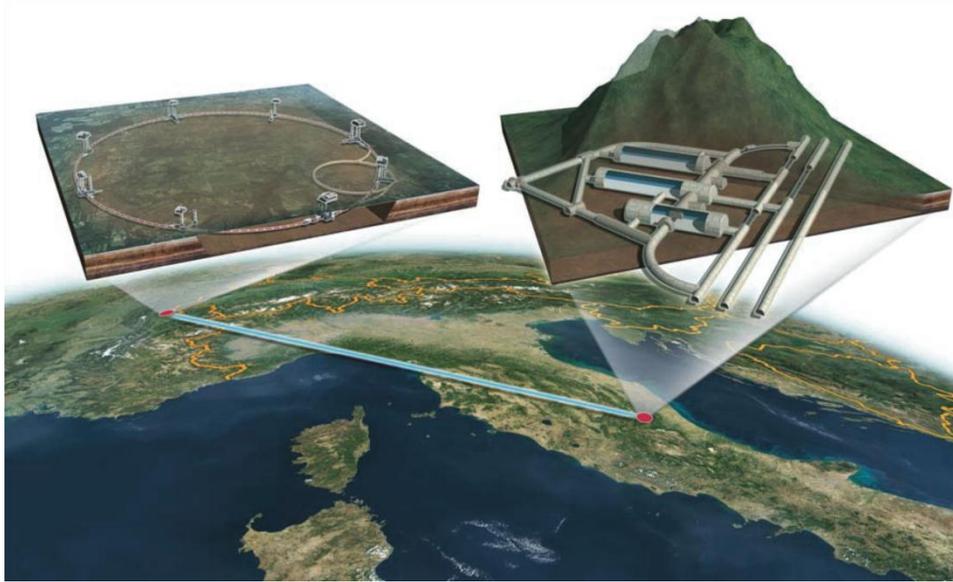
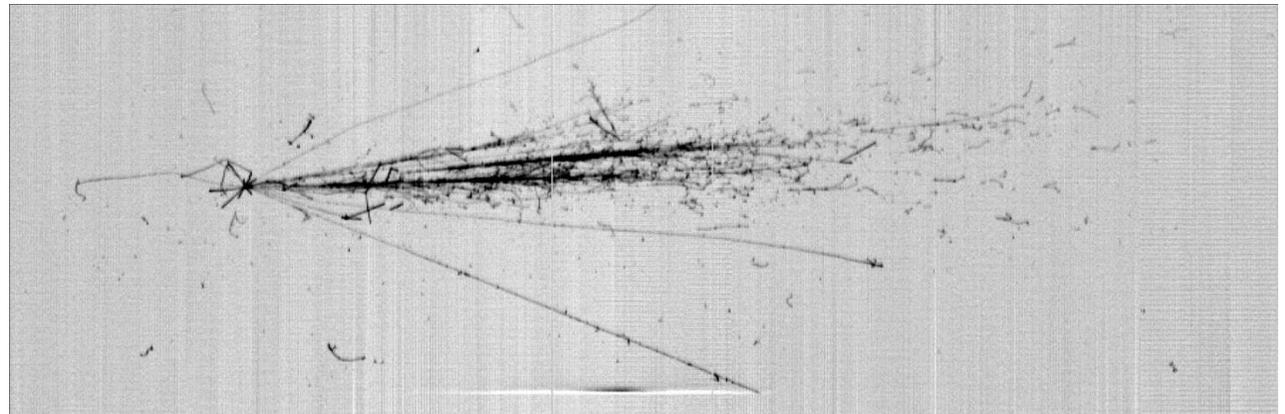


# Stato dell'esperimento ICARUS T600



Gian Luca Raselli

INFN Pavia  
Consiglio di Sezione  
30/05/2012



- La collaborazione ICARUS.
- Il rivelatore ICARUS T600.
- Alcuni risultati preliminari con il Run 2011:
  - Run con neutrini CNGS;
  - Ricostruzione dello spettro delle energie depositate e ricerca di eventuali distorsioni indotte da neutrini super-luminari;
  - Misura diretta del tempo di volo CERN-LNGS dei neutrini.
- Prospettive di fisica per il 2012.
- Road-map 2013.

# La collaborazione ICARUS

M. Antonello, P. Aprili, N. Canci, C. Rubbia, E. Scantamburlo, E. Segreto, C. Vignoli  
*Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN, Assergi (AQ), Italy*

B. Baibussinov, M. BaldoCeolin, S. Centro, D. Dequal, C. Farnese, A. Fava, D. Gibin, A. Guglielmi, G. Meng, F. Pietropaolo, F. Varanini, S. Ventura  
*Dipartimento di Fisica e INFN, Università di Padova, Via Marzolo 8, I-35131, Padova, Italy*

P. Benetti, E. Calligarich, C. De Vecchi, R. Dolfini, A. Gigli Berzolari†, A. Menegolli, C. Montanari, A. Rappoldi, G. L. Raselli, M. Rossella  
*Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica e INFN, Università di Pavia, Via Bassi 6, I-27100, Pavia Italy*

F. Carbonara, A. G. Cocco, G. Fiorillo  
*Dipartimento di Scienze Fisiche, INFN e Università Federico II, Napoli, Italy*

A. Cesana, P. Sala, A. Scaramelli, M. Terrani  
*INFN, Sezione di Milano e Politecnico, Via Celoria 2, I-20123*

K. Cieslik, A. Dabrowska, M. Haranczyk, D. Stefan, M. Szarska, T. Wachala, A. Zalewska  
*The Henryk Niewodniczanski, Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Science, Krakow, Poland*

D. B. Cline, S. Otwinowski, H.-G. Wang, X. Yang  
*Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles, USA*

A. Dermenev, S. Gninenko, M. Kirsanov  
*INR RAS, prospekt 60-letiya Oktyabrya 7a, Moscow 117312, Russia*

A. Ferrari  
*CERN, Ch1211 Geneve 23, Switzerland*

T. Golan, J. Sobczyk, J. Zmuda  
*Institute of Theoretical Physics, Wroclaw University, Wroclaw, Poland*

J. Holeczek, J. Kisiel, I. Kochanek, S. Mania  
*Institute of Physics, University of Silesia, 12 Bankowa st., 40-007 Katowice, Poland*

J. Lagoda, T. J. Palczewski, P. Przewlocki, J. Stepaniak, R. Sulej  
*A. Soltan Institute for Nuclear Studies, 05-400 Swierk/Otwock, Warszawa, Poland*

G. Mannocchi, L. Periale, P. Picchi,  
*Laboratori Nazionali di Frascati (INFN), Via Fermi 40, I-00044, Italy*

P. Plonski, K. Zaremba  
*Institute for Radioelectronics, Warsaw Univ. of Technology Pl. Politechniki 1, 00-661 Warsaw, Poland*

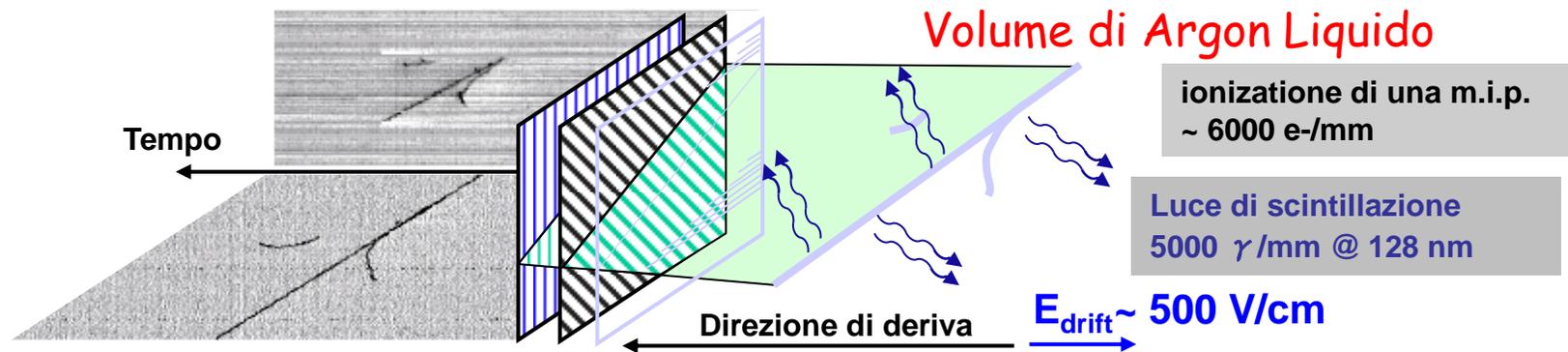
F. Sergiampietri  
*Dipartimento di Fisica, Università di Pisa, Largo Bruno Pontecorvo 3, I-56127, Pisa, Italy*



# La TPC ad Argon Liquido

La **Camera a Proiezione Temporal ad Argon Liquido (LAr-TPC)** [C. Rubbia: CERN-EP/77-08 (1977)], è un rivelatore di particelle ionizzanti in grado di fornire una immagine 3D di ciascun evento (è una "camera a bolle elettronica") con le seguenti caratteristiche:

- è continuamente sensibile e auto-triggerabile
- possiede un'elevata granularità (~1 mm)
- offre eccellenti proprietà calorimetriche
- possibilità di identificare le particelle ionizzanti tramite  $dE/dx$  vs range

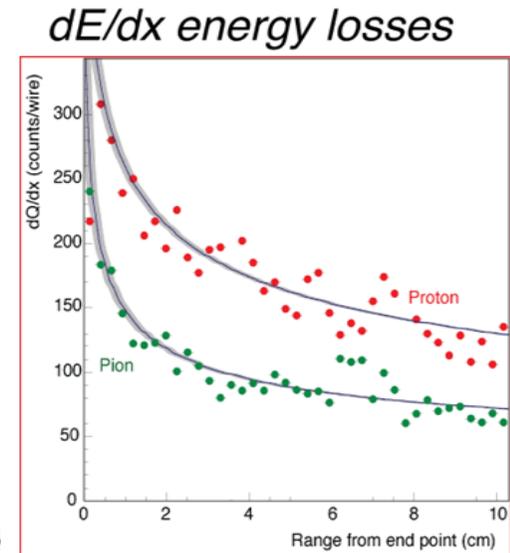
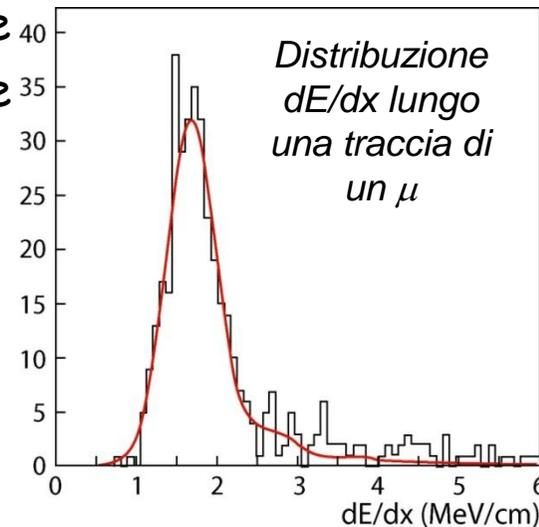
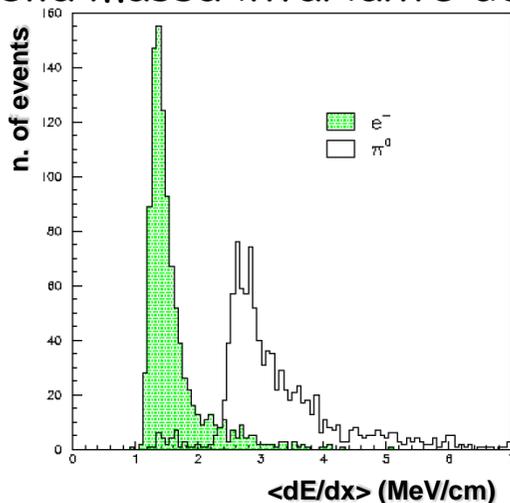
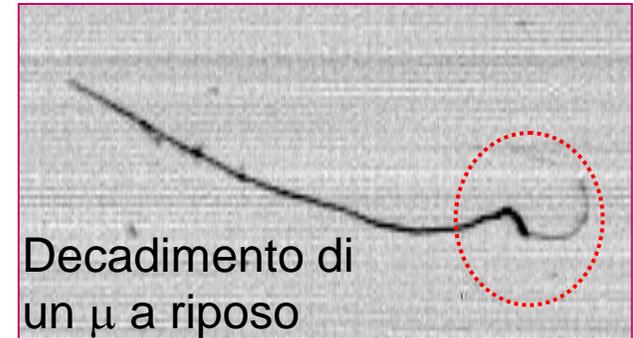


Gli elettroni di ionizzazione sono diffusi nell'Argon Liquido tramite un campo elettrico di deriva  $E_{drift}$ . Nell'attraversamento di piani di fili conduttori orientati lungo differenti direzioni, viene indotto un segnale elettrico. L'elettronica è strutturata come un oscillografo che memorizza su ciascun filo il segnale elettrico mediante schede FADC. Trigger basato sulla raccolta della luce di scintillazione mediante fotomoltiplicatori.

**Elemento chiave: purezza dell'LAr per molecole elettro-negative ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ).**  
**Target: 0.1 ppb  $O_2$  equiv. = 3 ms di vita-media (4.5 m drift @  $E_{drift} = 500$  V/cm).**

# Caratteristiche della LAr-TPC

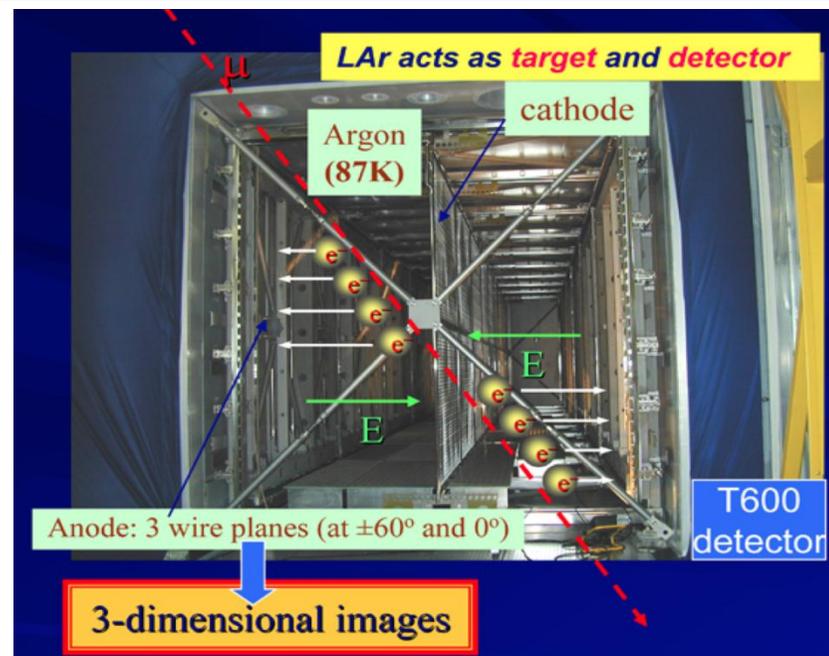
- Dispositivo tracciante:
  - Elevata granularità ( $s_{x,y} \sim 1\text{mm}$ ,  $s_z \sim 0.4\text{mm}$ )
  - Ricostruzione del momento di un  $\mu$  passante via scattering multiplo:  $\Delta p/p \sim 10\text{-}15\%$
  - Ricostruzione dell'energia totale dalla carica di ionizzazione
- La misura locale del deposito energetico  $dE/dx$  consente:
  - Separazione  $e/\mu$  (campionamento a  $1/50 X_0$ );
  - Identificazione tramite  $dE/dx$  vs range
- Buona separazione tra  $e/\pi^0$  ( $10^{-3}$ ) tramite misura di  $dE/dx$  nella prima parte di traccia dopo il vertice e ricostruzione della massa invariante del  $\pi^0$



## RISOLUZIONE ENERGETICA:

- Elettroni di bassa energia  $\sigma(E)/E = 11\% / \sqrt{E(\text{MeV})} + 2\%$
- Sciame elettromagnetici  $\sigma(E)/E = 3\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$
- Sciame adonici (LAr puro)  $\sigma(E)/E \sim 30\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$

# Il rivelatore ICARUS T600



## ■ Due moduli identici

- $3.6 \times 3.9 \times 19.6 \approx 275 \text{ m}^3$
- Massa attiva LAr:  $\approx 476 \text{ t}$
- Lunghezza di drift = 1.5 m
- HV = -75 kV    E = 0.5 kV/cm
- Velocità di deriva = 1.55 mm/ $\mu\text{s}$

## ■ Elettronica

- FADC 10bit, campionamento a 400ns
- 1mV/ADC  $\sim 1000e^-$ /ADC

## ■ 4 camere a fili:

- 2 camere per modulo
- 3 piani di fili per camera a  $0^\circ$  ,  $\pm 60^\circ$
- tot.  $\approx 54000$  fili, passo 3 mm, 3 mm spaziatura

## ■ Fotomoltiplicatori (PMT) per rivelazione luce di scintillazione:

- (20+54) PMTs, 8"  $\varnothing$
- Sensibili al VUV (128nm) tramite shifter (TPB)

# ICARUS T600 in sala B

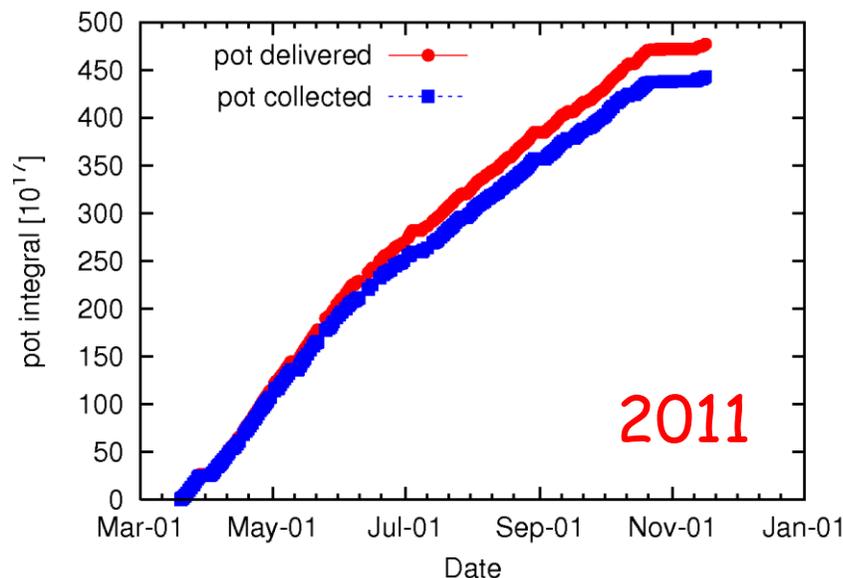
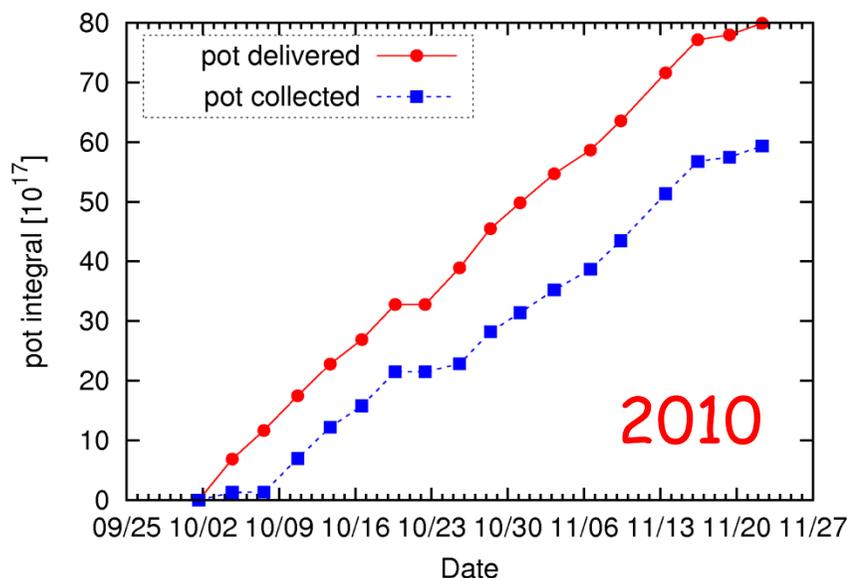
- L'apparato è dotato di un impianto criogenico che mediante 12 liquefattori di N<sub>2</sub> (48 kW di potenza criogenica totale) consente il mantenimento delle condizioni di temperatura (87 K) operative del rivelatore.
- Un sistema di pompaggio/filtraggio/ricircolo dell'Argon in fase liquida consente il raggiungimento di elevati livelli di purezza fino a ~6ms di vita media degli elettroni di drift (minimo richiesto 1.5ms, target 3ms):

$$\tau_{ele} [\text{ms}] = 0.3 / N [\text{ppb O}_2 \text{ equivalenti}]$$

- Tempistica di attivazione:
  - Apparato completato nei primi mesi del 2010;
  - Aprile-maggio 2010 riempito con 600t di Argon liquido;
  - Inizio attivazione (HV sul catodo, fili, PMT) 20-27 maggio 2010;
  - **Primo evento di neutrini CNGS 28 maggio 2010 alle 19:54;**
  - Ottimizzazione del rivelatore nell'estate 2010
  - In condizioni regolari di presa dati dal 1 ottobre 2010.

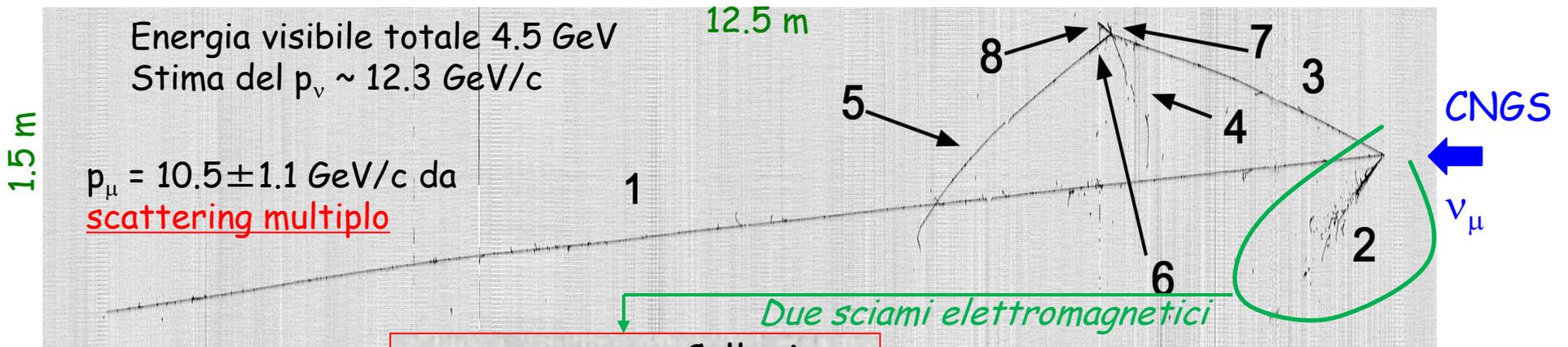
# Run con neutrini CNGS nel 2010 e 2011

	2010	2011
Periodo di raccolta	1 Ottobre-22 Novembre	19 Marzo-14 Novembre
Pot forniti/raccolti	$8 \times 10^{18}$ / $5.8 \times 10^{18}$	$4.78 \times 10^{19}$ / $4.44 \times 10^{19}$
Eff. operativa	90% (dal 1/11/2010)	93%



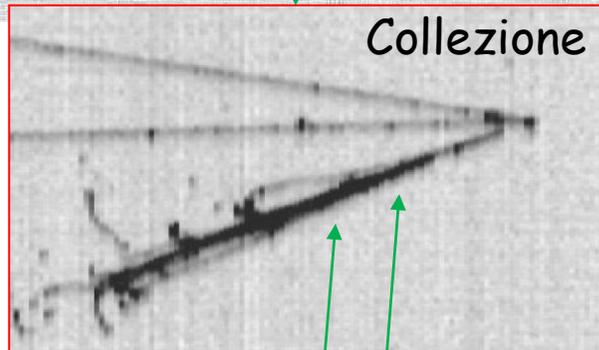
Dati del 2010 analizzati e utilizzati come training  
Dati del 2011 in corso di analisi

# Analisi dati



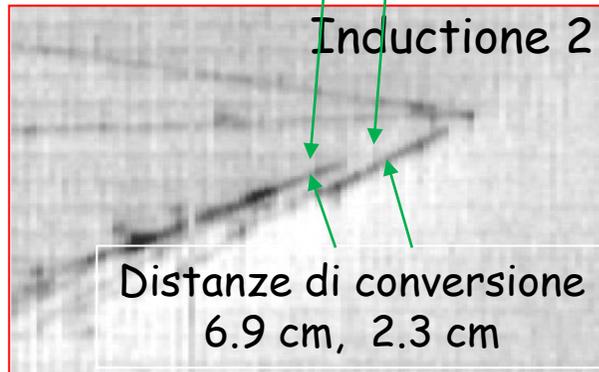
## Vertice primario (A)

- Traccia da  $\mu$  (1)
- Cascata e.m. (2)
- Pione (3)



## Vertice secondario (B)

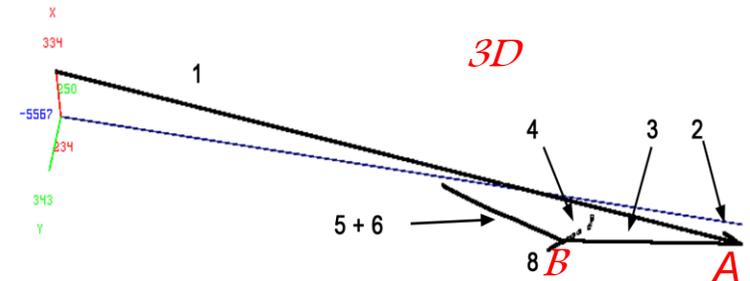
La traccia (5) è un  $\mu$  generato dallo stop di un  $k$  (6). È visibile anche il decadimento del  $\mu$ .



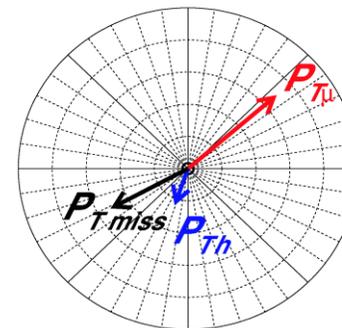
Riconoscimento del  $\pi^0$  mediante  $2\gamma$  e ricostruzione della massa invariante.

$$M_{\gamma\gamma}^* = 125 \pm 15 \text{ MeV}/c^2$$

Tutte le particelle sono ricostruite in maniera tridimensionale mediante Poligonal Line Algorithm



Riconoscimento delle particelle ( $p, K, \pi, \mu$ ) associate alle tracce mediante dQ/dx versus range.

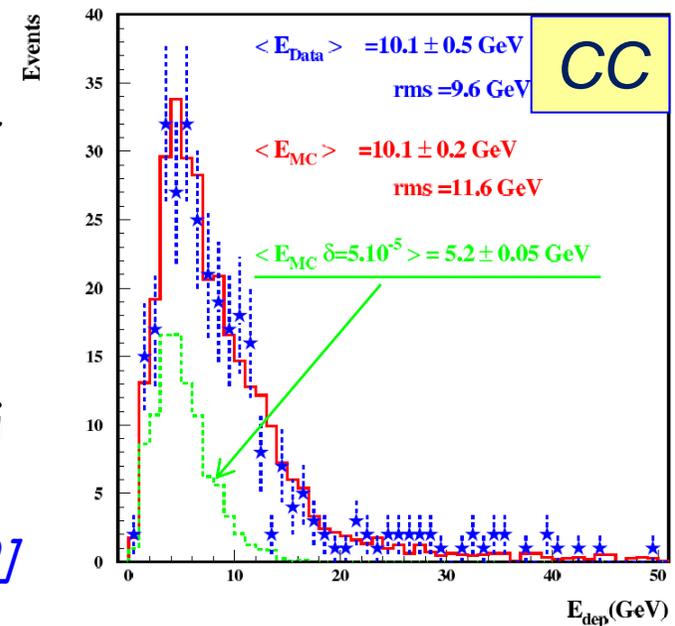
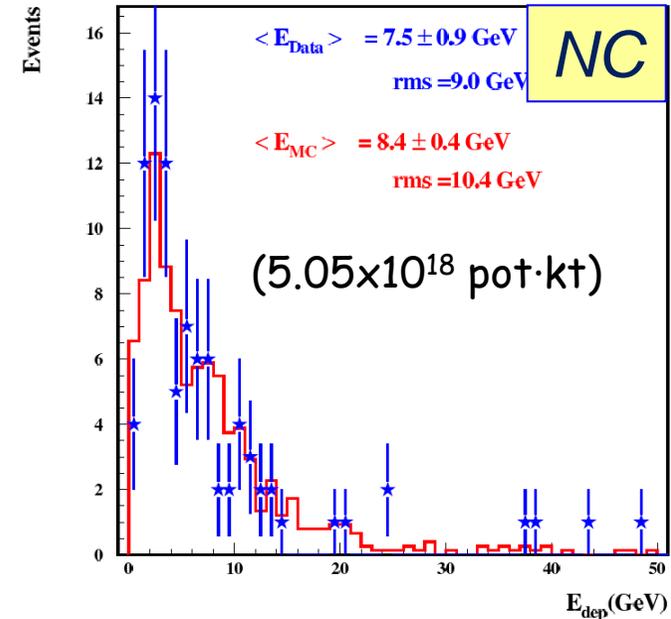


Momento trasverso totale  $\sim 250 \text{ MeV}$  (consistente con il momento di Fermi)

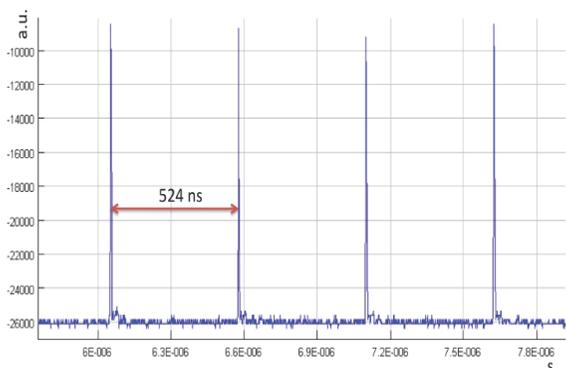
# Ricerca di eventuali distorsioni nello spettro CNGS

- Cohen and Glashow [Phys. Rev. Lett., 107 (2011) 181803] affermano che neutrini viaggianti a velocità superiore a quella della luce devono perdere energia mediante la produzione di coppie  $e^+e^-$  attraverso un processo mediato da  $Z_0$ , analogo alla radiazione Cherenkov.
- Sia la frequenza di produzione  $\Gamma$  che  $dE/dx$  sono proporzionali a  $\delta^3$  dove
 
$$\delta = (v_\nu^2 - c^2) / c^2$$
- La distribuzione dell'energia depositata  $E_{dep}$  in ICARUS da eventi di  $\nu_\mu$  CC e NC è stata confrontata con le simulazioni Monte Carlo per  $\delta = 0$  e  $\delta = 5 \times 10^{-5}$  [OPERA claim].
- Le distribuzioni risultanti sono in accordo con un valore di  $\delta = 0$ .
- L'assenza di eventi  $e^+e^-$  associati a  $\Gamma$  consente di porre un limite  $\delta = 2.5 \times 10^{-8}$  (90% CL).

[ICARUS Coll. and A. Cohen, Phys. Lett. B 711 (2012) 270]

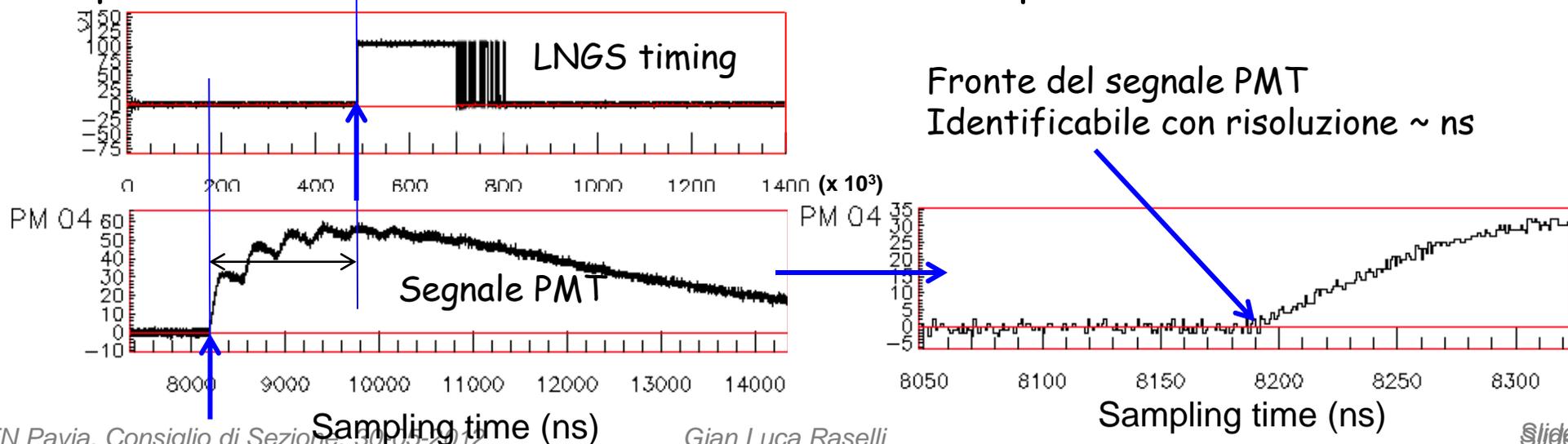


# Misura del tempo di volo dei neutrini CNGS



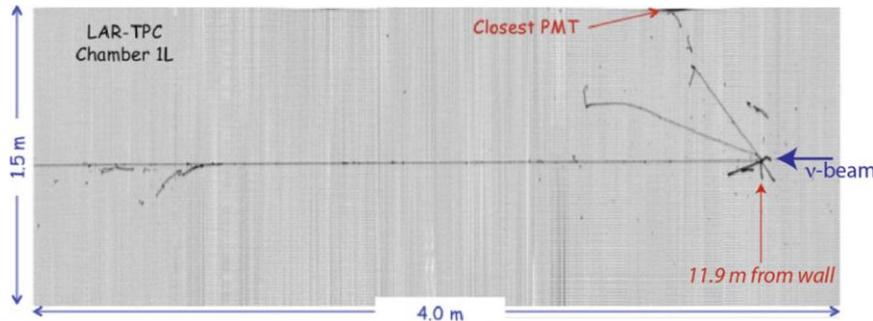
Nel periodo 21 ottobre / 6 novembre 2011, l'acceleratore SPS del CERN ha funzionato in un nuovo modo operativo a bassa intensità ( $\sim 10^{12}$  p.o.t protons-on-target per impulso) e con una struttura di fascio a 4 estrazioni "strette", ciascuna ampia  $\sim 3$  ns e separate da 524 ns.

Il sistema di lettura dei fotomoltiplicatori è stato integrato con campionatori a 8-bit 1GHz ACQIRIS AC240 (WARP). Quattro linee di segnale (una per ciascun piano di PMT) sono registrate insieme al segnale di tempificazione assoluta dei Laboratori (PPmS). Il sistema consente la determinazione del tempo assoluto di scintillazione con di risoluzione pochi ns.



# Risultati

In questo periodo ICARUS T600 ha raccolto 7 eventi in accordo con quanto aspettato per un flusso integrale di neutrini CNGS pari a  $2.2 \times 10^{16}$  p.o.t.



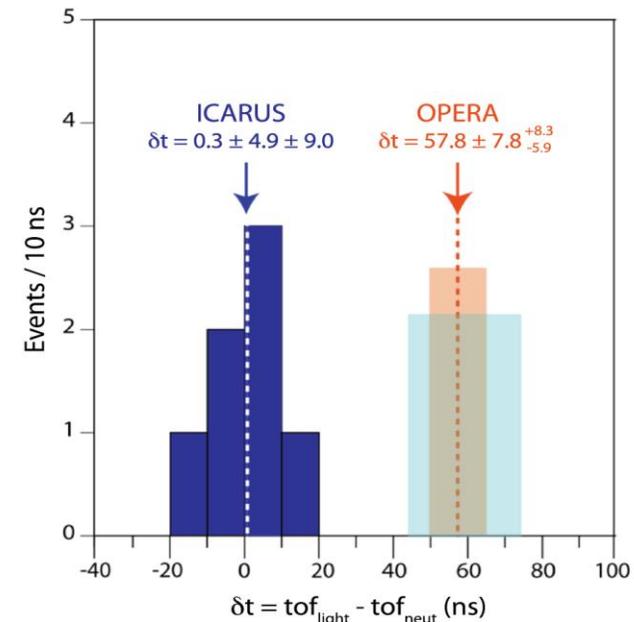
Ciascun evento è stato accuratamente ricostruito nel sistema di riferimento geometrico del rivelatore e sono state apportate tutte le correzioni temporali necessarie (posizione dei PMT, transito della luce, ritardo dei cavi e elettronica).

La differenza  $\delta t$  del tempo di volo tra la velocità della luce  $tof_{light}$  ed il tempo di arrivo dei neutrini  $tof_{neut}$  ottenuta è

$$\delta t = (0.3 \pm 4.9_{stat} \pm 9.0_{syst}) \text{ ns}$$

Il risultato è compatibile con un tempo di arrivo simultaneo di tutti gli eventi alla velocità della luce.

[ICARUS Coll. et al. in pubbl. su Phys. Lett. B]



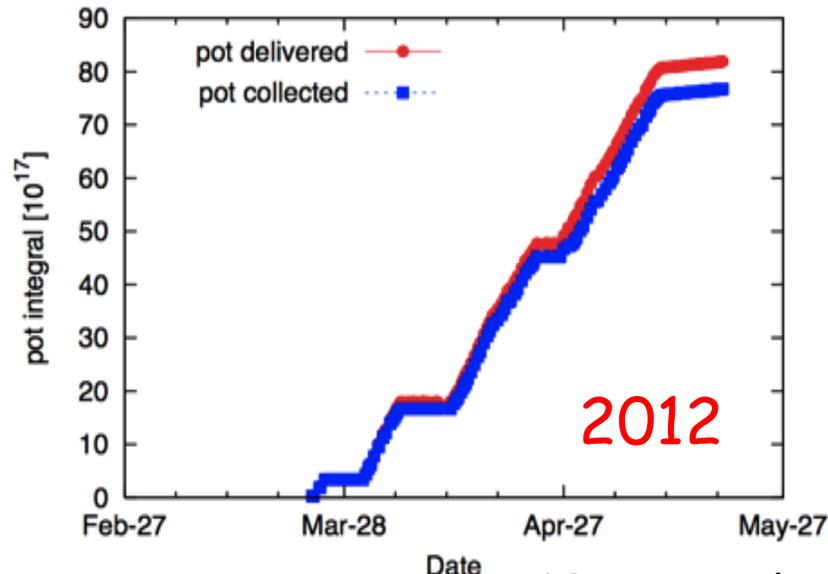
# Run con neutrini CNGS nel 2012

2012

---

Periodo di raccolta	Dal 23 Marzo
Pot forniti/raccolti	$8.28 \times 10^{18}$ / $7.7 \times 10^{18}$
Eff. operativa	93%

---



A maggio 2012 sono state ripetute per 10 giorni le condizioni operative del fascio CNGS a bassa intensità e con struttura di fascio a estrazioni "strette" per consentire una nuova misura del tempo di volo dei neutrini da parte degli esperimenti ICARUS, OPERA, LVD e BOREXINO

# ICARUS T600: prospettive di fisica per il 2012

- Il fascio di neutrini CNGS, con intensità di  $4.5 \times 10^{19}$  p.o.t./anno e energia  $E_\nu \sim 17 \text{ GeV}$ , consente al rivelatore ICARUS T600 la misura di:
  - 1300 eventi/anno di  $\nu_\mu$  Correnti Cariche;
  - $\sim 400$  eventi/anno di  $\nu_\mu$  Correnti Neutre;
  - $\sim 5500$  eventi/anno di  $\mu$  dalla roccia;
  - $\sim 12$  eventi/anno di  $\nu_e$  Correnti Cariche ( $\nu_e$  intrinseci al fascio);
  - 1.3 eventi/anno  $\nu_\tau$  nel canale elettronico mediante criteri cinematici;
  - La ricerca di neutrini sterili nello spazio dei parametri di LSND, dalla misura dell'eccesso di eventi tipo  $\nu_e$  Correnti Cariche ad  $E > 10 \text{ GeV}$ ;
  - 2.2 eventi/anno  $\nu_e$  Correnti Cariche ad  $E < 10 \text{ GeV}$  ( $\theta_{13}$ );
  - La misura diretta della velocità del neutrino mediante l'analisi dei tempi di volo CERN-LNGS, in particolare sfruttando il periodo di fascio dedicato ad estrazioni "strette" di maggio 2012.
- $\sim 100$  eventi/anno di  $\nu$  Correnti Cariche associate a  $\nu$  atmosferici.
- La massa sensibile del rivelatore ( $\sim 3 \times 10^{32}$  nucleoni) consente la ricerca di decadimenti del nucleone in canali esotici privi di fondo.

# La road-map di ICARU T600 dopo il 2012

- A fine 2012 o inizio 2013 è prevista la chiusura del fascio CNGS.
- Nel 2013 ICARUS T600 continuerà la presa dati per completare il programma di fisica sui neutrini atmosferici e sulla ricerca del decadimento del nucleone oltre all'analisi dei dati registrati.
- Grazie alle caratteristiche spaziali e calorimetriche del rivelatore, è stato proposto un suo utilizzo come "far detector" su un nuovo fascio di neutrini al CERN-SPS per risolvere alcune anomalie osservate nelle oscillazioni di neutrini e associate all'esistenza di stati di "neutrino sterile".
- Tuttavia un piano preciso della tempistica e delle attività che portino alla conclusione della fase sperimentale di ICARUS T600 al Gran Sasso potrà essere formulato soltanto all'approvazione definitiva del nuovo programma di ricerca da parte delle agenzie finanziatrici (INFN, CERN,...).

# Conclusioni

- ICARUS T600 è in presa dati in maniera stabile ai LNGS da ottobre 2010.
- Le caratteristiche di visualizzazione tridimensionale insieme alla risoluzione spaziale e calorimetrica consentono la ricostruzione e identificazione di eventi in maniera unica rispetto ad altri tipi di rivelatore.
- La presa dati con fascio CNGS durante il 2011-2012 offre la possibilità di misura di alcuni eventi di  $\nu_\tau$ .
- Interessanti prospettive di misura sono inoltre attese per i neutrini atmosferici, i neutrini sterili ed il decadimento del protone.
- La messa in esercizio di ICARUS T600 rappresenta una pietra miliare nella realizzazione di futuri rivelatori.
- La tecnica delle Lar-TPC può essere quindi utilizzata per risolvere alcune anomalie osservate nelle oscillazioni di neutrini e associate all'esistenza di stati di "neutrino sterile": a tale scopo è attualmente proposta una campagna di ricerca presso un nuovo fascio di neutrini al CERN-SPS (al termine della presa dati presso i LNGS).