E" (citati inizialmente), i *Run* già presi in considerazione nell'analisi degli RMS. Quindi sostanzialmente abbiamo che, per consistenza, le schede prese in considerazione sono le stesse della parte di analisi svolta precedentemente a questa. Indicheremo di seguito con  $M_A = 14000$  e con  $M_h = 1650$  le medie di riferimento di aree e altezze dei picchi per esporre i risultati anomali riscontrati nei canali secondo i limiti impostati spiegati in precedenza. Con  $A$  e  $h$  si indicano invece i valori medi riferiti a un singolo canale.

**Tabella 3:** Risultati relativi ai canali

Induzione		Collezione	
Picchi assenti	113	Picchi assenti	94
$A < M_A - 3000$ o $h < M_h - 300$	79	$A < M_A - 3000$ o $h < M_h - 300$	43
$A > M_A + 3000$ o $h > M_h + 300$	0	$A > M_A + 3000$ o $h > M_h + 300$	0

Con "picchi assenti", invece, si intendono riportare i casi in cui il segnale di TP non è stato individuato per mancanza di picchi dovuta a canali difettosi. Al termine dell'analisi svolta sono stati evidenziati 329 canali difettosi, lo 0.63% sul totale.

### 6.4 *Matching* fra i risultati delle due analisi

Successivamente alle due analisi separate su RMS e TP si è proceduto ad un controllo al fine di identificare quali canali venissero segnalati come problematici in entrambe le analisi. Tali canali, al fine degli scopi del lavoro di questa tesi, sono quelli evidenziati come rotti, che non andranno solo monitorati, bensì riparati nelle loro componenti (in particolare il preamplificatore) o revisionati. Nel complesso, i canali evidenziati in questa fase di *matching* sono 147. Questo risultato è positivo perché conferma ancora una volta la consistenza delle analisi condotte: il fatto che in entrambe le analisi, degli RMS e dei TP, vengano riscontrati in parte gli stessi canali problematici significa che il lavoro condotto nella sua totalità fornisce dei metodi e degli strumenti consistenti fra loro. I problemi che si riscontrano nei canali presenti in entrambe le parti sono quelli presentati come i malfunzionamenti più gravi che comporteranno un intervento sul canale stesso: l'assenza di picchi o picchi con altezza e area inferiore alla norma quando si inietta il TP, RMS  $\sim 0.5$ , *baseline* variabile e quindi  $\Delta_{\text{RMS}}$  anomala, RMS del singolo canale che si discosta di molto da quello medio della scheda cui appartiene il canale stesso. I risultati ottenuti complessivamente riportano anomalie di vario tipo, come già esposto, su 612 canali per quanto riguarda le analisi condotte sugli RMS, quindi sul rumore di fondo presente nei canali; come detto sono anche presenti 3 schede completamente malfunzionanti, per un totale di 160 canali (2 schede con rumore elevato sia in Induzione in Collezione e 1 sola scheda con rumore elevato solo nei suoi canali di Collezione). Per le analisi condotte sui canali con presenza di *test-pulses*, invece, abbiamo la presenza di 329 canali malfunzionanti. Complessivamente, facendo la somma di tutti i canali che sono risultati problematici dalle due analisi e tenendo conto dei canali identificati da entrambe le analisi, troviamo che sono in numero pari a 954, quindi sono l' 1.8% su un totale di 52288 canali presi in considerazione nell'analisi globale. Questi canali sono stati opportunamente revisionati successivamente alla fase di test, per ripristinarne il loro funzionamento.

## 7 Conclusioni

ICARUS T600 è la più grande LAr-TPC che sia mai stata costruita. Il rivelatore è diviso in due moduli identici riempiti nel complesso con 760 tonnellate di argon liquido. Nell'ambito degli studi sulla fisica del neutrino il rivelatore ha raccolto dati dal 2010 al 2013 all'interno della *Hall B* nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso, collezionando nel complesso ~3000 eventi di neutrino dal fascio CNGS inviato dal CERN di Ginevra. Al termine di questa presa dati il T600 è stato incluso nel programma di ricerca SBN al FermiLab di Chicago, progetto che lo vede installato lungo il fascio di neutrini BNB. All'interno del progetto SBN, ICARUS investigherà in modo esaustivo la possibile esistenza di neutrini sterili, suggerita da varie anomalie sperimentali osservate in primis dall'esperimento LSND. A partire dal dicembre 2014 ICARUS è stato trasferito al CERN dove è stato completamente revisionato in previsione dell'utilizzo nel nuovo programma di ricerca SBN al FermiLab. La fase di acquisizione dati in questa occasione partirà nel 2019. Riguardo alla revisione fatta al rivelatore, è stata aggiornata anche l'elettronica di acquisizione associata ai canali di lettura dei segnali raccolti dai fili all'interno delle quattro TPC presenti nel rivelatore. Il lavoro esposto in questa tesi si è concentrato sull'analisi dei dati raccolti durante i test che sono stati condotti sulle nuove schede già prodotte. Lo scopo delle analisi era volto a individuare determinati problemi all'interno delle risposte dei canali in fase di test, in modo da poter segnalare tempestivamente questi problemi ed intervenire sui relativi canali, o eventualmente monitorarli. Per gli scopi cui si era interessati durante il lavoro svolto si è deciso di analizzare i dati inerenti a circa 100 *Run* corrispondenti ognuno ad un gruppo di schede, per consentire di ottenere una statistica più solida: in particolare si voleva riuscire ad avere un numero consistente di eventi per garantire l'individuazione anche di quei problemi che si riscontrano con frequenza particolarmente bassa. Per l'identificazione dei possibili problemi nei vari canali sono stati studiati sia eventi in cui era iniettato un segnale di carica, sia eventi in cui era registrato solamente il rumore elettronico. Per quanto riguarda l'analisi degli RMS si sono identificati canali che presentavano un rumore eccessivamente elevato, più basso della media della scheda in cui il canale si trovava o canali in cui il segnale presentava una *baseline* variabile per tutta la durata dei campionamenti temporali. Nell'analisi riguardante i *Run* con presenza di TP, invece, si sono riscontrati dei problemi relativi alle caratteristiche dei picchi presenti nei segnali, ad esempio il fatto che i picchi fossero assenti o molto più bassi della media riscontrata in canali perfettamente funzionanti. L'individuazione dei canali mal funzionanti risulta essenziale per il lavoro di ricerca che il rivelatore andrà a condurre in futuro. I canali difettosi, infatti, possono introdurre inefficienze in fase di acquisizione dei dati e questo potrebbe condurre a difetti riscontrabili nella ricostruzione degli eventi raccolti dal rivelatore. Il lavoro svolto e descritto nella tesi mira anche a fornire degli strumenti per evitare che ciò si verifichi: gli strumenti preparati in questa ricerca saranno infatti utilizzati non solo per testare il funzionamento delle schede in fase di produzione ma soprattutto saranno la base di partenza per la costruzione di sistemi di monitoraggio *online* della qualità dei dati acquisiti durante la presa dati al FermiLab.



# Bibliografia

- [1] C. Rubbia , “The Liquid-Argon Time Projection Chamber: A New Concept For Neutrino Detector”, CERN-EP/77-08 (1977)
- [2] S. Amerio et al. (ICARUS collaboration), “Design, construction and tests of the ICARUS T600 detector”, Nucl. Instrum. Methods **A 527**, 329 (2004)
- [3] C.Rubbia et al. (ICARUS Collaboration), “Underground operation of the ICARUS T600 LAr-TPC: first results.” JINST **6**, P07011, (2011)
- [4] M.Antonello et al. (ICARUS Collaboration), “Experimental search for the LSND anomaly with the ICARUS detector in the CNGS neutrino beam.” Eur. Phys. J. C **73:2345**, (2013)
- [5] R.Acciari et al., “A Proposal for a Three Detector Short-Baseline Neutrino Oscillation Program in the Fermilab Booster Neutrino Beam” . Arxiv, **1503.01520**, (2015).
- [6] M.Babicz et al., “Test and characterization of 400 Hamamatsu R5912-MOD photomultiplier tubes for the ICARUS T600 detector.”, JINST **13**, P10030, (2018)
- [7] L. Bagby et al., “New read-out electronics for ICARUS-T600 liquid Argon TPC. Description, simulation and tests of the new front-end and ADC system”, Arxiv, **1805.03931**, (2018).