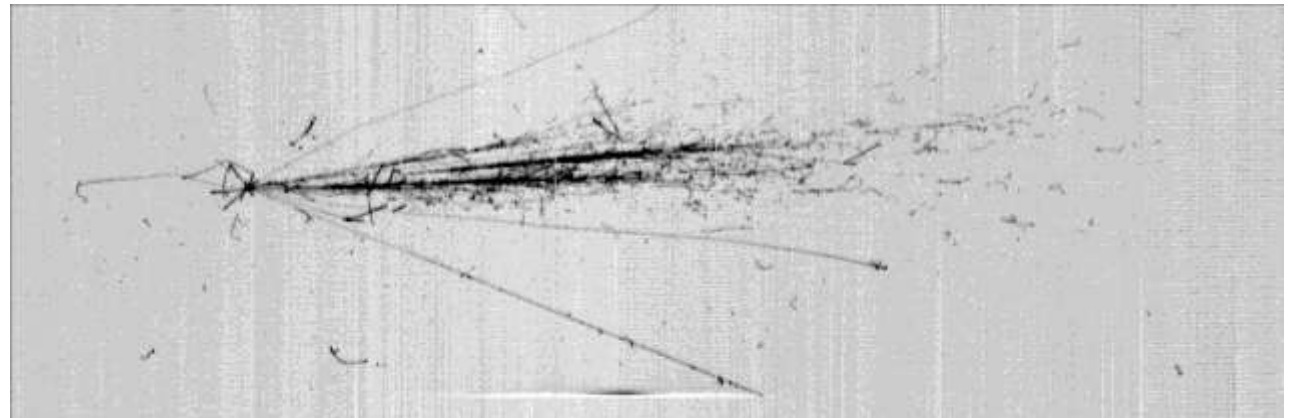


# ICARUS T600: status and perspectives of liquid Argon technology for neutrino physics



Gian Luca Raselli  
(INFN-PV)  
ICARUS Collaboration

IFAE 2012  
Ferrara 13/04/2012



# The ICARUS Collaboration



## Italy

M.Antonello, P.Aprilli, N.Canci, C.Rubbia, E.Segreto, D.Stefan, C.Vignoli: *LNGS - INFN, Assergi*

E.Scantamburlo: *Dipartimento di Fisica, University of L'Aquila*

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, Padova*

P.Benetti, E.Calligarich, R.Dolfini, A.Gigli Berzolari, A.Menegoli, C.Montanari, A.Rappoldi, G.L.Raselli, M.Rossella:

*Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica e INFN, Università di Pavia, Pavia*

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

A.Cesana, P.Sala, A.Scaramelli, M.Terrani: *INFN, Sezione di Milano e Politecnico, Milano*

G.Mannocchi, L.Periale, P.Picchi: *Laboratori Nazionali di Frascati (INFN), Frascati*

F.Sergiampietri: *Dipartimento di Fisica, Università di Pisa, Pisa*

## Poland

K.Cieřlik, A.Dąbrowska, M.Harańczyk, T.Wąchała, M.Szarska, A.Zalewska: *The Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Science, Kraków*

T.Golan, J.Sobczyk, J.Żmuda: *Institute of Theoretical Physics, Wrocław University, Wrocław*

J.Holeczek, J.Kisiel, I.Kochanek, S.Mania: *Institute of Physics, University of Silesia, Katowice*

J.Łagoda, T.J.Palczewski, P.Przewłocki, J.Stepaniak, R.Sulej: *A. Soltan Institute for Nuclear Studies, Warszawa*

P.Łoński, K.Zaremba: *Institute for Radioelectronics, Warsaw University of Technology, Warsaw*

## USA

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

## Russia

A.Dermenev, S.Gninenko, M.Kirsanov: *INR RAS, Moscow*

## Switzerland

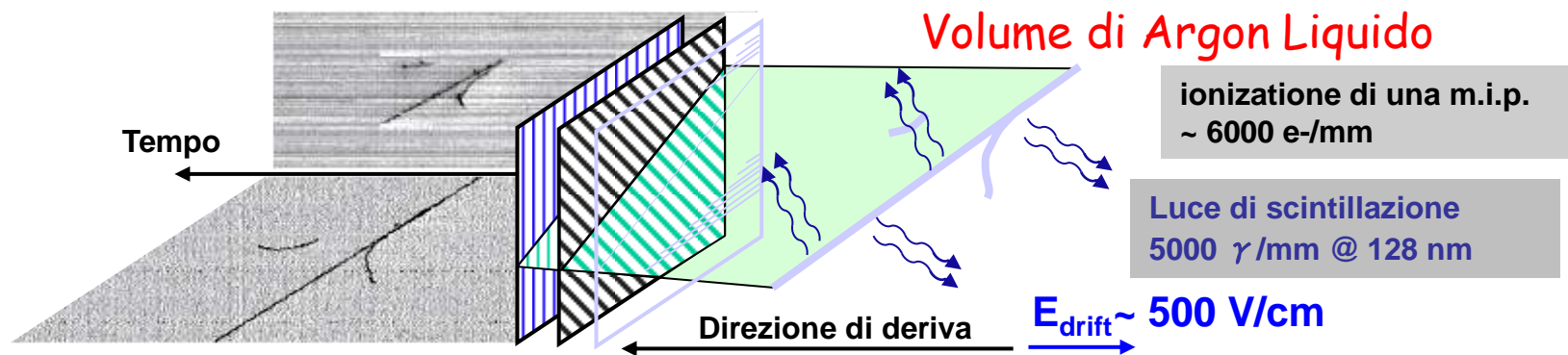
A.Ferrari: *CERN, Geneva*

- La tecnologia delle Camere a Proiezione Temporale ad Argon Liquido LAr-TPC.
- Il rivelatore ICARUS T600.
- Alcuni risultati preliminari con il Run 2010/2011:
  - 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.
- Prospettive future della tecnologia delle LAr-TPC: ricerca ricerca di anomalie nelle oscillazioni di neutrini - neutrini sterili - al CERN.

# 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 autotriggerante
- possiede un'elevata granularità (~1 mm)
- offre eccellenti proprietà calorimetriche
- possibilità di identificare le particelle ionizzanti tramite  $dE/dx$  vs range

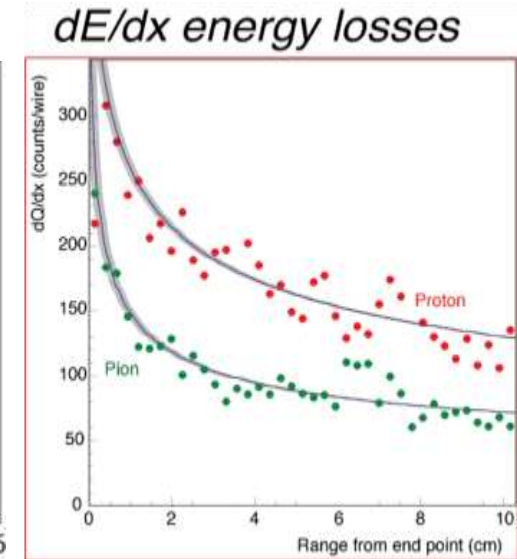
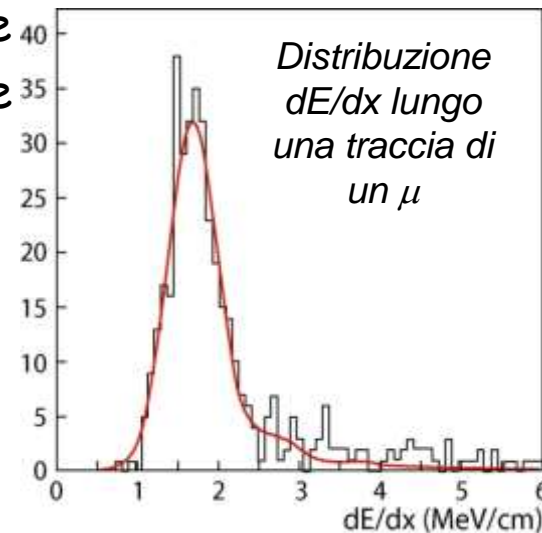
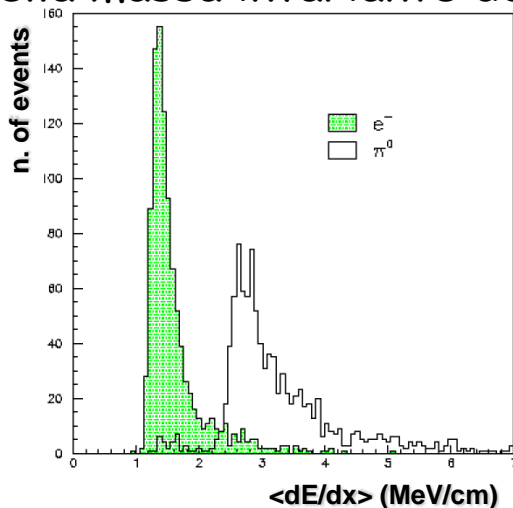
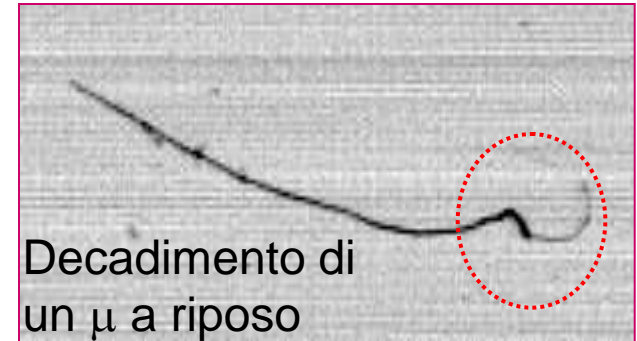


Gli elettroni di ionizzazione sono diffusi nell'Argon Liquido tramite un campo elettrico di deriva  $E_{drift}$ . Nell'attraversamento di piani di fili conduttori orientati lungo differenti direzioni, viene indotto un segnale elettrico. L'elettronica è strutturata come un oscillografo che memorizza su 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

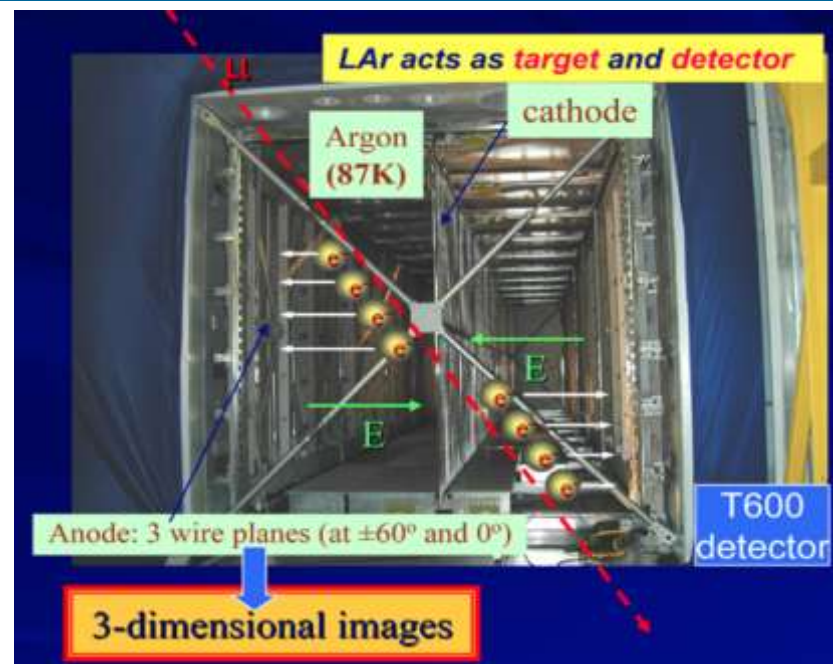
- Dispositivo tracciante:
  - Elevata granularità ( $s_{x,y} \sim 1\text{mm}$ ,  $s_z \sim 0.4\text{mm}$ )
  - Ricostruzione del momento di un  $\mu$  passante via scattering multiplo:  $\Delta p/p \sim 10\text{-}15\%$
  - Ricostruzione dell'energia totale dalla carica di ionizzazione
- La misura locale 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 1mV/ADC  $\sim 1000e^-/\text{ADC}$

## ■ 4 camere a fili:

- 2 camere per modulo
  - 3 piani di fili per camera a 0° , ±60°
  - 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

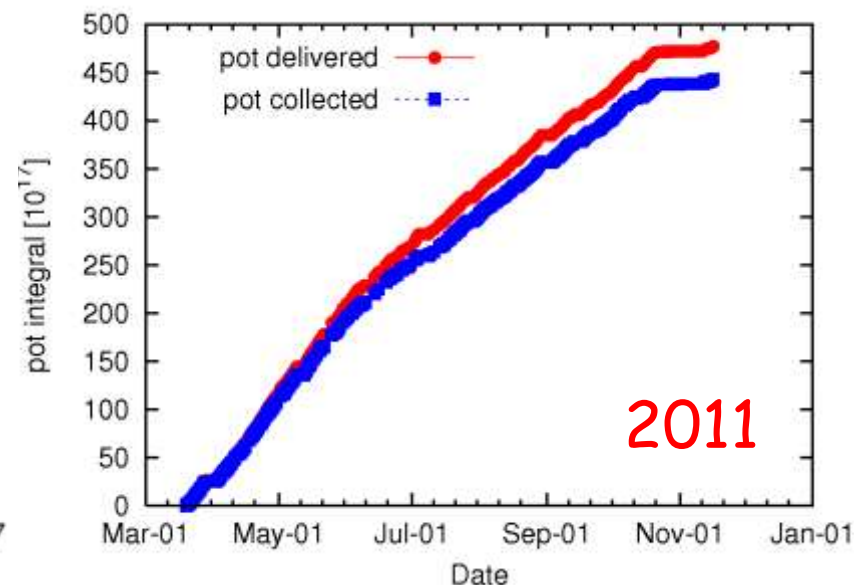
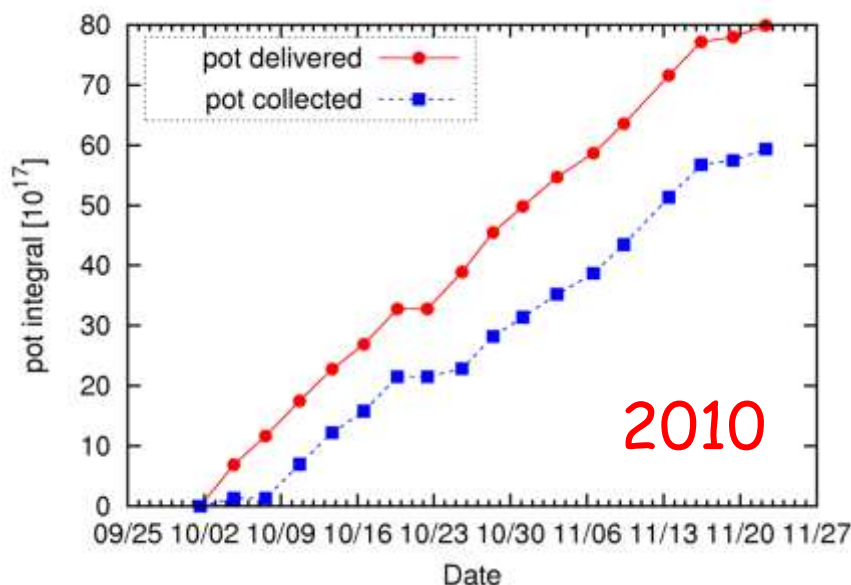
- L'apparato è dotato di un impianto criogenico che mediante 12 liquefattori di N<sub>2</sub> (48 kW di potenza criogenica totale) consente il mantenimento delle condizioni di temperatura (87K) operative del rivelatore.
- Un sistema di pompaggio/filtraggio/ricircolo dell'Argon in fase liquida consente il raggiungimento di elevati livelli di purezza fino a 6-7ms di vita media degli elettroni di drift (minimo richiesto 1.5ms, target 3ms):

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

- 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 2012;
  - **Primo evento di neutrini CNGS 28 maggio 2012 alle 19:54;**
  - Ottimizzazione del detector nell'estate 2010
  - In condizioni regolari di presa dati dal 1 ottobre 2010.

# Run con neutrini CNGS nel 2010 e 2011

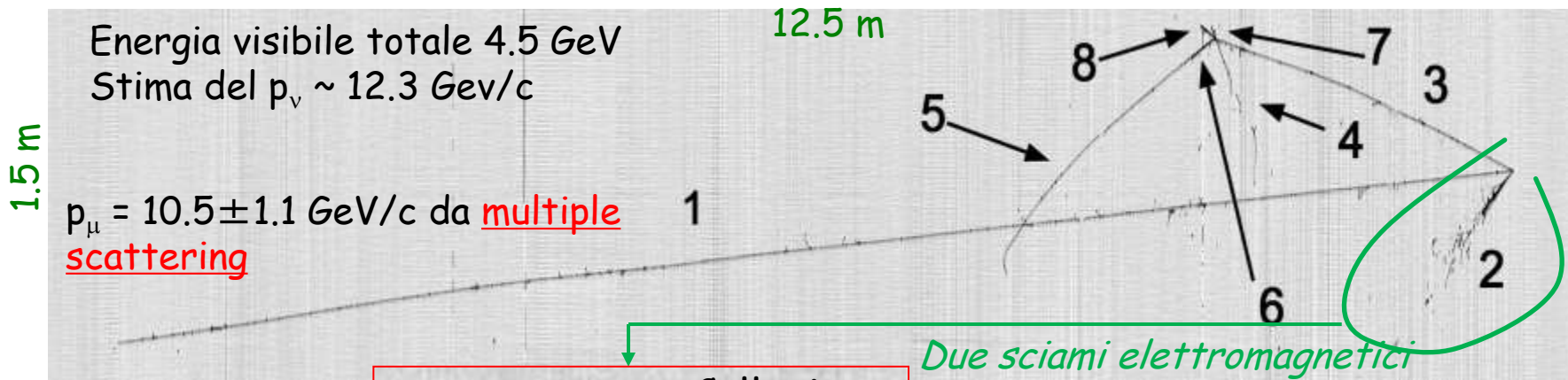
	2010	2011
Periodo di raccolta	Ottobre-Novembre	Marzo-Novembre
Pot forniti/raccolti	$8 \times 10^{18}$ / $5.8 \times 10^{18}$	$4.78 \times 10^{19}$ / $4.44 \times 10^{19}$
Eff. operativa	90% (dal 1/11/2010)	93%



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



# Analisi dati



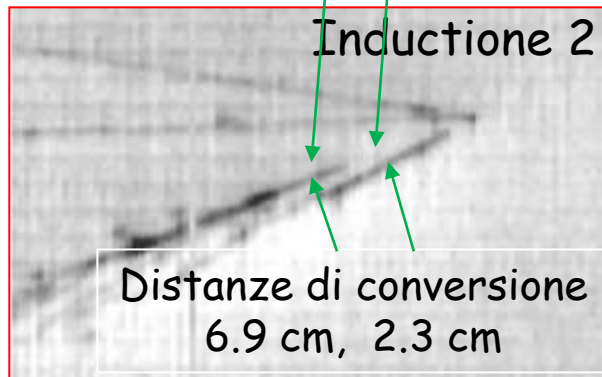
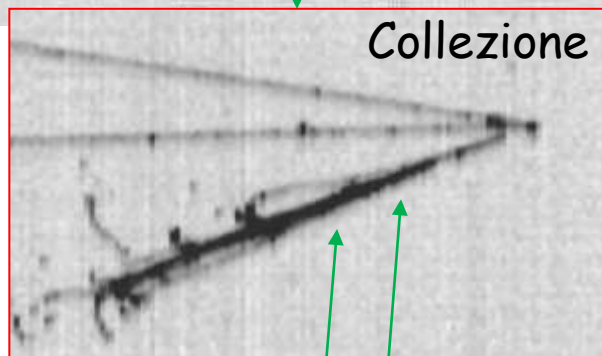
## Vertice primario (A)

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

## Vertice secondario (B)

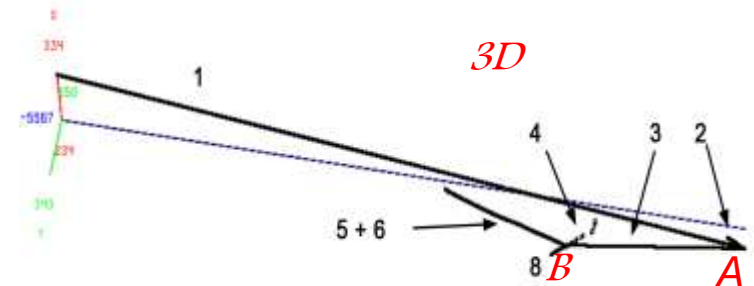
La traccia (5) è un  $\mu$  generato dallo stop di un  $k$  (6). È visibile anche il decadimento del  $\mu$ .

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

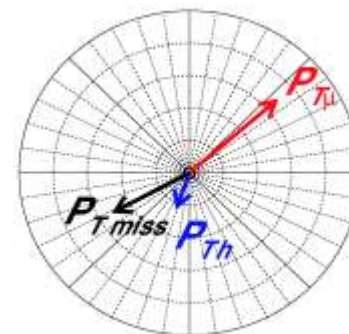


$$M_{\gamma\gamma}^* = 125 \pm 15 \text{ MeV}/c^2$$

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.

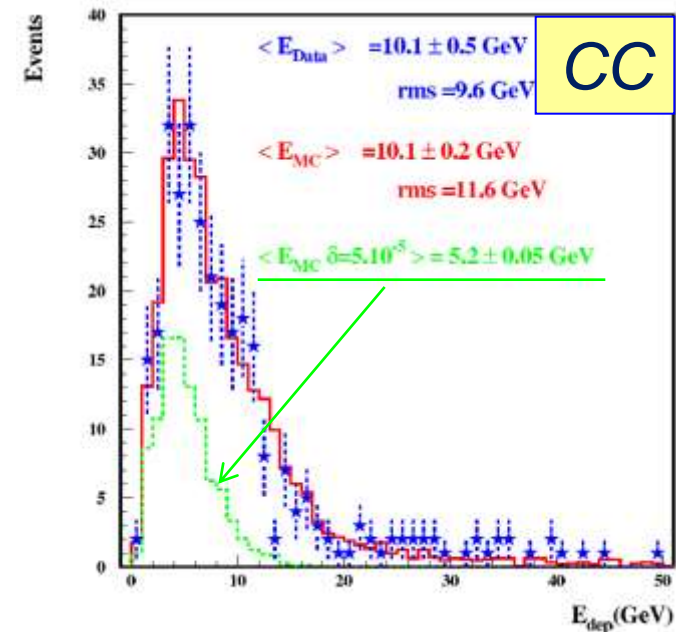
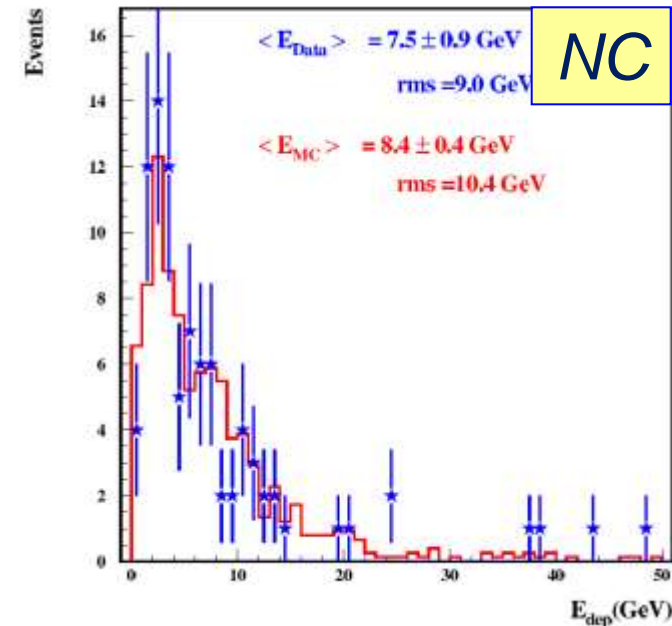


Momento trasverso totale  $\sim 250 \text{ MeV}$  (consistente con il momento di Fermi)

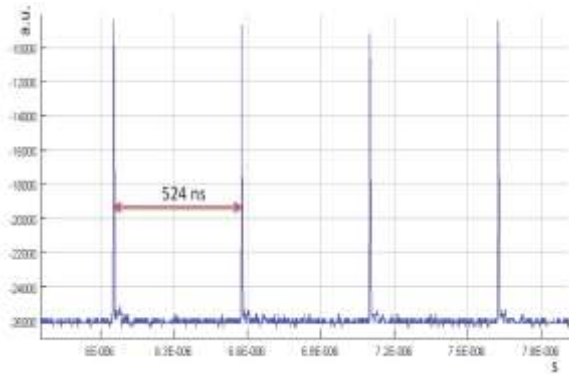
# Ricerca di eventuali distorsioni nello spettro CNGS

- Cohen and Glashow [Phys. Rev. Lett., 107 (2011) 181803] hanno ipotizzato che neutrini viaggianti a velocità superiore a quella della luce possano 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, arXiv:1109.6562]

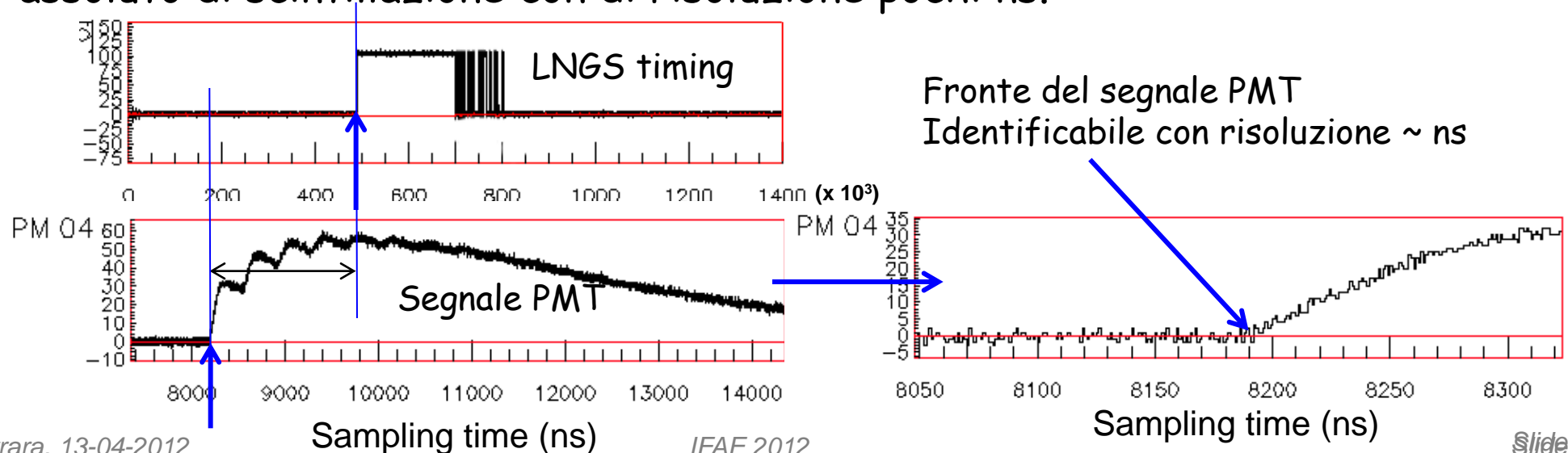


# Misura del tempo di volo dei neutrini CNGS



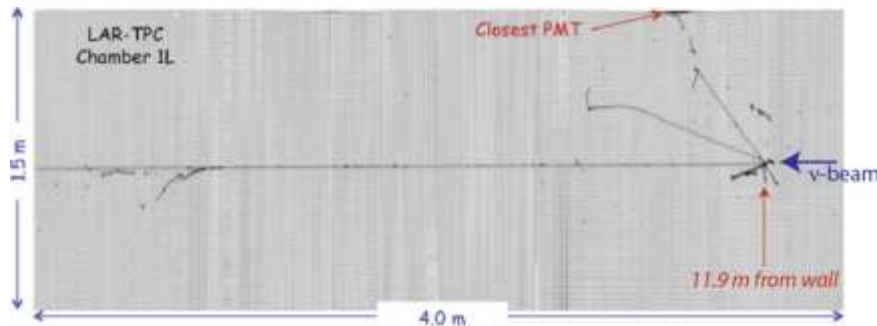
Nel periodo 21 ottobre / 6 novembre 2011, l'acceleratore SPS del CERN ha funzionato in un nuovo modo operativo a bassa intensità ( $\sim 10^{12}$  p.o.t protons-on-target per impulso) e con una struttura di fascio a 4 estrazioni "strette", ciascuna ampia  $\sim 3$  ns e separate da 524 ns.

Il sistema di lettura dei fotomoltiplicatori è stato integrato con campionatori a 8-bit 1GHz ACQIRIS AC240. 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.



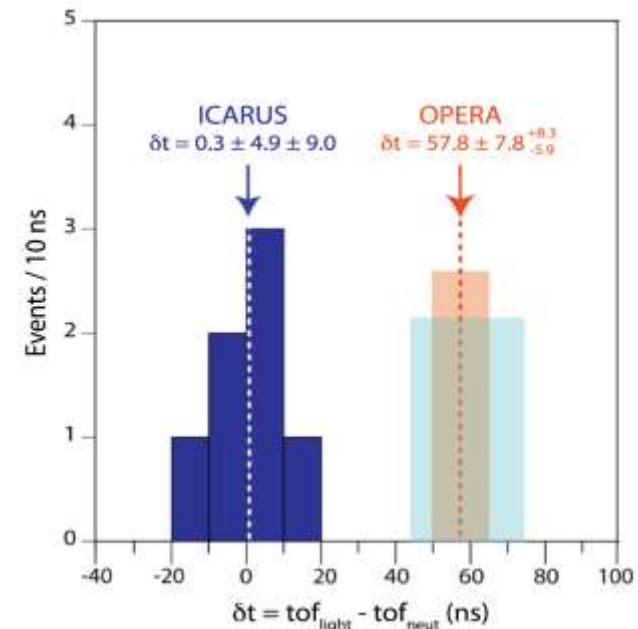
Ciascun evento è stato accuratamente ricostruito nel sistema di riferimento geometrico del rivelatore e sono state apportate tutte le correzioni temporali necessarie (posizione dei PMT, transito della luce, ritardo dei cavi e elettronica).

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. arXiv:1203.3433]



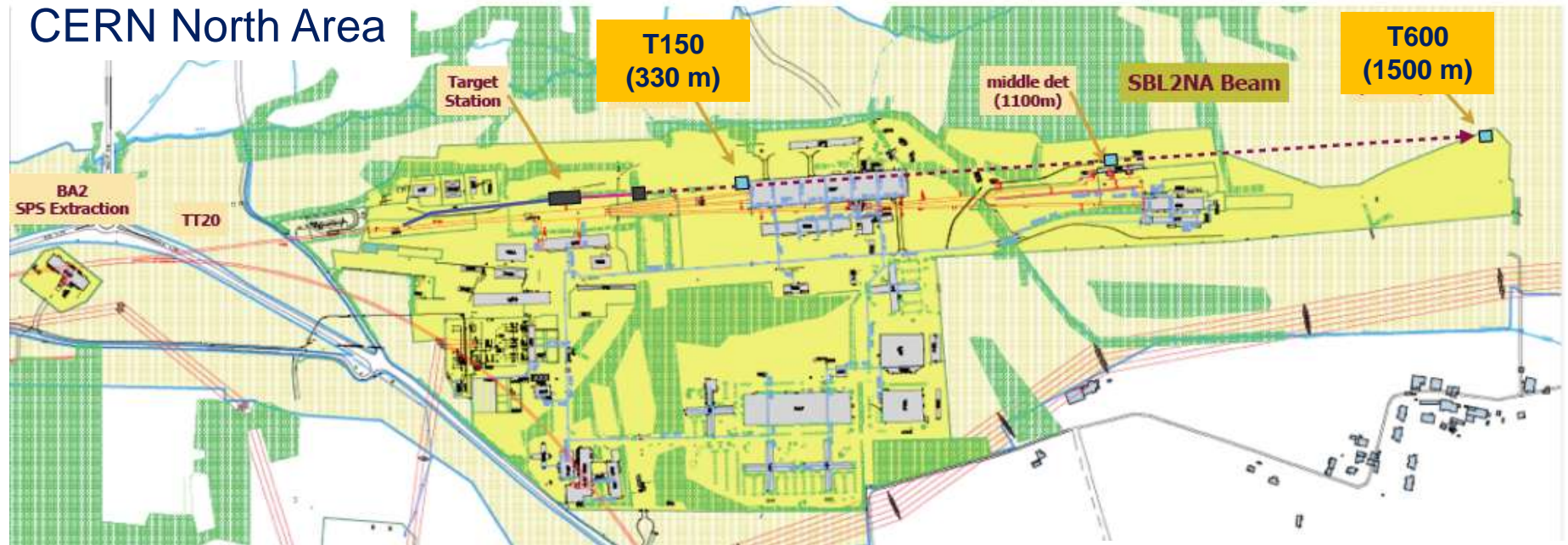
# ICARUS T600: prospettive di fisica per il 2012

- 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;
  - L'osservazione di  $\nu_\tau$  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  $E > 10 \text{ GeV}$ ;
  - La misura della velocità del neutrino mediante l'analisi sulla frequenza di produzione eventi  $e^+e^-$  sull'energia depositata nel rivelatore;
  - 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" previsto a maggio 2012.
- $\sim 80$  eventi/anno di  $\nu$  Correnti Cariche associate a  $\nu$  atmosferici.
- Ricerca di decadimenti del nucleone in canali esotici.

# La tecnologia Lar-TPC dopo il 2012

- Il rivelatore ICARUS T600 può essere considerato una pietra miliare verso la realizzazione di rivelatori LAr-TPC di maggiore scala.
- Grazie alle caratteristiche spaziali e calorimetriche, alla risoluzione, alla possibilità di riconoscimento  $e/\pi^0$  e alla visualizzazione 3D tipo "camera a bolle" elettronica, la tecnologia delle Camere a Proiezione Temporale ad Argon Liquido offre interessanti prospettive per la fisica dei neutrini anche dopo la chiusura del fascio CNGS, come il suo utilizzo per l'interpretazione definitiva di apparenti anomalie osservate nelle oscillazioni di neutrini - neutrini sterili:
  - *Scomparsa di segnale* (1) da eventi di anti- $\nu_e$  misurati in prossimità di reattori nucleari e (2) in eventi di calibrazione da sorgenti di  $^{51}\text{Cr}$  e  $^{37}\text{Ar}$  con esperimenti su neutrini solari (SAGE/GALLEX)
  - *Eccesso di segnale* in eventi associati a  $\nu_e$  in esperimenti con neutrini prodotti da acceleratori (LNSD/MiniBooNE)
- Suggesta l'esistenza di un quarto stato di neutrino non-standard responsabile di oscillazioni su breve distanza con  $\Delta m_{\text{new}}^2 \geq 1 \text{ eV}^2$  e angolo di mixing relativamente grande  $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) \approx 0.1$ .

Due rivelatori LAr-TPC (ICARUS) integrati da spettrometri per  $\mu$  (NESSIE)



## Caratteristiche del nuovo fascio SPS di neutrini:

- Energia del fascio primario 100 GeV ( $E_{\nu} \sim 2 \text{ GeV}$ )
- Intensità  $2 \times 10^{13}$  p.o.t./spill -  $4.5 \times 10^{19}$  p.o.t./yr
- Bersaglio a  $\sim 11$  m sotto-terra
- Tunnel di decadimento lungo 100 m,  $\varnothing = 3$  m
- Beam dump, 15 m di Fe/grafite
- Angolo di divergenza dei neutrini  $\sim 5$  mrad

## "Far Detector"

ICARUS T600

1500m dal bersaglio

## "Near Detector"

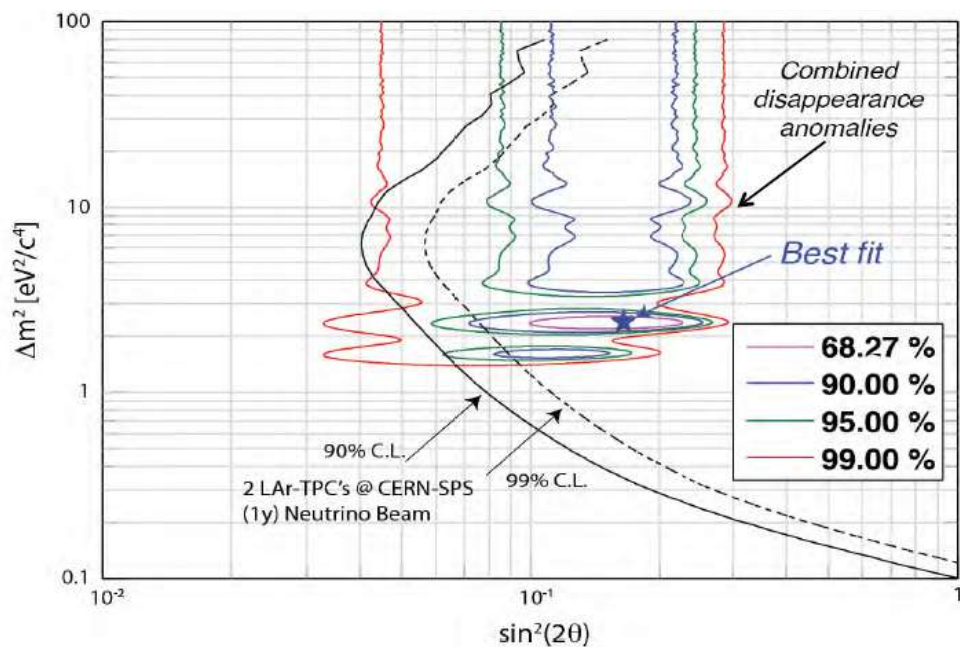
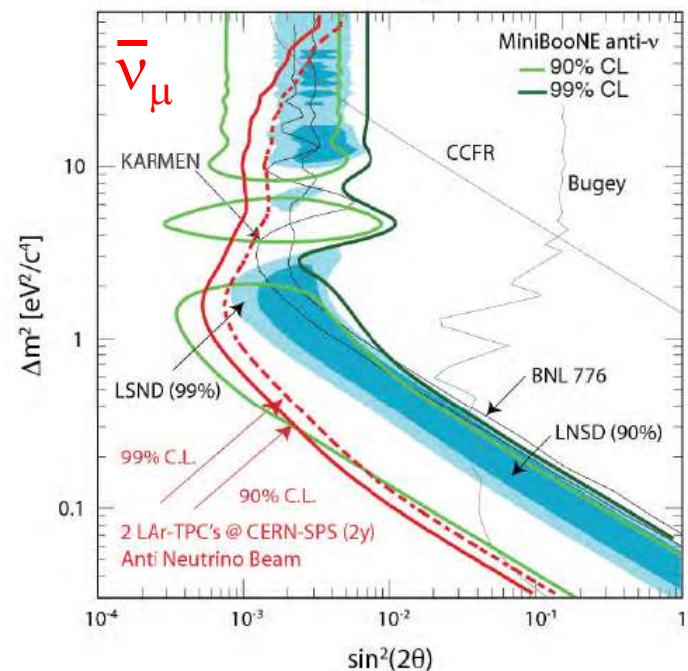
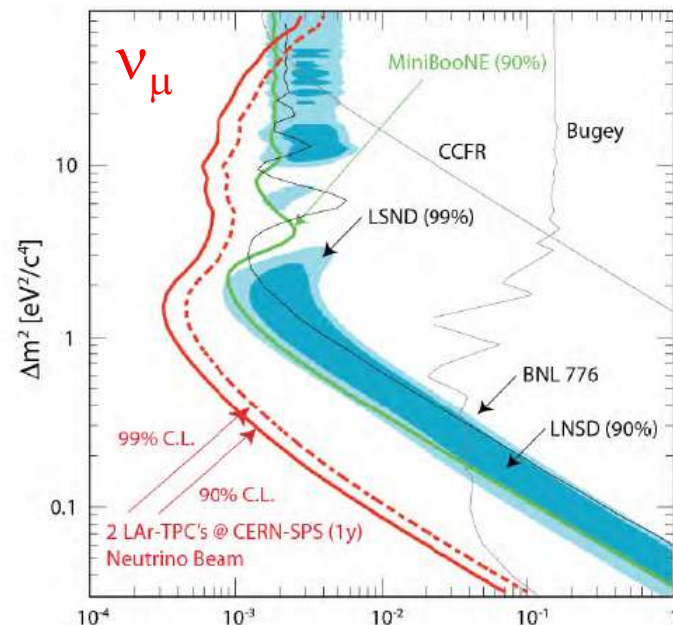
Un nuovo rivelatore T150  
(150t LAr)

330m dal bersaglio

Plot di sensibilità (per eccesso di segnale a destra, per scomparsa di segnale sotto) per l'esperimento proposto su fascio di neutrini al CERN-SPS:

I valori sono stimati con fascio di  $\nu_\mu$  anti- $\nu_\mu$  per intensità di rispettivamente di  $4.5 \times 10^{19}$  p.o.t (1 anno) e di  $9.0 \times 10^{19}$  p.o.t (2 anni).

Le regioni in cui sono state osservate anomalie nelle oscillazioni sono esplorate completamente.





# 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).