

## 1. Contesto

### Il rivelatore ICARUS-T600

Il rivelatore ICARUS-T600 è una camera a proiezione temporale ad argon liquido (LAR-TPC) riempita con 760 tonnellate di argon liquido ultra-puro [1]. Può fornire eccellenti immagini 3D e ricostruzione calorimetrica di qualsiasi particella ionizzante. Questa tecnica di rilevamento consente uno studio dettagliato delle interazioni dei neutrini per indagare la possibilità di neutrini sterili nella regione di massa  $O(1 \text{ eV})$  e fornire chiarimenti sull'anomalia rilevata dagli esperimenti Liquid Scintillator Neutrino Detector (LSND) e MiniBooNE.

### Ricostruzione

1. **Ricerca degli hit:** segmenti di forme d'onda corrispondenti a segnali fisici vengono cercati nella forma d'onda deconvoluta trasmessa dal filo e convertiti in coordinate temporali e posizionali.
2. **Ricostruzione della traccia:** gli hit vengono passati come input a Pandora, un framework software composto da diversi algoritmi di riconoscimento del pattern, che esegue una ricostruzione 3D dell'intera immagine registrata nell'evento, inclusa l'identificazione dei vertici di interazione e delle tracce e degli sciami all'interno della TPC.

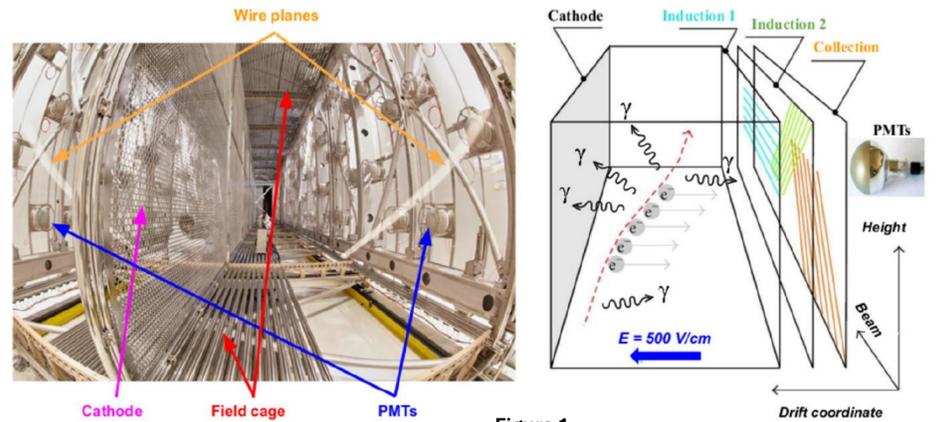
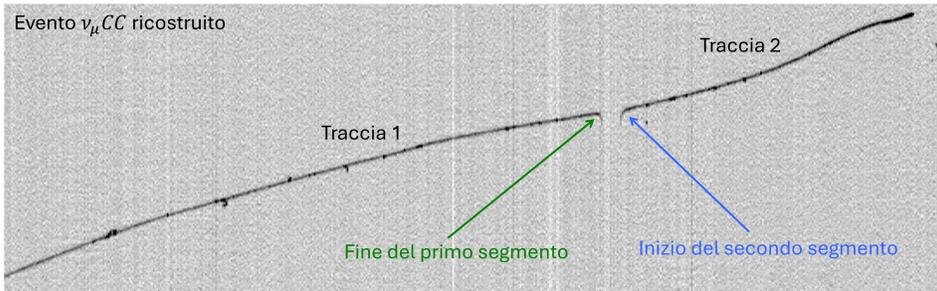


Figura 1

## 2. Problema

### Rottura della traccia

In alcuni casi correlati a inefficienze nella rivelazione degli hit, alla deviazione della traiettoria della particella o alle particelle che attraversano il catodo o il supporto del filo di Induzione 1 (vedi Figura 1), Pandora rompe la traccia della particella in segmenti più piccoli e considera ogni segmento come una particella indipendente. Inoltre, le tracce rotte da Pandora sono talvolta ricostruite male; ad esempio, i punti di inizio e fine possono essere scambiati rispetto al vertice di interazione, o il vertice può addirittura essere posizionato tra i due segmenti. Abbiamo stimato che Pandora interrompe circa il 6% delle tracce dei muoni in un campione Monte Carlo di eventi  $\nu_\mu CC$  ricostruiti.

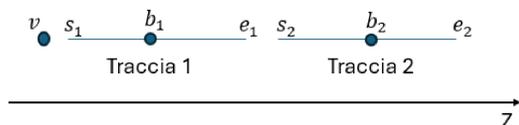


## 3. Soluzione

### Algoritmo di cucitura

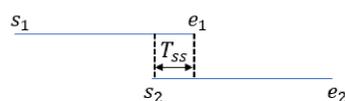
Per mitigare questo fenomeno, abbiamo progettato un algoritmo che rileva e ricuce le tracce interrotte. Esso valuta due tracce simultaneamente:

1. Allinea il vertice di interazione e i baricentri di ogni traccia lungo l'asse z.



1. Se il vertice è fra i baricentri, significa che le due tracce appartengono a particelle differenti oppure Pandora ha determinato erroneamente il vertice. In entrambi i casi, la coppia di tracce è rigettata e considerata non riparabile.
2. La traccia con il baricentro localizzato centralmente (Traccia 1) è più vicina al vertice di interazione. In questo caso, l'algoritmo identifica i punti iniziali e finali di entrambe le tracce in base alla distanza 3D dal vertice di interazione.
3. Quando le tracce si sovrappongono lungo l'asse z ( $z_{e1} > z_{s2}$ ), l'algoritmo verifica se la sovrapposizione è entro una tolleranza accettabile:

$$T_{ss} = \frac{|z_{s2} - z_{e1}|}{\min(D_{z,1}, D_{z,2})} < 0.7, \quad D_{z,i} = |z_{ei} - z_{si}|$$



5. Controlla l'angolo fra le direzioni delle tracce:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\vec{T}_1 \cdot \vec{T}_2}{|\vec{T}_1| |\vec{T}_2|}\right) < 35^\circ$$

6. Valuta la distanza 3D fra le tracce:

$$D_{ss} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}}{\min(D_{se,1}, D_{se,2})} < 0.7, \quad D_{se,i} = |\vec{T}_i| = |e_i - s_i|$$



## 4. Risultati

### Criteri di selezione delle tracce

Abbiamo applicato i seguenti criteri per selezionare le tracce di possibili eventi  $\nu_\mu CC$ :

- Il vertice di interazione deve essere più lontano di 25 cm dal bordo del volume attivo;
- La traccia deve essere contenuta entro 5 cm dal bordo del volume attivo;
- La lunghezza della traccia ricostruita  $L_{trk,Reco} \geq 20 \text{ cm}$  (per escludere i raggi delta);
- La traccia deve essere associata a una particella e non a uno sciame;
- I fit della traccia sulle curve  $\frac{dE}{dx}$  corrispondenti a muone e protone devono essere  $\chi_\mu^2 < 30$  e  $\chi_p^2 > 60$ .

### Prestazioni sul Monte Carlo

Per valutare le prestazioni dell'algoritmo, abbiamo definito efficienza (E), purezza (P) ed errore (W) su tutte le tracce dei muoni (rotte e non rotte) considerate dall'algoritmo:

$$E = \frac{n_{tracce\ cucite\ correttamente}}{n_{tracce\ riparabili}}, \quad P = \frac{n_{tracce\ cucite\ correttamente}}{n_{tracce\ cucite}}, \quad W = \frac{n_{tracce\ cucite\ erroneamente}}{n_{tracce\ valutate}}$$

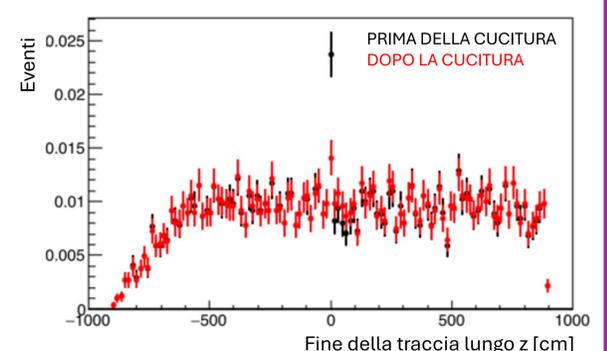
Abbiamo valutato le prestazioni su 65573 muoni figli primari di interazioni  $\nu_\mu CC$  con una lunghezza della traccia MC  $L_{trk,MC} \geq 50 \text{ cm}$ . Definiamo un muone rotto se ha due o più tracce associate allo stesso Geant 4 ID. Additionalmente, controlliamo le frazioni di hit ( $hit_{completeness}$ ) ed energia ( $E_{completeness}$ ) che il segmento ricostruito contiene rispetto alla traccia Monte Carlo per escludere segmenti molto corti che contengono una frazione irrilevante di hit ed energia:

Tagli	$\mu$ rotti	$\mu$ riparabili <sup>1</sup>	$\nu_\mu CC$ ricuciti correttamente (E,P)	$\nu_\mu CC$ ricuciti erroneamente (W)
$hit_{comp}$ ed $E_{comp} \geq 10\%$	2916	1854	1442 (77.8%, 98.3%)	25
Nessun taglio su $hit_{comp}$ ed $E_{comp}$	3755	2384	1727 (72.4%, 88.7%)	219 (0.33%)

1.  $\mu$  non riparabili: muoni con il vertice di interazione posizionato erroneamente tra i baricentri dei segmenti. Sono circa il 37% di tutti i muoni rotti.

### Prestazioni sui dati reali

L'algoritmo di cucitura è stato applicato a un campione di circa 1700 eventi  $\nu_\mu CC$  ricostruiti. Esso ricuce circa il 3.2% degli eventi.



Eccesso di tracce che si fermano a  $z = 0$ , dove si trova il supporto dei fili di Induzione 1. Il numero di tracce è significativamente ridotto da 2,4% a 1,4%.

## 5. Conclusioni

- L'algoritmo di cucitura rileva e ripara le tracce che sono state erroneamente rotte da Pandora durante la ricostruzione. È in grado di riconoscere quando un evento è stato ricostruito in modo errato, rendendo preferibile non effettuare la ricucitura in tali casi.
- L'algoritmo è stato validato mediante simulazioni Monte Carlo, dimostrando un'efficienza del ~73% e una purezza del ~89%. L'errore su tutte le tracce valutate è meno dell'1%. L'algoritmo è stato applicato a un campione di circa 1700 eventi  $\nu_\mu CC$  ricostruiti nei dati reali. Eseguendo una cucitura in circa il 3,2% degli eventi, riducendo significativamente l'eccesso di tracce interrotte a  $z = 0$ , dove si trova il supporto dei fili di Induzione 1.
- Sarà implementato al termine del processo di ricostruzione per ridurre il numero di tracce rotte da Pandora e migliorare la ricostruzione dell'esperimento ICARUS.