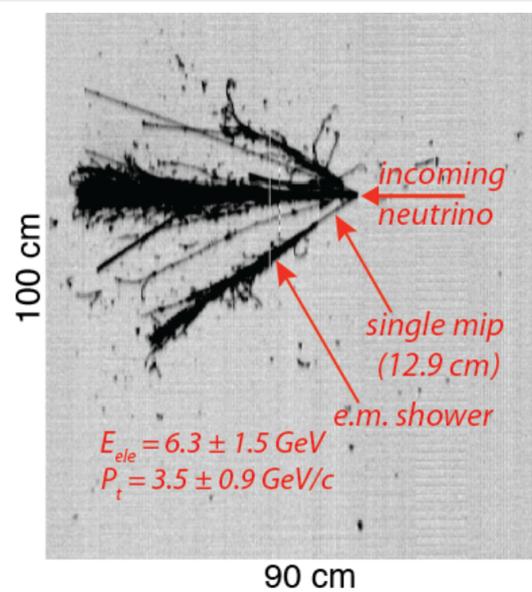
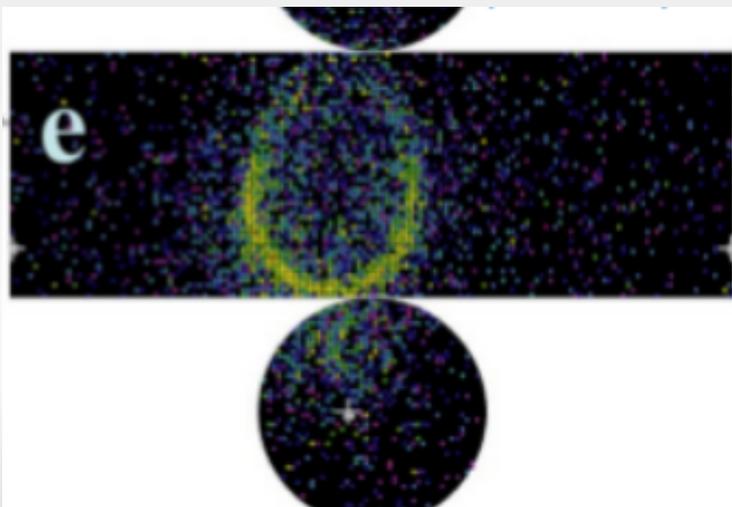
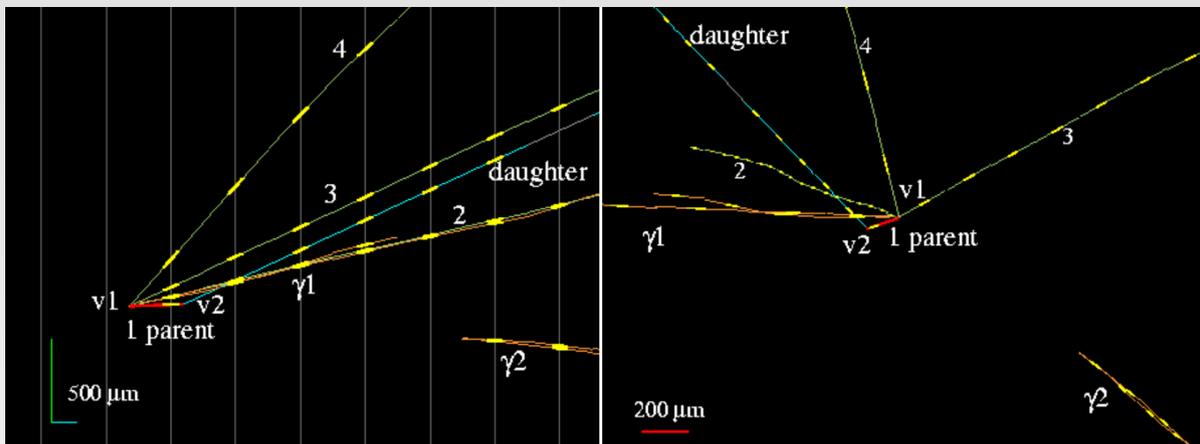


Rassegna sulle ~ oscillazioni ~ di neutrino

IFAE, GSSI/LNGS
9 Aprile 2014

Andrea Longhin
INFN LNF



Laboratori Nazionali di Frascati



Premessa e contenuti

- Risultati recenti/interessanti nei canali di “**appearance**”
 - $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ e $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ con fasci di neutrini da acceleratori
 - + interludio breve sulla “disappearance” $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$
- Visto anche il limite di tempo mi sono concentrato su questi punti rinunciando a un'approccio piu' esaustivo
- E rincuorante notare che questa impostazione e' compatibile con la scelta di concentrarci su esperimenti con importanti contributi INFN (**OPERA, ICARUS, T2K**)!

Mescolamento dei ν e oscillazioni

Autostati di massa (ν_1, ν_2, ν_3) \leftrightarrow autostati deboli (ν_e, ν_μ, ν_τ) $|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i}^* |\nu_i(t)\rangle$

U: la "matrice Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata" \sim CKM per i quarks

Δm_{31}^2

Δm_{21}^2

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{-i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

SuperK, K2K, MINOS, OPERA, ICARUS, T2K

Chooz, Daya Bay, RENO
T2K, MINOS, NOvA

SuperK, SNO, KamLAND

atmospheric+LBL

Chooz

solar+KamLAND

Il piu' recente grosso progresso e' stata la misura di θ_{13} , nel 2012. Poteva essere una "missione impossibile" invece ... ora e' l'angolo che conosciamo meglio. Apre la strada alla CP violation.

$\sin^2 2\theta_{13}$

< 0.15 – prima del 2012 – limite di CHOOZ (90% CL)
0.11 (0.14) – best fit di T2K del 2011 (2.5 σ)
0.092 \pm 0.017 – Daya Bay, 2012 (5.2 σ)

prerogativa degli
esperimenti long-baseline

Ancora incognite: gerarchia delle masse, **violazione di CP ?**

Majorana/Dirac ? Il mixing atmosferico e' massimale ($\theta_{23} = 45^\circ$?) Simmetrie ?

La "lunga strada" verso l'appearance

- **Scomparsa** dei ν_μ effetto "leading": deficit atmosferici (1998)
 - scoperta oscillazioni Super-KAMIOKANDE, MACRO

Al contrario se guardiamo all'**appearance**:

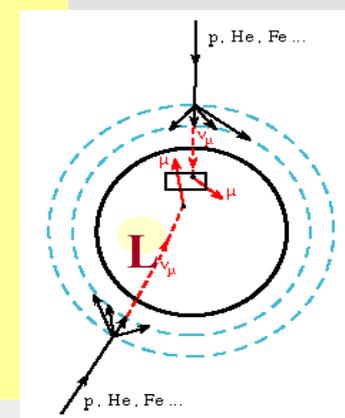
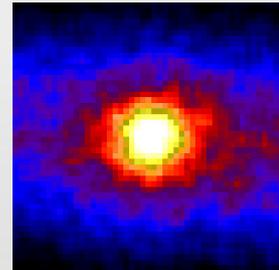
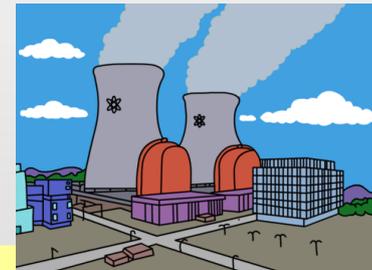
Alla **scala solare**: Sorgenti: reattori e ν solari

$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ stato finale con μ **sotto soglia!** (SNO conta i NC)

Alla **scala atmosferica** Sorgenti: ν atmosferici, fasci artificiali

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ stato finale **"RARO"**! soppressione da θ_{13} ?

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ stato finale **"DIFFICILE"** ! (per massa e σ)



Com'e' "andata a finire" ?

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ Rivelazione (evento-per-evento): una sfida sperimentale e ingegneristica di primo livello.

Fascio $O(10)$ piu' energetico (17 GeV) di ogni altro LBL ($m(\tau)$)

Rivelatori "fine-grained $O(100)$ piu' massicci dei predecessori SBL (i.e. CHORUS)

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

- Nuovo fascio (0.6 GeV) \rightarrow grande Water-Cherenkov pre-esistente (SK).

- Nuovo rivelatore vicino per caratterizzare i fondi e la normalizzazione.

- Scomparsa anti- ν_e ai reattori (2012, Daya-Bay, RENO, DCHOOZ) θ_{13} **si e' rivelato "grande" !**

T2K



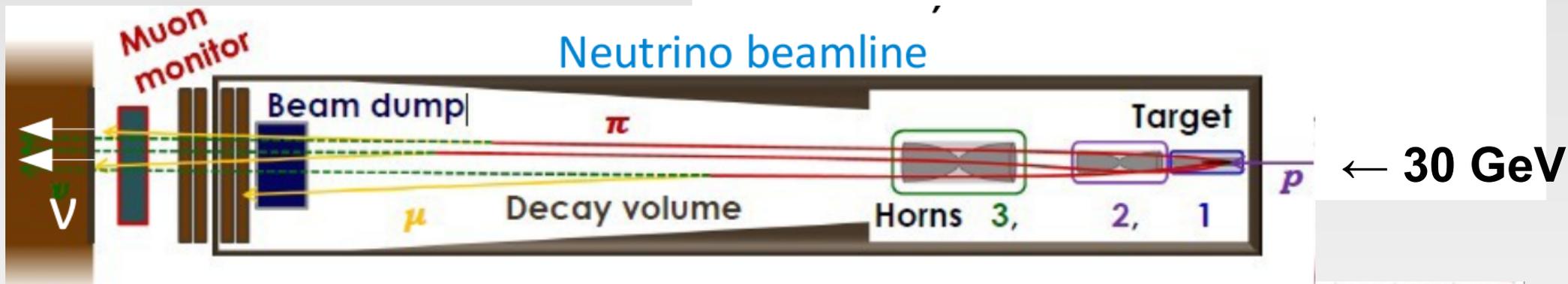
Ricerca di oscillazioni in un fascio di ν_μ

Apparizione di ν_e – sensibile a θ_{13} e δ_{CP}

Scomparsa di ν_μ – sensibile a θ_{23} e Δm_{23}^2

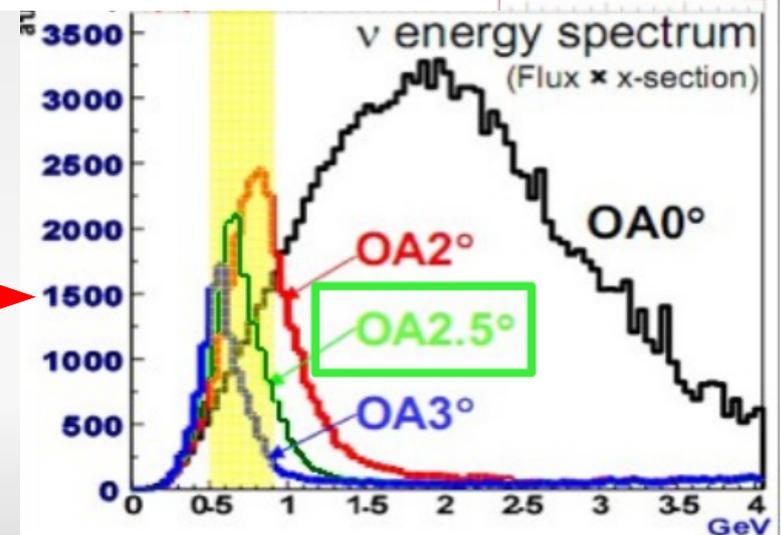
Inoltre: sezioni d'urto, ν sterili, effetti inattesi ?

~ 500 membri, 59 istituti, 11 paesi

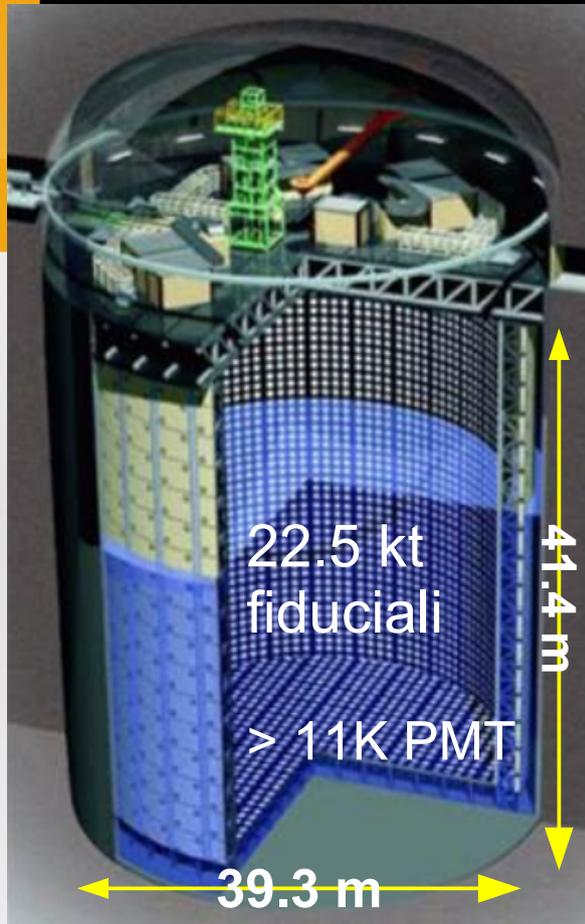


Primo fascio “off-axis”

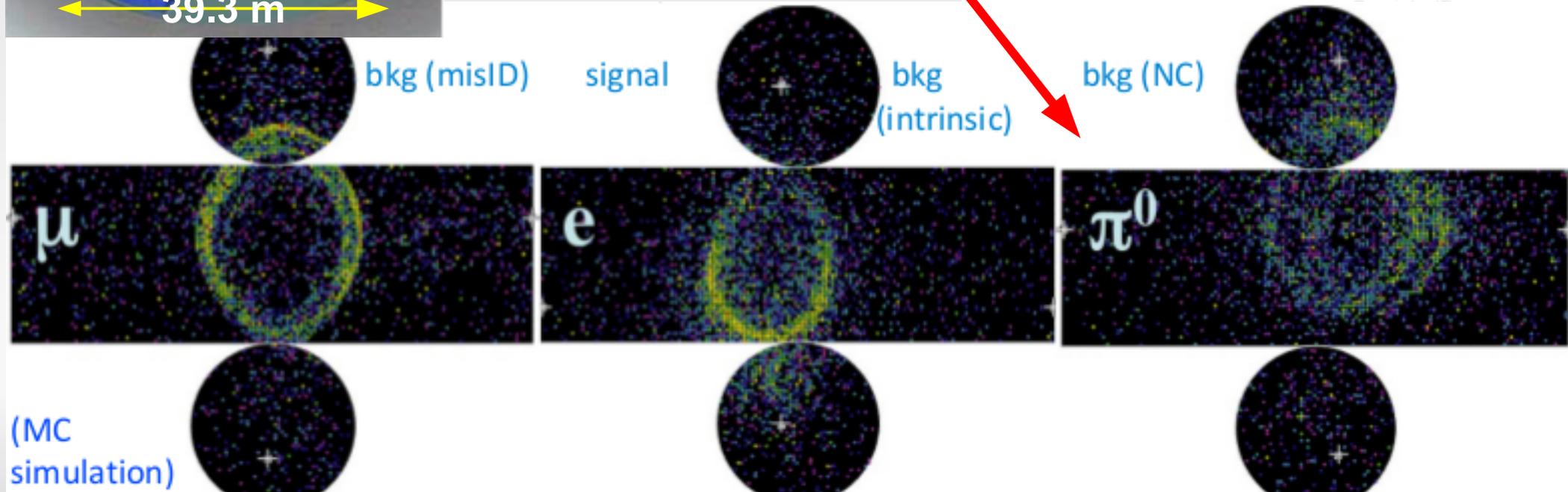
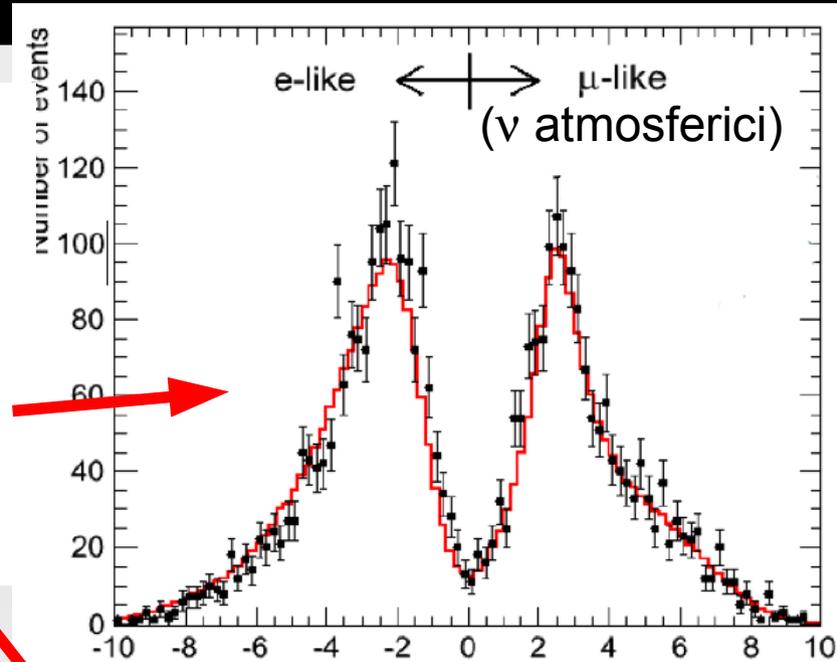
- 2.5° → picco a ~ 0.6 GeV
- Campione arricchito in interazioni quasi-elastiche (buona misura di E_ν)
- Ridotto fondo da ν_e intrinseci
- Ridotto fondo da NC π^0 (\sim poco D.I.S.)
- Doppio rivelatore **a 280 m e 295 km**



Il rivelatore a 295 km: Super-Kamiokande



- Water Cherenkov
 - $\Delta E/E \sim 10\%$ per le interazioni quasi-elastiche (QE)
- Ottima separazione μ/e
- Rivelazione dei π^0
 - 2 anelli “e-like”



Apparizione dei ν_e

Eventi attesi nel volume fiduciale:

Segnale $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$: (20.4 ± 1.8)

(per $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$, $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$, $\delta_{CP} = 0$, N.I.)

Fondo: (4.64 ± 0.53)

- **3.2** – contaminazione di ν_e nel fascio
- **0.9** – da ν_μ NC con π^0 (rimosso il 70% del fondo non rigettato dall'analisi precedente)
- 0.4 – ν_e (dal termine "solare")
- 0.3 – da anti- ν

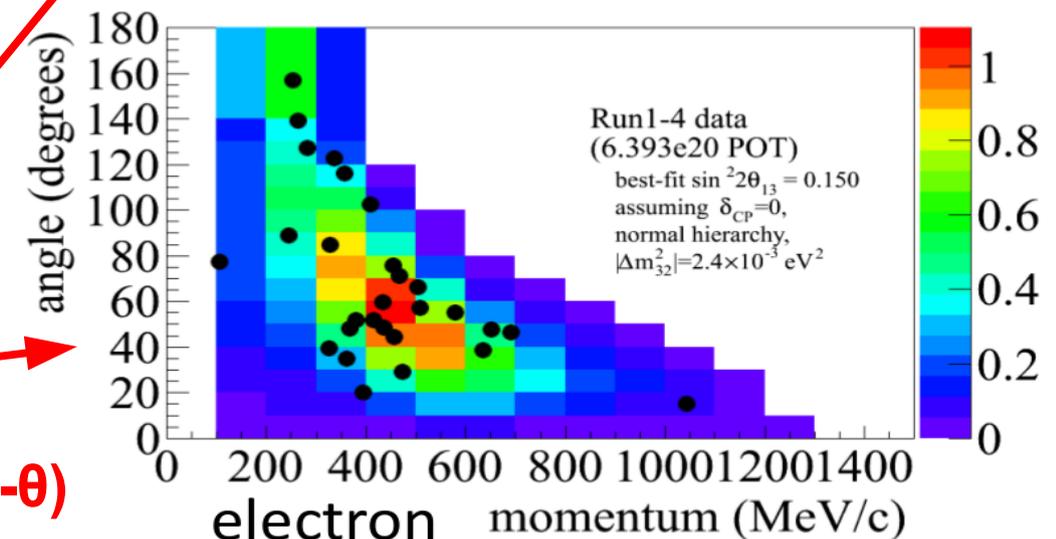
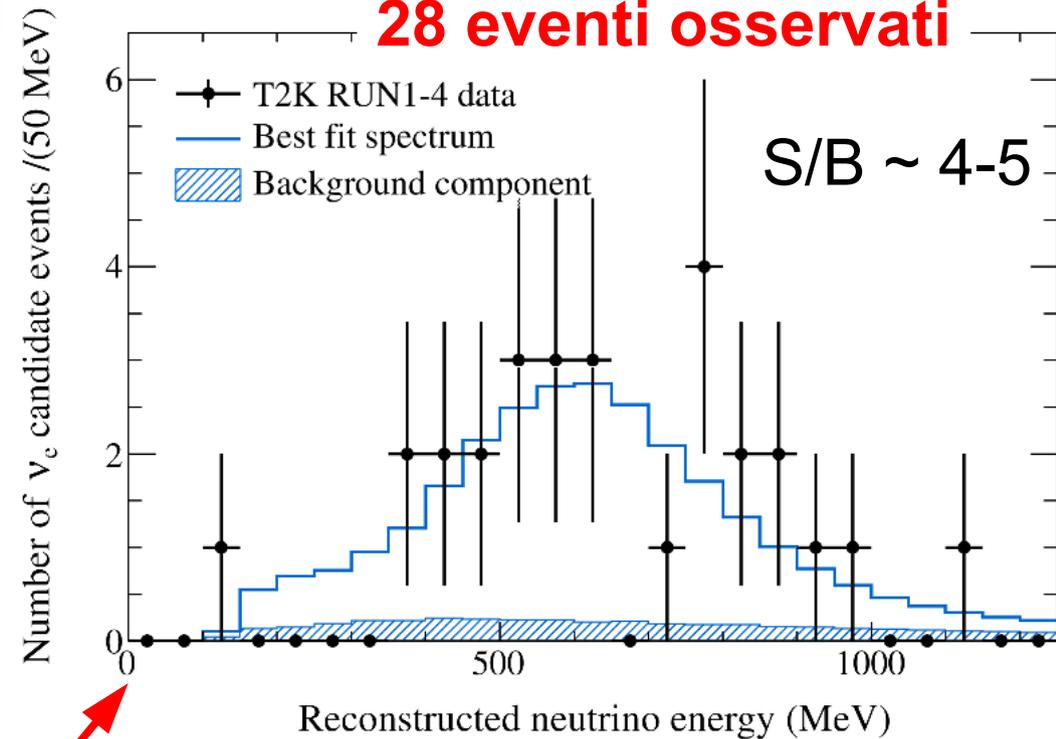
Esclusione attesa di $\{\theta_{13} = 0\}$: 5.5σ

Due analisi indipendenti:

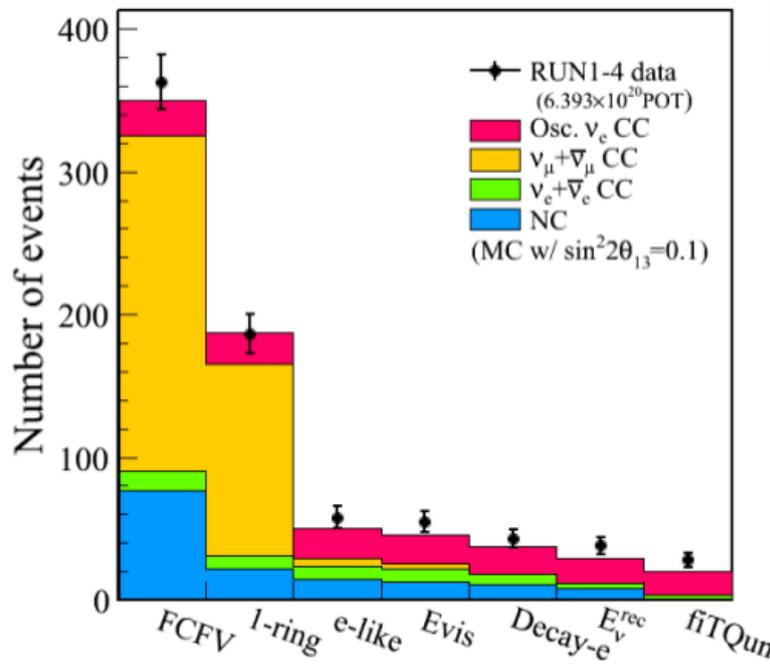
- 1) spettro dell'E ricostruita del ν_e
- 2) distribuzione in θ e p dell'e

Significanza di 7.5σ per $\theta_{13} \neq 0$ (p- θ)

28 eventi osservati



Apparizione dei ν_e : θ_{13} e δ_{CP}



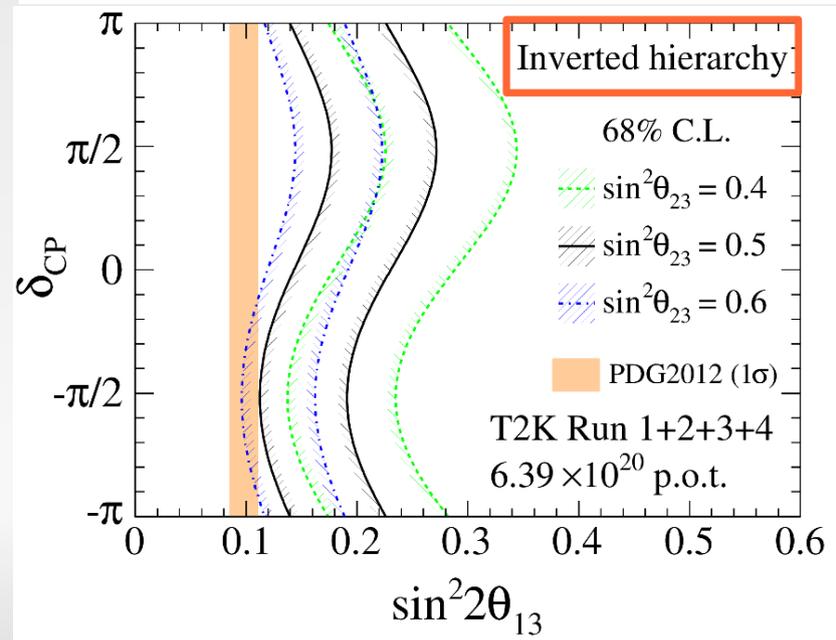
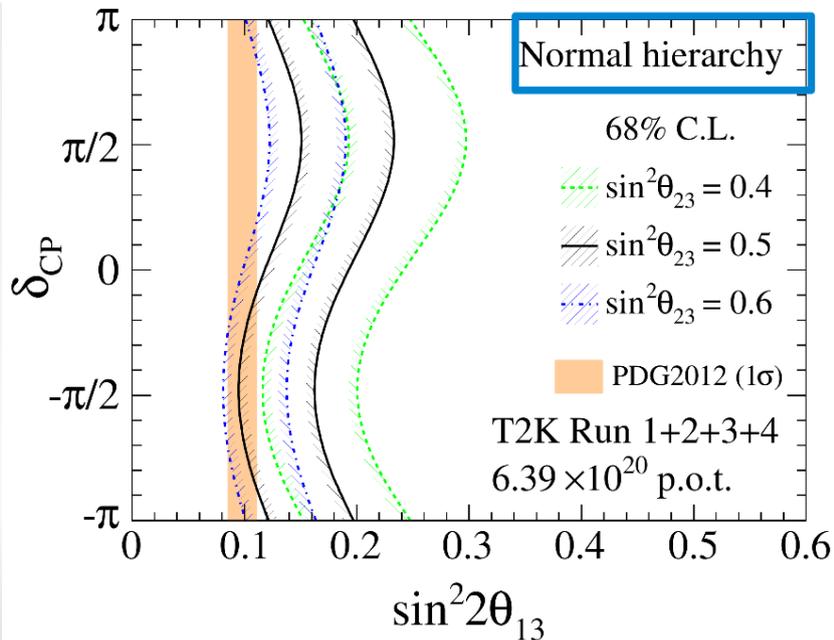
$$P_{\mu \rightarrow e} \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right)$$

Dipendenza da θ_{23} asimmetrica rispetto $\pi/4$, sensitività all'ottante

I reattori misurano un valore centrale minore: θ_{23} nel 2° ottante e $\delta_{CP} \sim -\pi/2$ leggermente favoriti

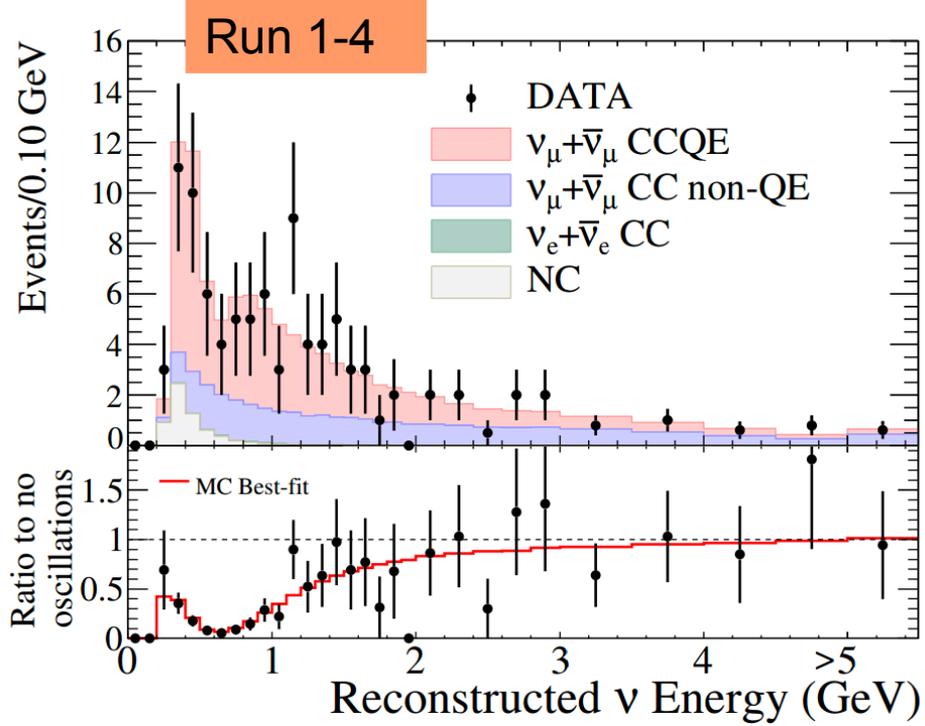
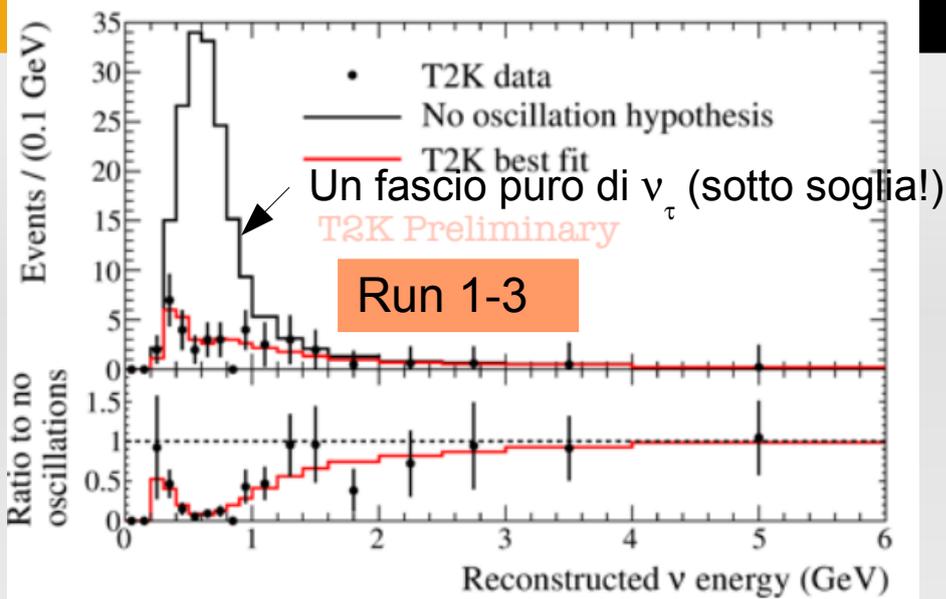
Gerarchia normale best fit: **0.150**
 @ 90% CL: **0.097 < sin²2 θ_{13} < 0.218**

Gerarchia inversa, best fit **0.182**
 @ 90% CL: **0.118 < sin²2 θ_{13} < 0.261**

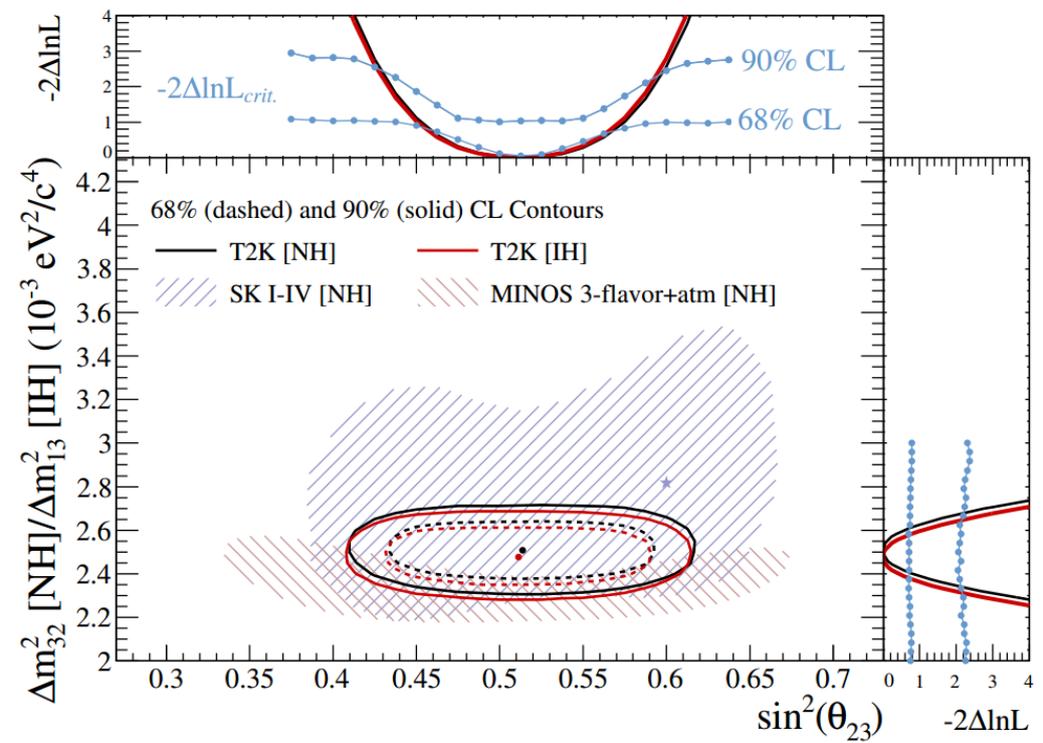


Scomparsa dei ν_μ

hep-ex/1403.1532



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - (\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} + \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23}) \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$



- Il primo fascio disegnato con una precisa determinazione del Δm^2 (soppressione massimale esattamente al picco!). **Attesi in assenza di osc. 446 ± 22.5 (sys.). Osservati 110.**

- Analisi a 3ν (dipendenza da θ_{23} non $\pi/4$ simmetrica nel termine subleading modulato da θ_{13})

- **Migliore misura mondiale di θ_{23}** (~11%)

- Δm^2 ci si sta avvicinando alle precisione di MINOS

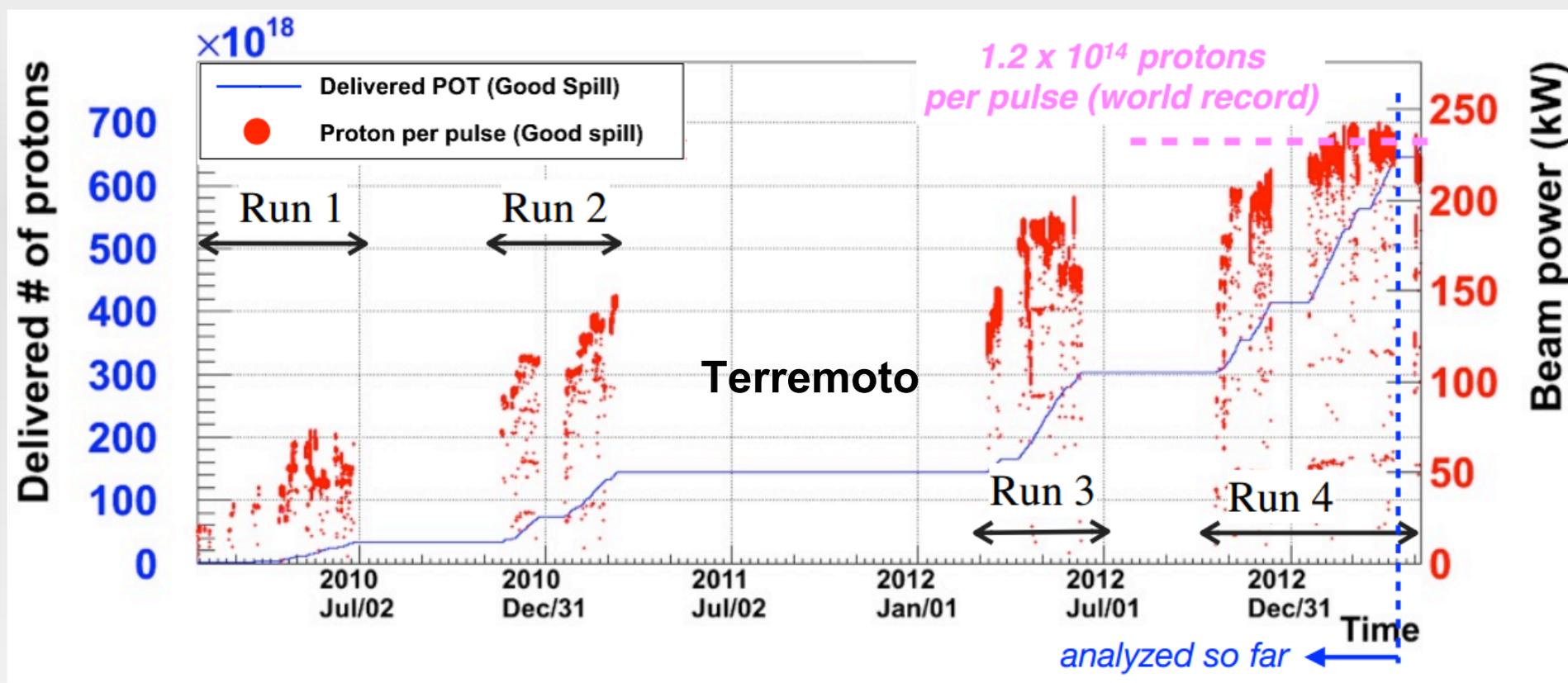
Gerarchia normale Inversa

$$\sin^2(\theta_{23}) = 0.514^{+0.055}_{-0.056} \quad (0.511 \pm 0.055)$$

$$\Delta m_{13}^2 = 2.48 \pm 0.10 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4 \quad \text{inversa}$$

$$\Delta m_{32}^2 = 2.51 \pm 0.10 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4 \quad \text{normale}$$

T2K: prospettive



J-PARC stabilmente a **220 kW** per la maggior parte dell'ultimo run
 $6.63 \cdot 10^{20}$ POT accumulati (**8% del valore di disegno finale**)

Prospettive: **Run di anti- ν** per migliorare la sensitività alla fase di CP entro l'estate. Analisi combinata di ν_{μ} e ν_e

Il fascio CNGS per l'“appearance”

$\langle E_\nu \rangle$	17 GeV
$L / \langle E_\nu \rangle$	43 km/GeV

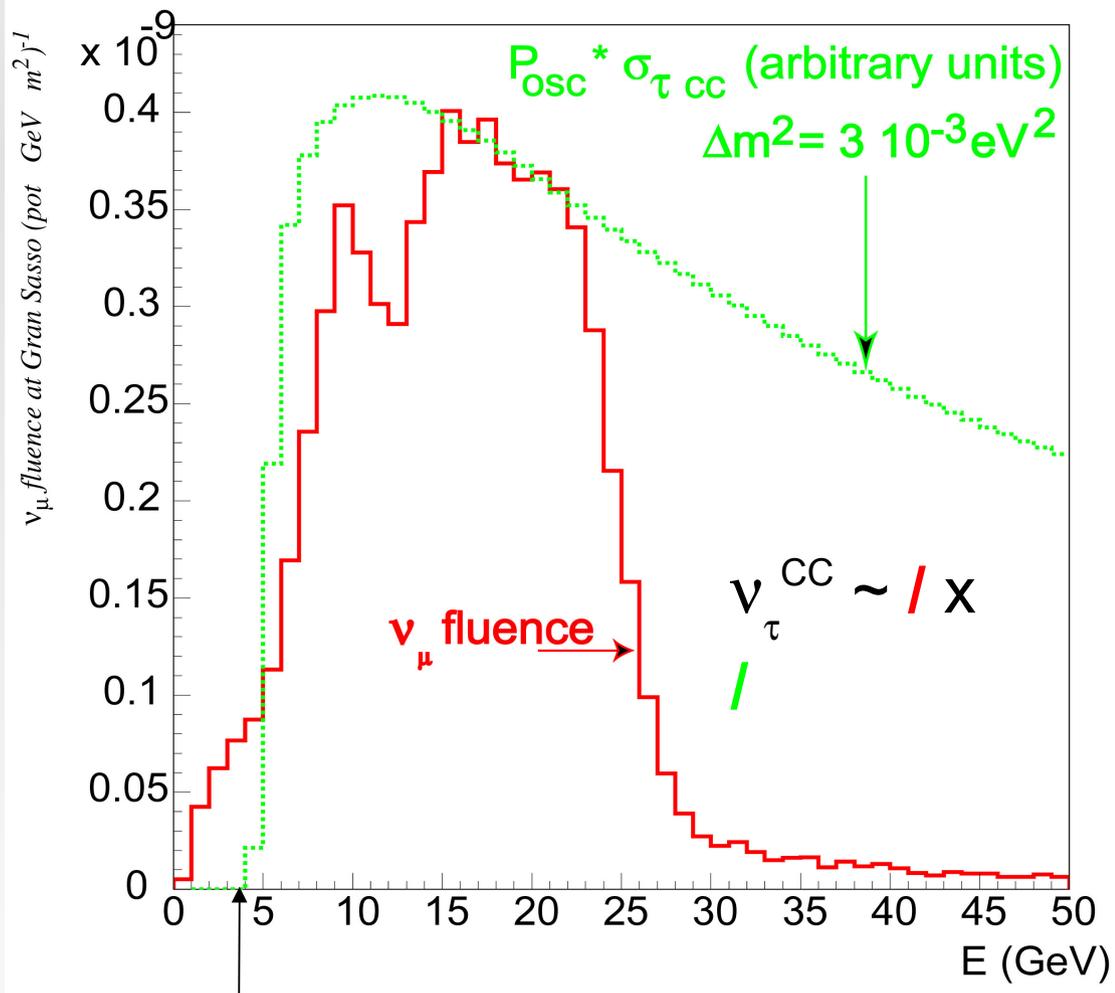
Il picco di oscillazione per $L=732$ km cade a ~ 1.5 GeV (vedi NuMI) ma il goal e' la produzione di τ
 → sbilanciamento a energie piu' alte

$$N(\tau) \sim \text{Pr}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \times \sigma_{\nu(\tau)\text{CC}}(E) \times \text{flux}$$

$(\nu_e + \bar{\nu}_e) / \nu_\mu$	0.9 %
$\bar{\nu}_\mu / \nu_\mu$	2.1 %
ν_τ prompt (da D_s)	trascurabili

(simulazione FLUKA)

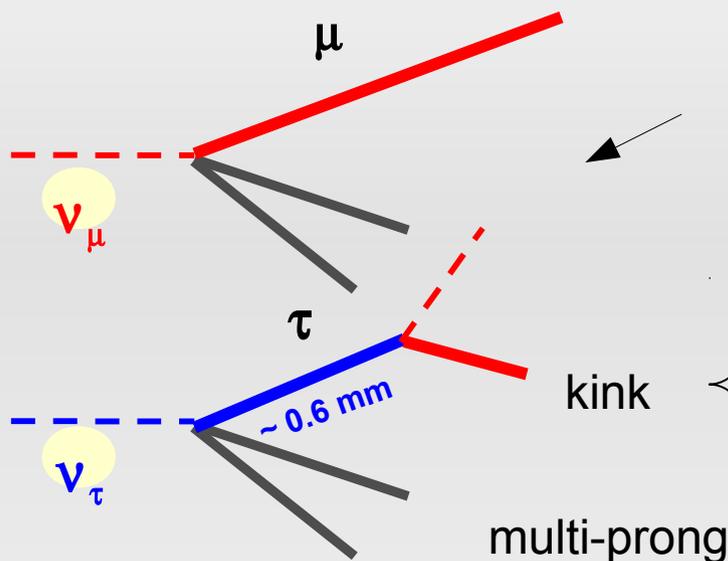
DESIGN: $4.5 \cdot 10^{19}$ pot/year, 200 days/y per 5 y



Soglia produzione τ a ~ 3.5 GeV.
 Salita lenta.

La sfida della rivelazione dei ν

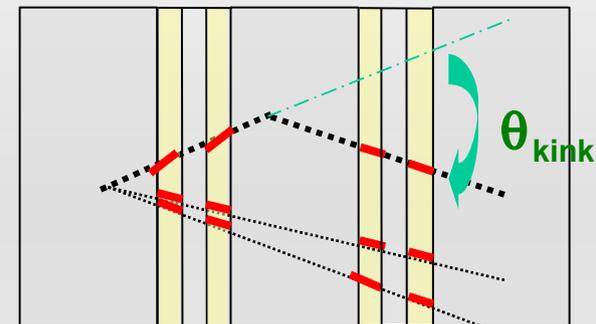
τ



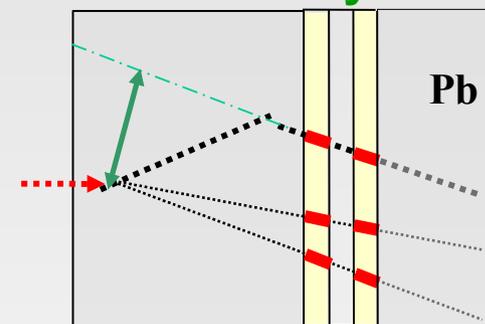
Distinguere i pochi ν_τ^{CC} dai ν_μ^{CC} predominanti

$\tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \nu_\mu$	17 %
$\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \nu_e$	18 %
$\tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau n(\pi^0)$	50 %
$\tau^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- \nu_\tau n(\pi^0)$	14 %

“long” decays: kink

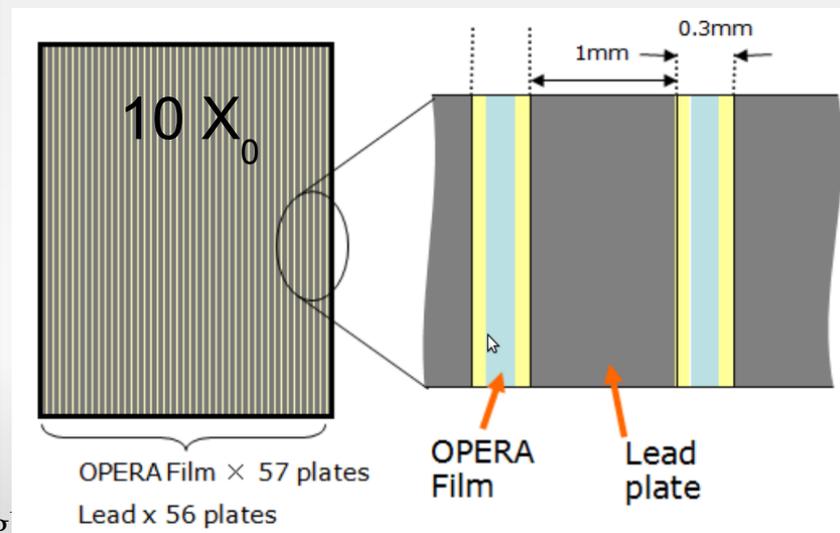
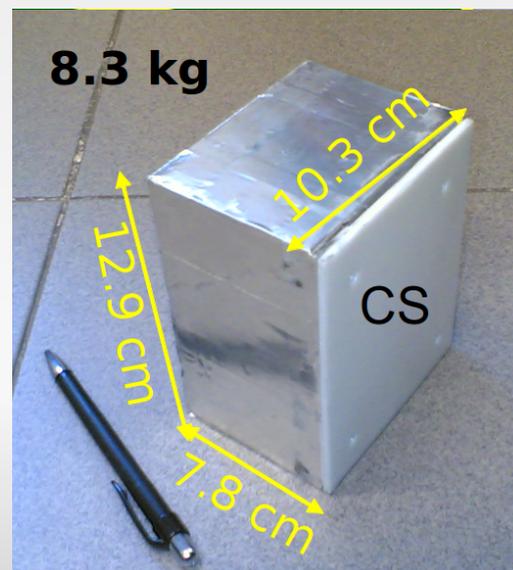


“short” decays: I.P.



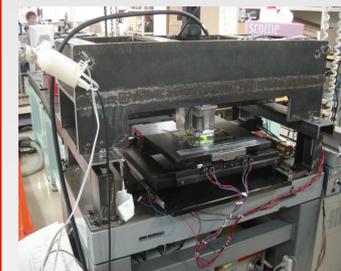
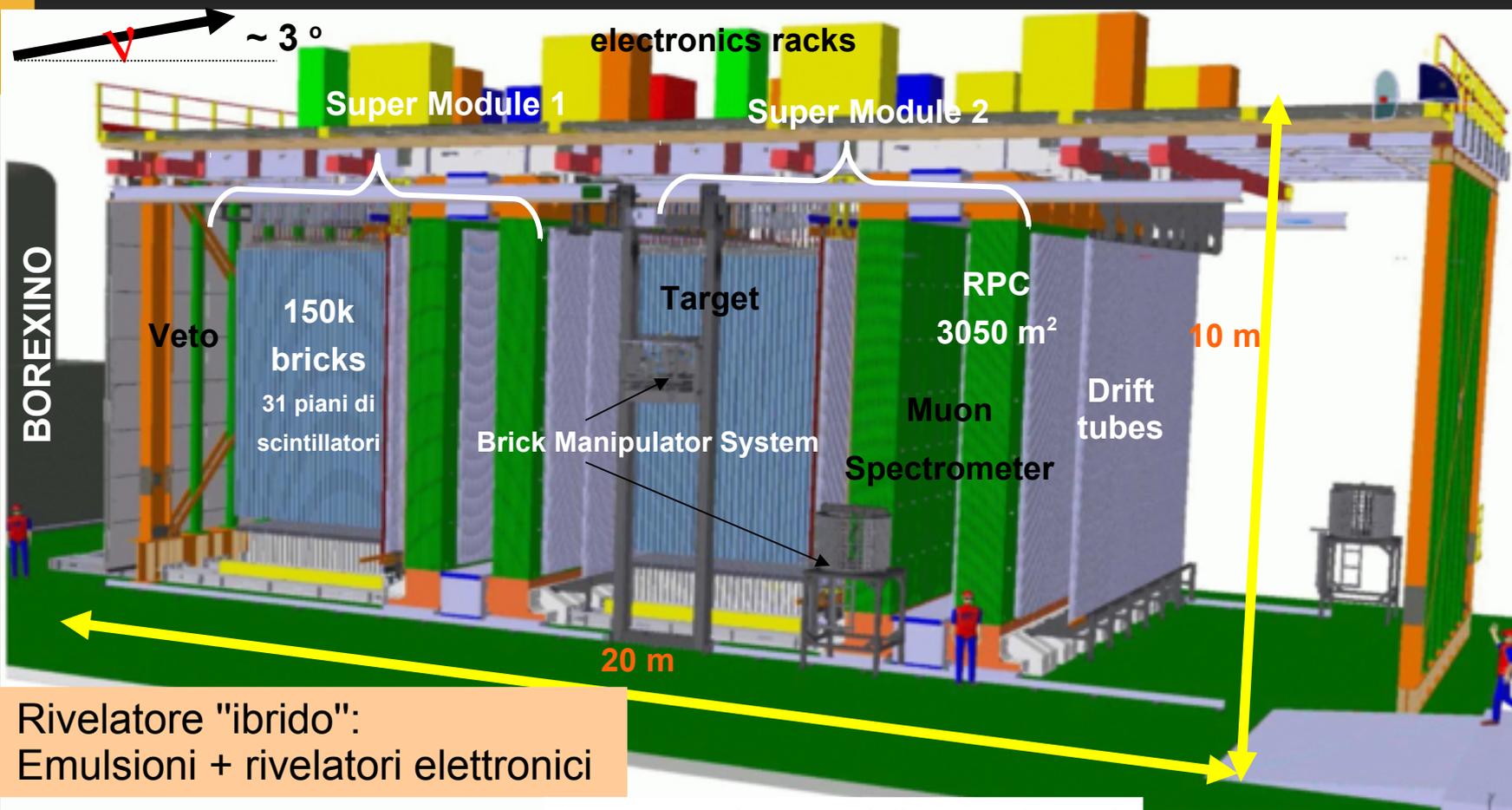
Rivelatore modulare di “Emulsion Cloud Chambers”
Riconcilia le necessita' di

- Grande massa
 - $N_\tau \propto (\Delta m^2)^2 M_{\text{target}}$
- Granularita` spinta
 - $\sim \mu\text{m}$



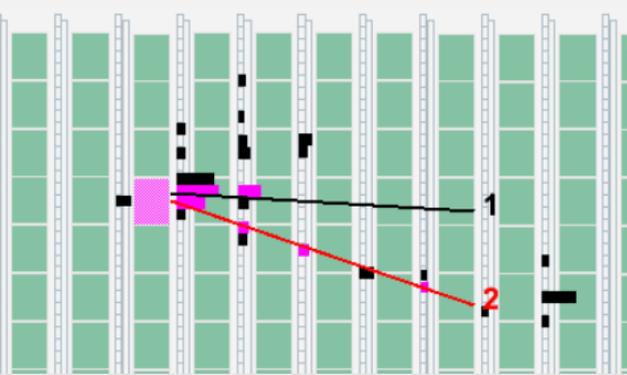
Il rivelatore OPERA

Un enorme "rivelatore di vertice" ad alta granularita`

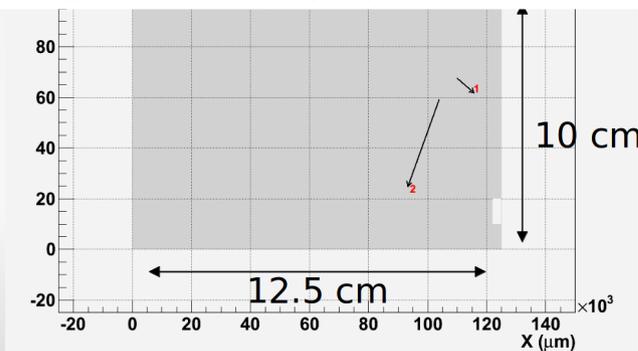


Rivelatore "ibrido":
Emulsioni + rivelatori elettronici

"Brick-finding"



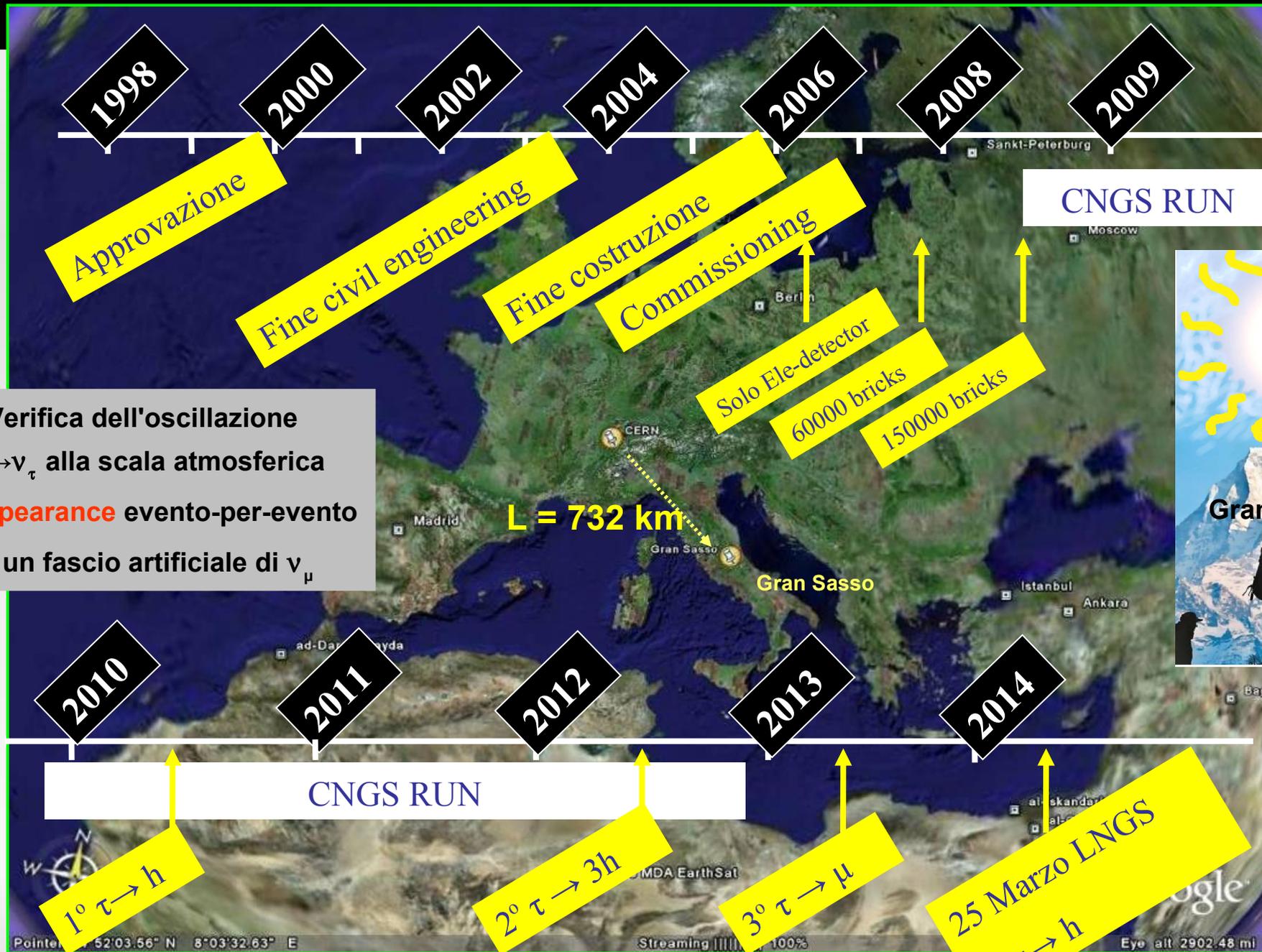
Conferma e innesco dello scanning nel brick grazie ai doppietti di emulsioni Changeable Sheets (CS)



+ svariate installazioni ancillari "off-site":

- "refreshing" emulsioni (JP e LNGS)
- Assemblaggio/smontaggio brick (LNGS)
- Labelling e marcatura con X ray (LNGS)
- Sviluppo automatico (LNGS)
- Scanning CS (LNGS)
- Scanning bricks (Europa + JP)

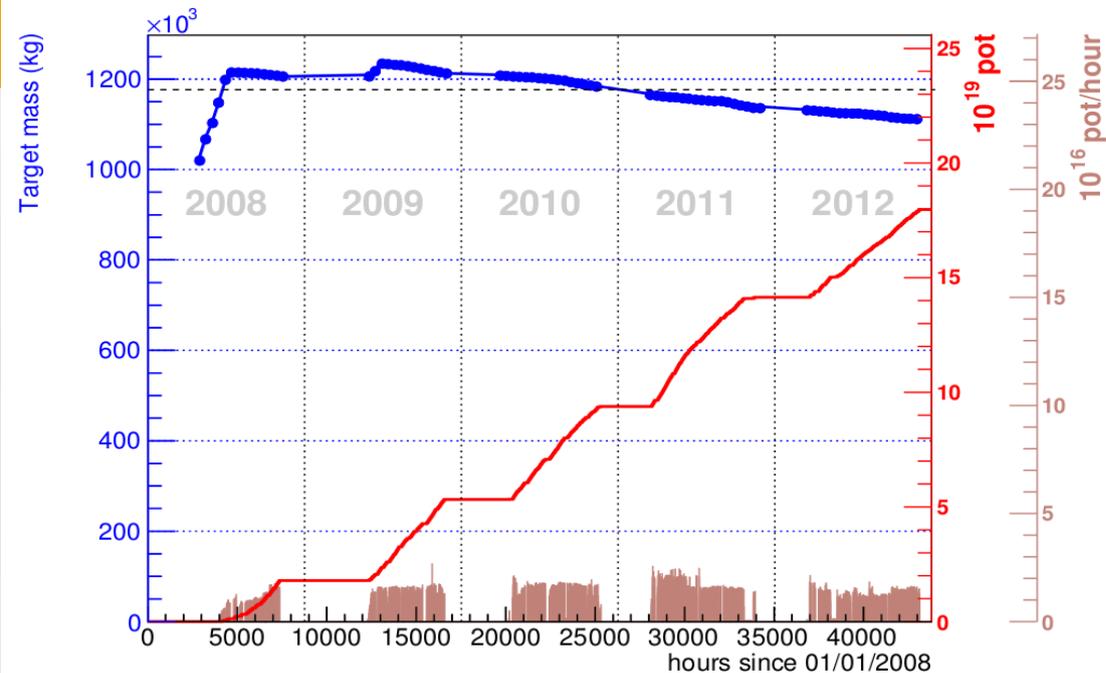
La road-map di OPERA



Verifica dell'oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ alla scala atmosferica
 ν_τ appearance evento-per-evento
 in un fascio artificiale di ν_μ



Campioni e avanzamento dell'analisi delle emulsioni



Year	Beam days	P.O.T. (10 ¹⁹)
2008	123	1.74
2009	155	3.53
2010	187	4.09
2011	243	4.75
2012	257	3.86
Total	965	17.97

POT ~ 80% del design (2.25×10^{20})

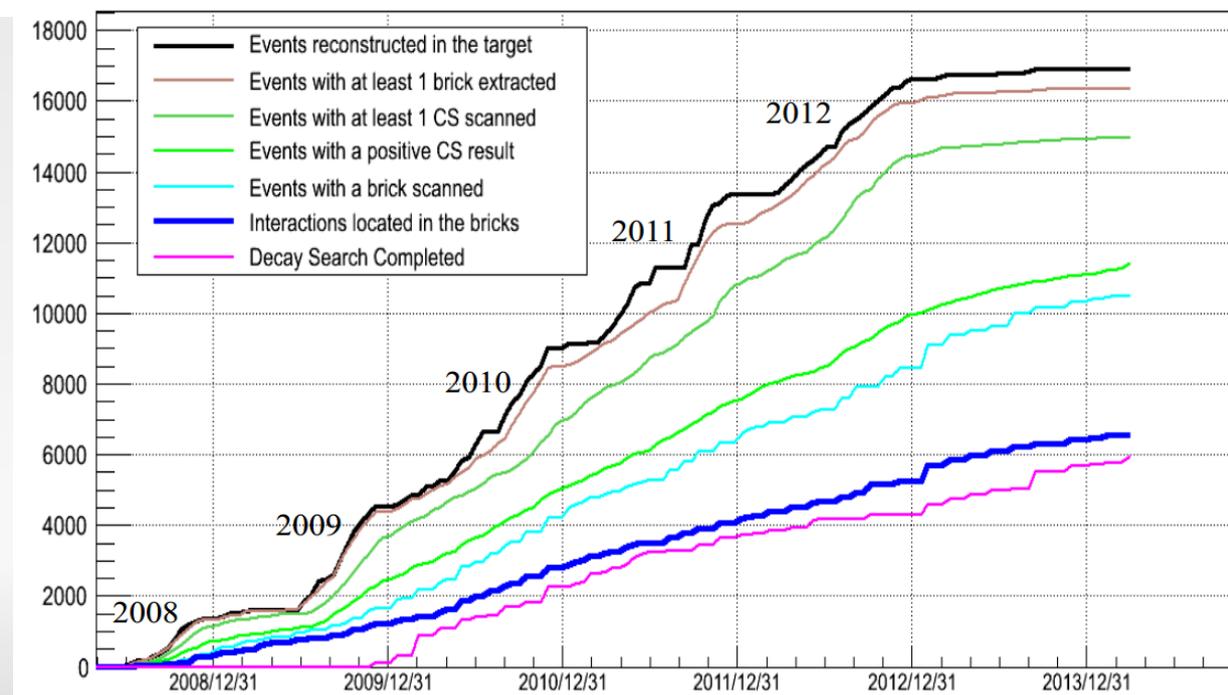
Analisi delle emulsioni:

Bricks ordinati per probabilita` di contenere il vertice di interazione.

2008-2009 analisi dei primi e dei secondi brick

2010-2012 analisi dei "primi brick" quasi interamente completata

~ 6000 bricks completati



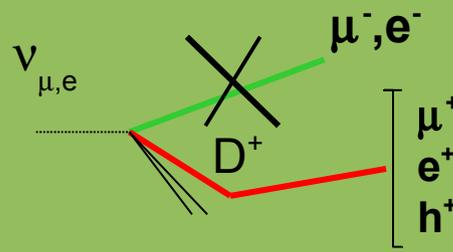
Caratterizzazione dei fondi

Simulazione Monte Carlo coadiuvata da campioni di controllo.

Per importanza decrescente

CC con produzione di charm

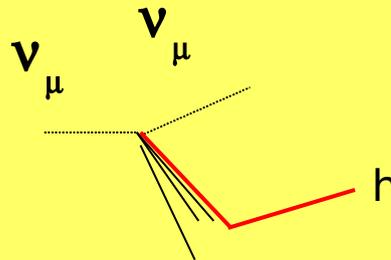
(tutti i canali)
SE leptone primario non identificato e carica del figlio non misurata



Misure di CHORUS, campione di eventi di charm al CNGS

Interazioni adroniche

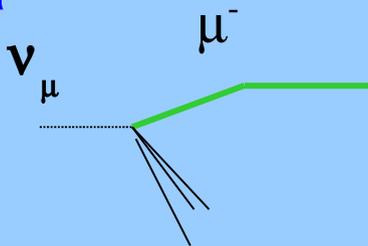
Fondo per $\tau \rightarrow h$



FLUKA + dati da test beam di brick esposti a pioni

Diffusione Coulombiana ad alto angolo

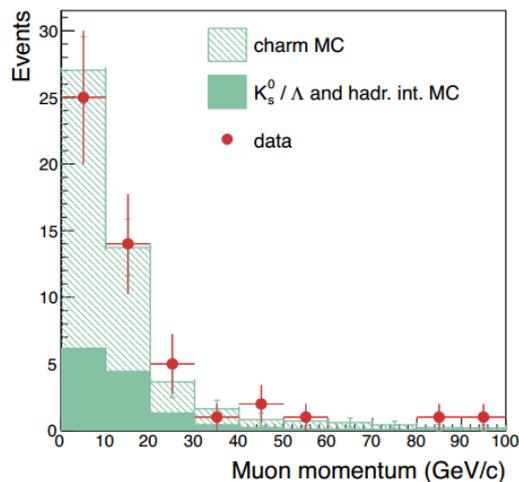
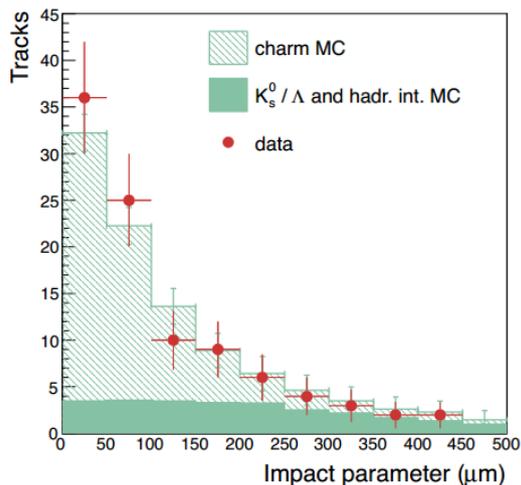
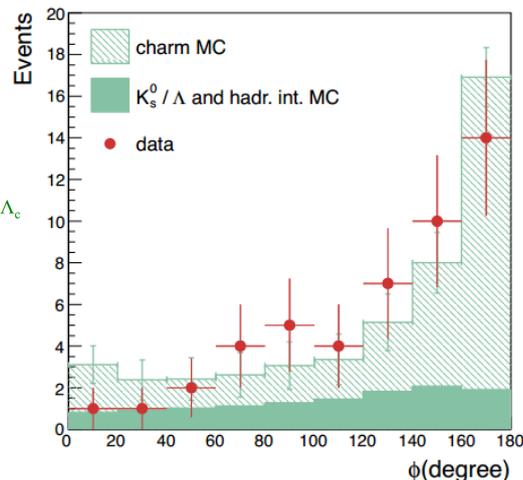
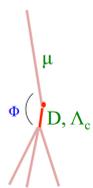
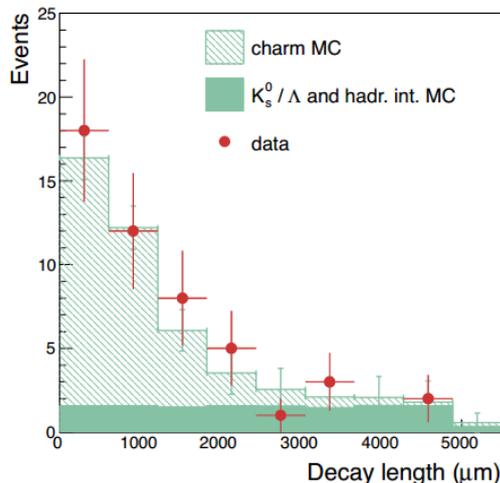
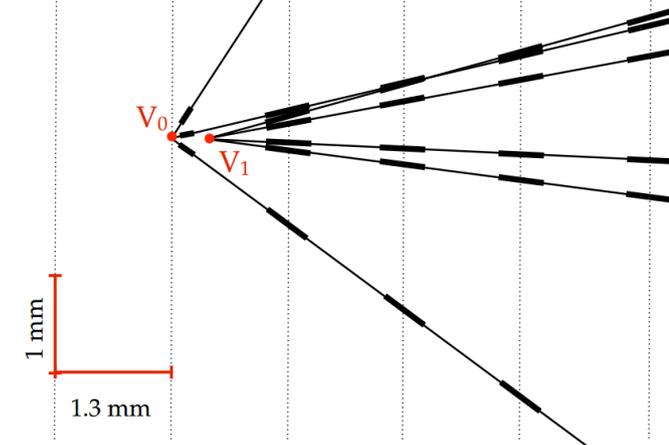
dei μ nel Pb
Fondo al $\tau \rightarrow \mu$



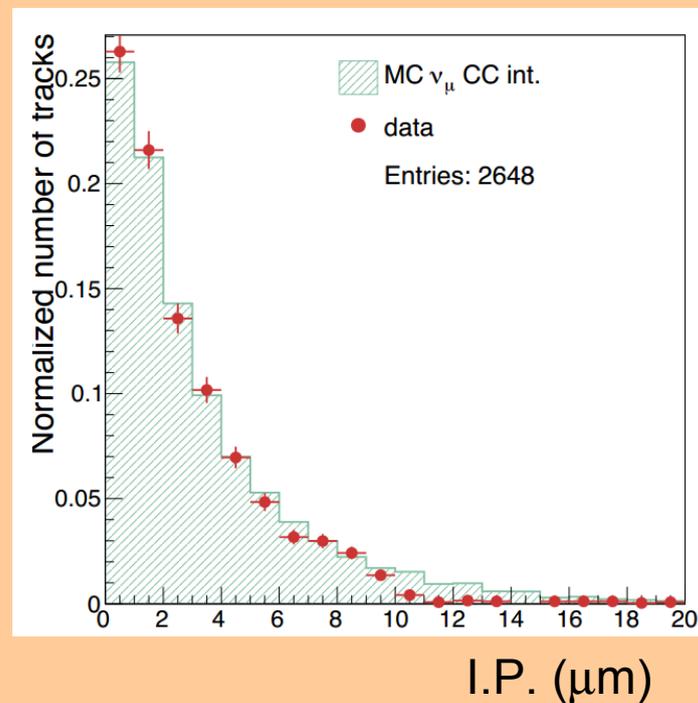
Misure in letteratura sul fattore di forma del Pb, simulazioni e test-beam dedicati (in corso)

OPERA: validazione Monte Carlo su campioni di controllo

Charm: topologicamente simile ai decadimenti dei τ



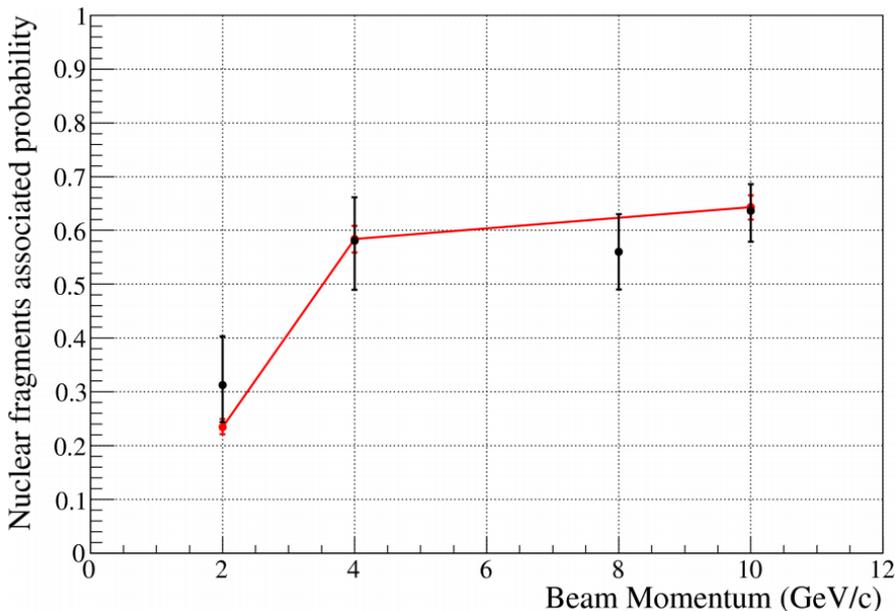
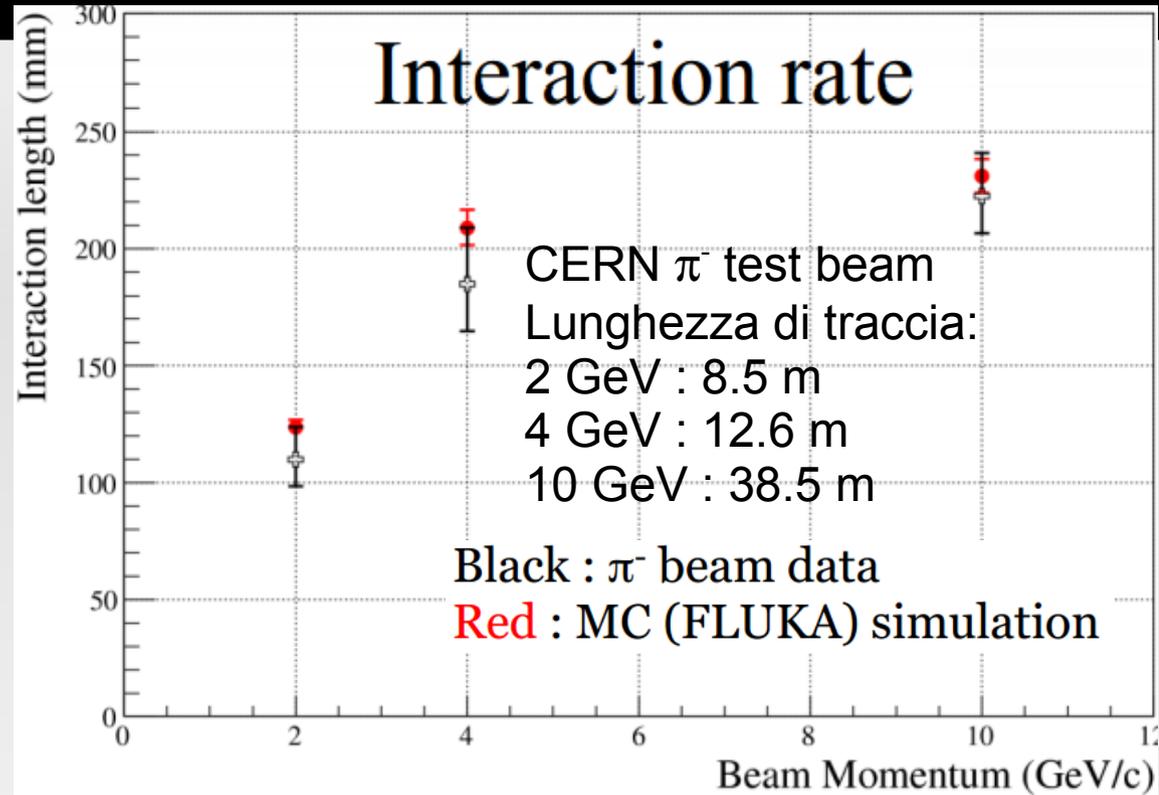
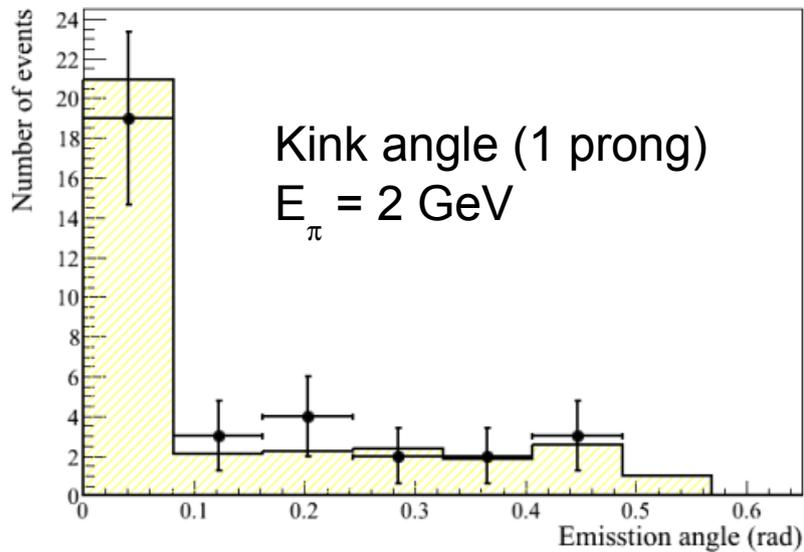
Data-MC per il parametro d'impatto delle tracce in eventi ν_{μ} CC



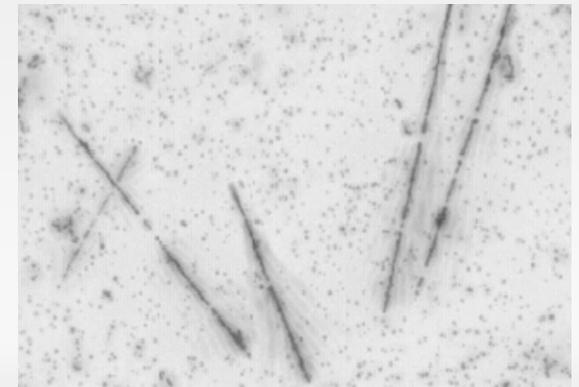
Controllo efficienze, descrizione delle variabili cinematiche, fondo da charm.

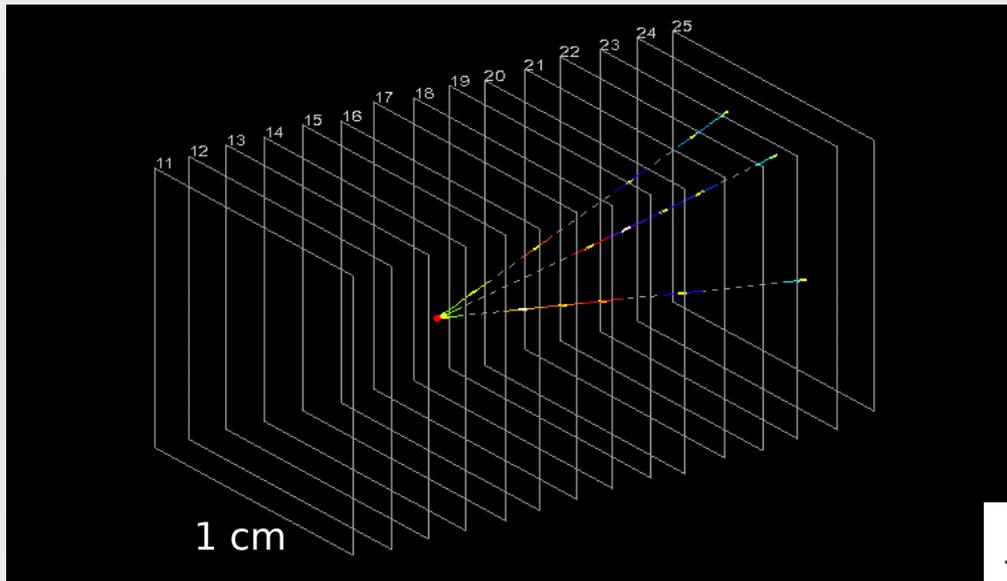
54 ± 4 attesi ↔ 50 osservati

OPERA: validazione fondo adronico



Probabilità di emissione di frammenti nucleari (smoking gun per distinguere un'interazione da un decadimento!)

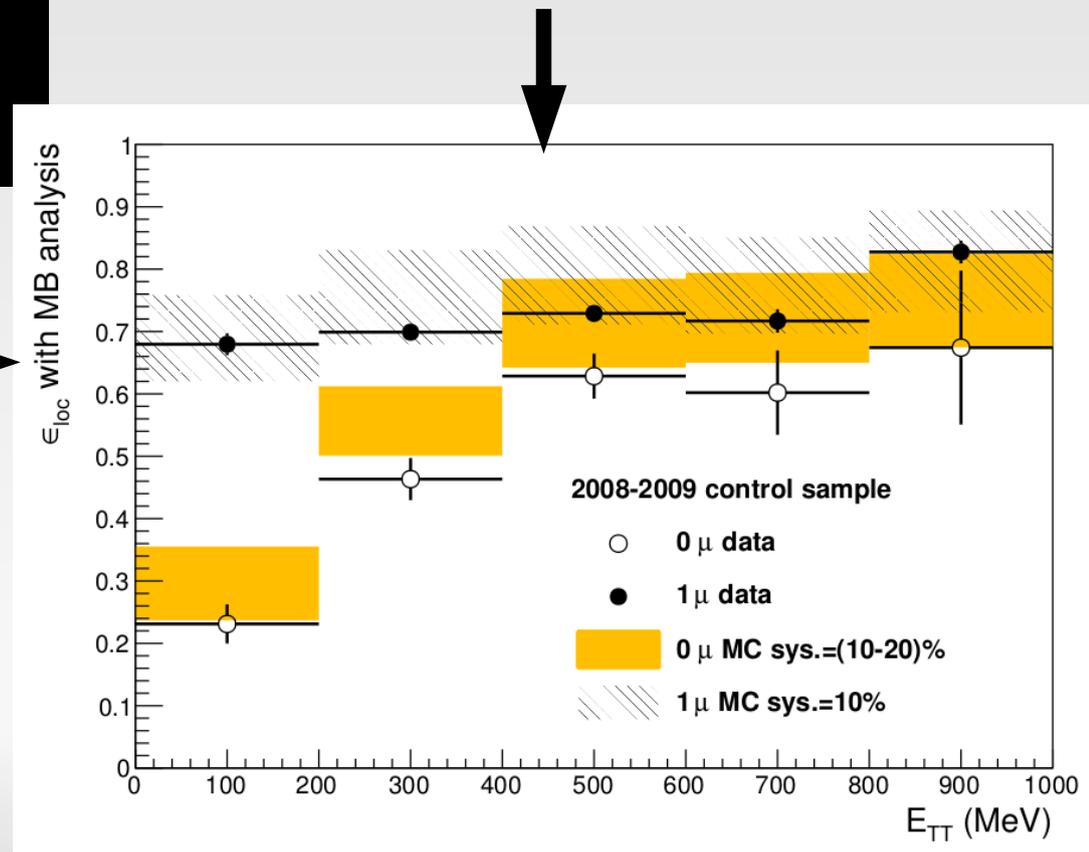




Rivelatore ibrido: simulazione complessa! Ragionevole accordo. →

Le predizioni per segnale e fondi sono normalizzati ai campioni 0μ e 1μ osservati nei dati e non sulle efficienze della simulazione.

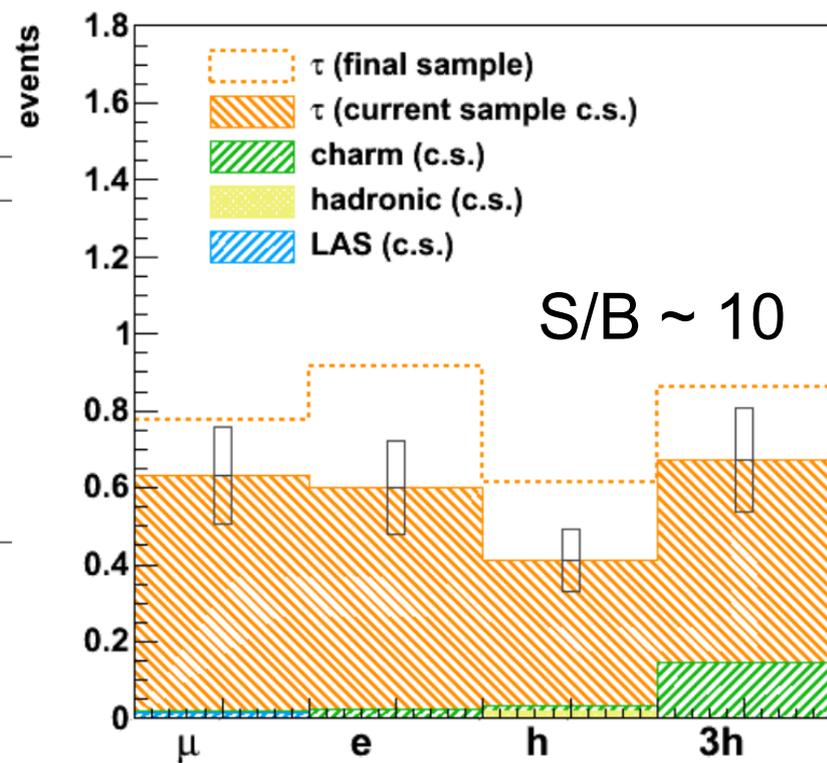
Confronto dati-Monte Carlo per l'efficienza di localizzazione in funzione dell'energia nel target tracker per il campioni 0μ e 1μ .



Risultati nel campione analizzato

Analisi cinematica (definita già nel proposal) →
aumenta il rapporto S/B

variable	$\tau \rightarrow 1h$	$\tau \rightarrow 3h$	$\tau \rightarrow \mu$	$\tau \rightarrow e$
lepton-tag		No μ or e at the primary vertex		
z_{dec} (μm)	[44, 2600]	< 2600	[44, 2600]	< 2600
p_T^{miss} (GeV/c)	< 1*	< 1*	/	/
ϕ_{lH} (rad)	> $\pi/2^*$	> $\pi/2^*$	/	/
p_T^{2ry} (GeV/c)	> 0.6(0.3)*	/	> 0.25	> 0.1
p_T^{2ry} (GeV/c)	> 2	> 3	> 1 and < 15	> 1 and < 15
θ_{kink} (mrad)	> 20	< 500	> 20	> 20
m, m_{min} (GeV/c ²)	/	> 0.5 and < 2	/	/



Attesi: S = 2.1 ev. B = 0.22 ev.

4 candidati osservati (3 adronici + 1 muonico)

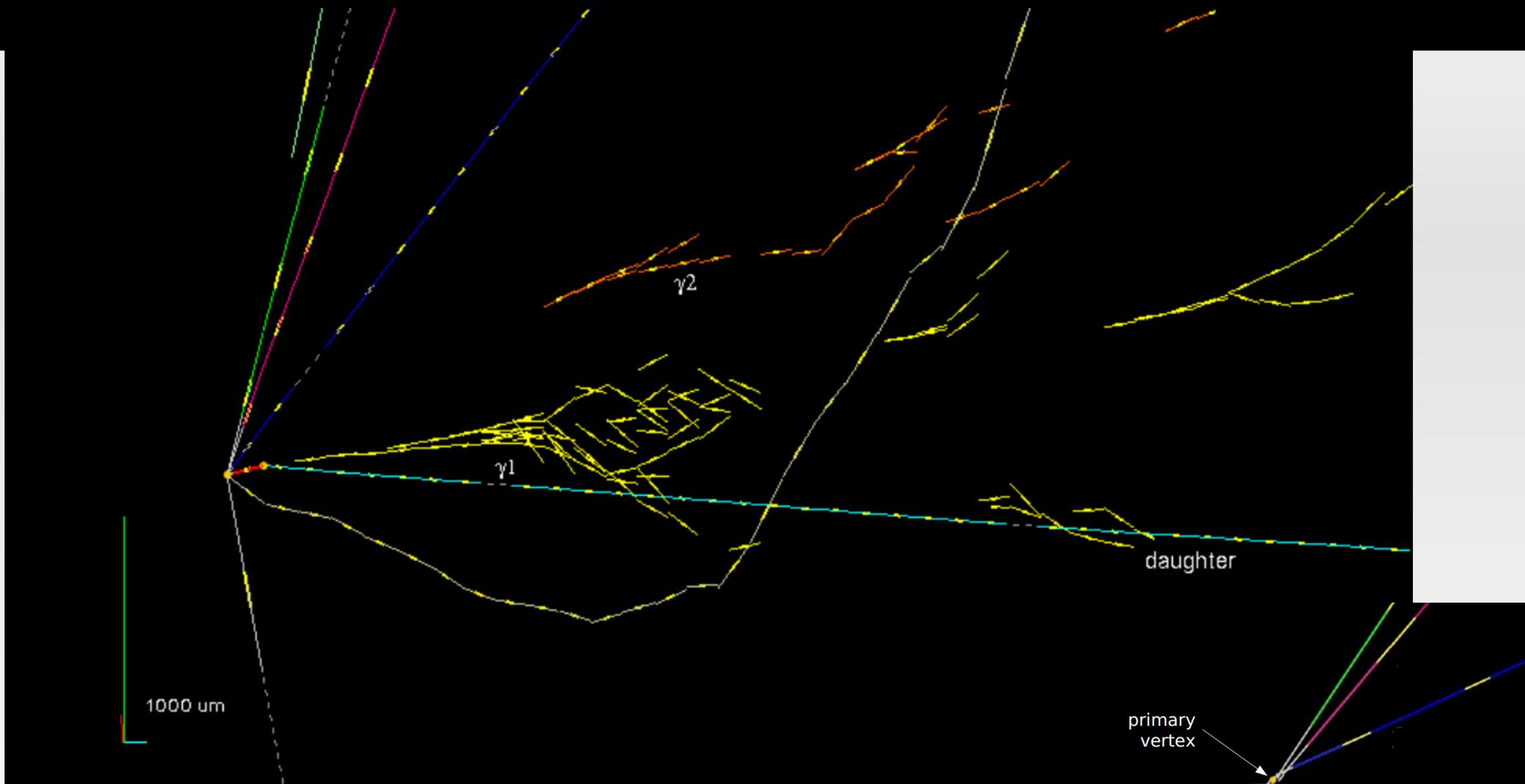
Esclusione ipotesi nulla: 4.2 σ

(semplice conteggio, "channel-aware")

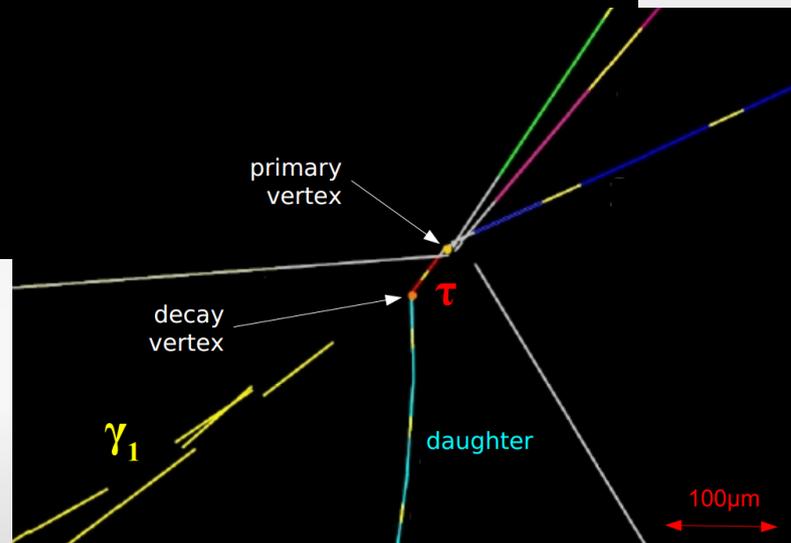
	Expected Signal	Observed Signal	Background	Charm	μ scattering	had int
$\tau \rightarrow h$	0.38	2	0.03	0.014		0.019
$\tau \rightarrow 3h$	0.53	1	0.15	0.142		0.003
$\tau \rightarrow \mu$	0.58	1	0.02	0.004	0.016	
$\tau \rightarrow e$	0.58	0	0.02	0.025		
total	2.1		0.22	0.185	0.016	0.022

Il 1° candidato ($\tau \rightarrow 1h$)

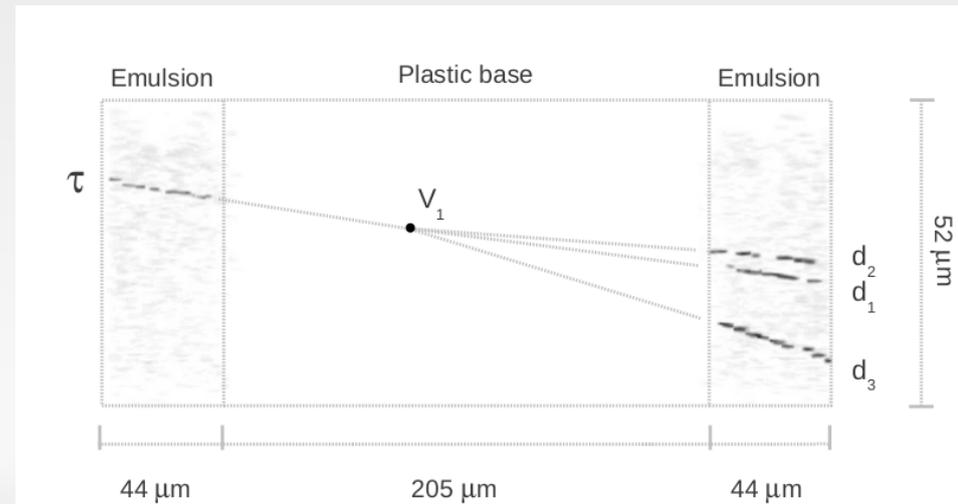
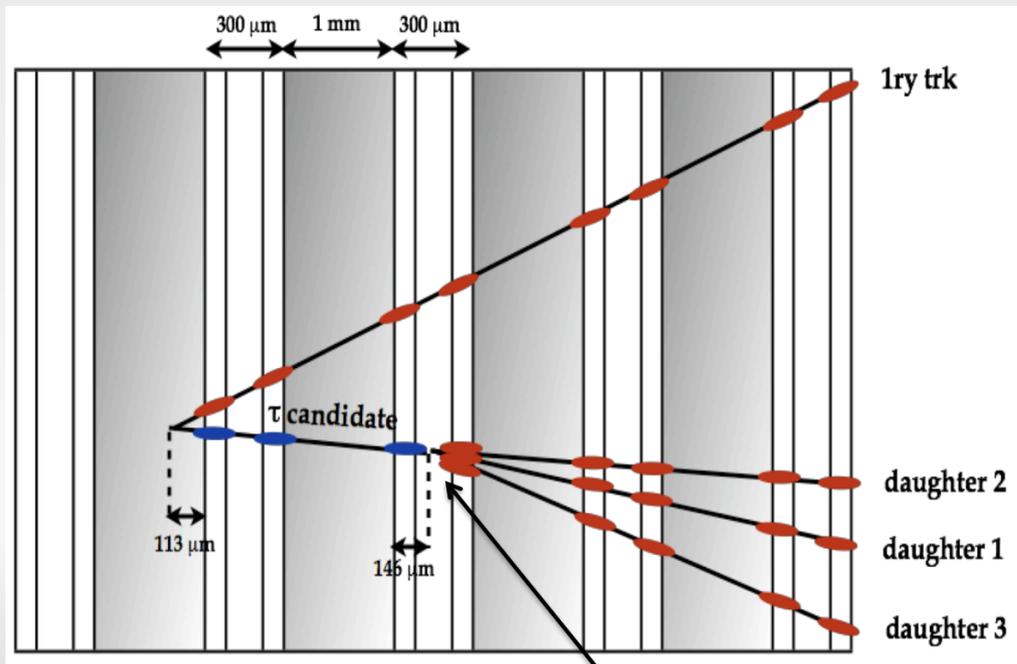
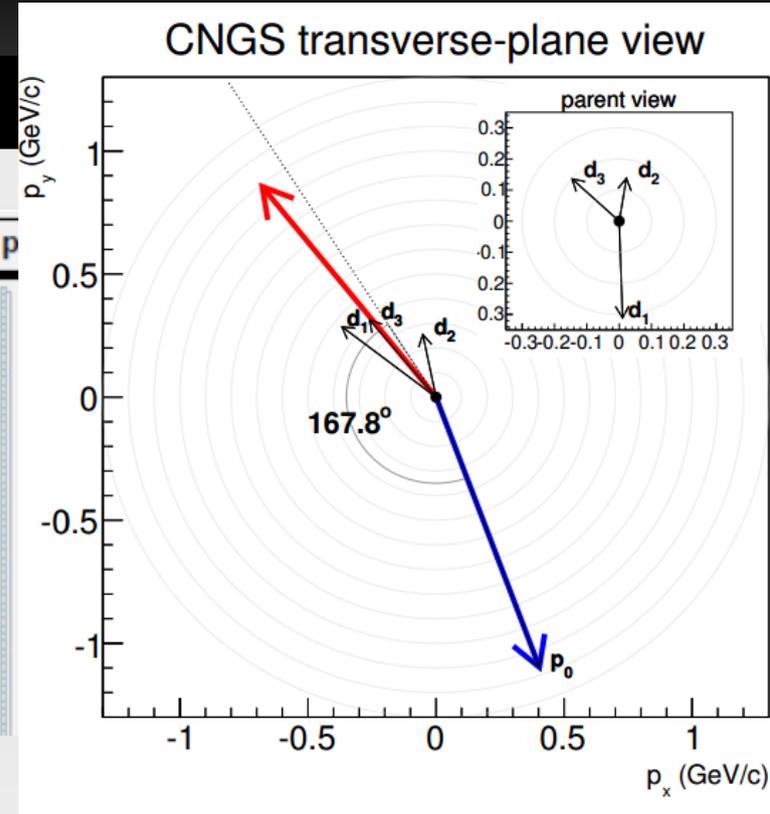
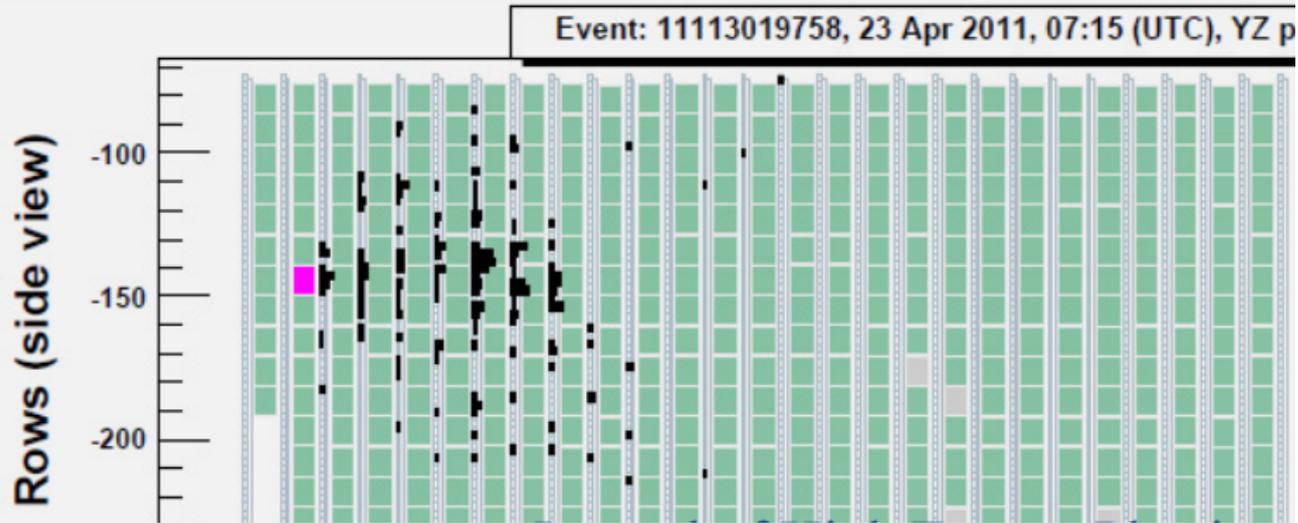
Phys. Lett. B691 (2010) 138



$\tau \rightarrow \rho^- + \nu_\tau$ (B.R. $\sim 25\%$)
 $\rho^- \rightarrow \pi^0 + \pi^-$ 640^{+125}_{-80} (stat.) $^{+100}_{-90}$ (sys.) MeV/c²
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 120 ± 20 (stat.) ± 35 (sys.) MeV/c²



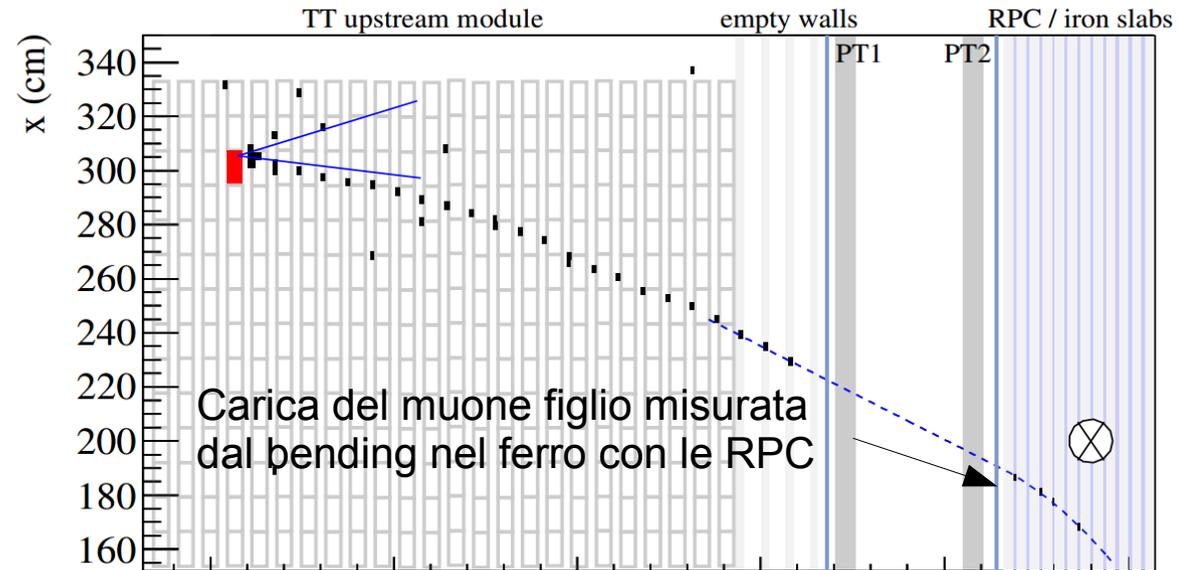
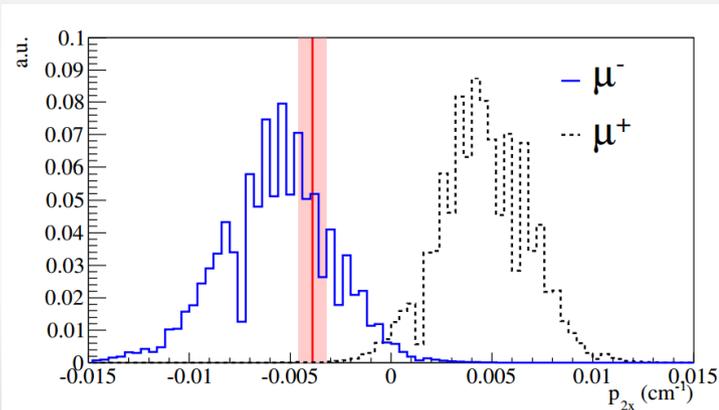
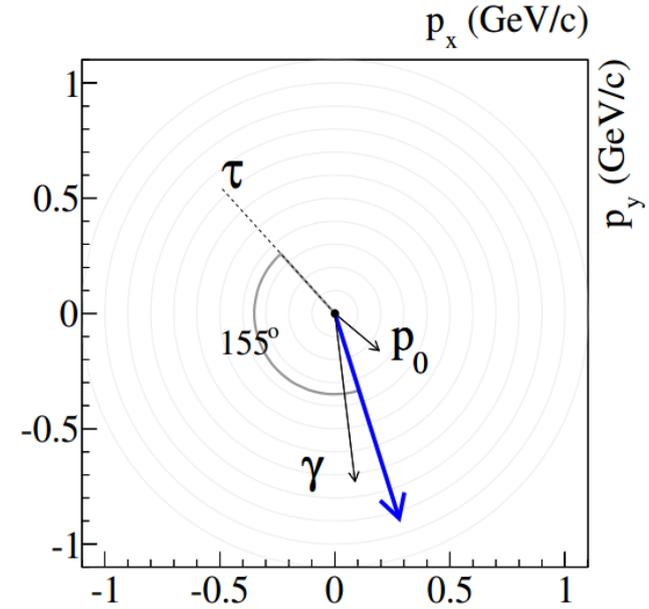
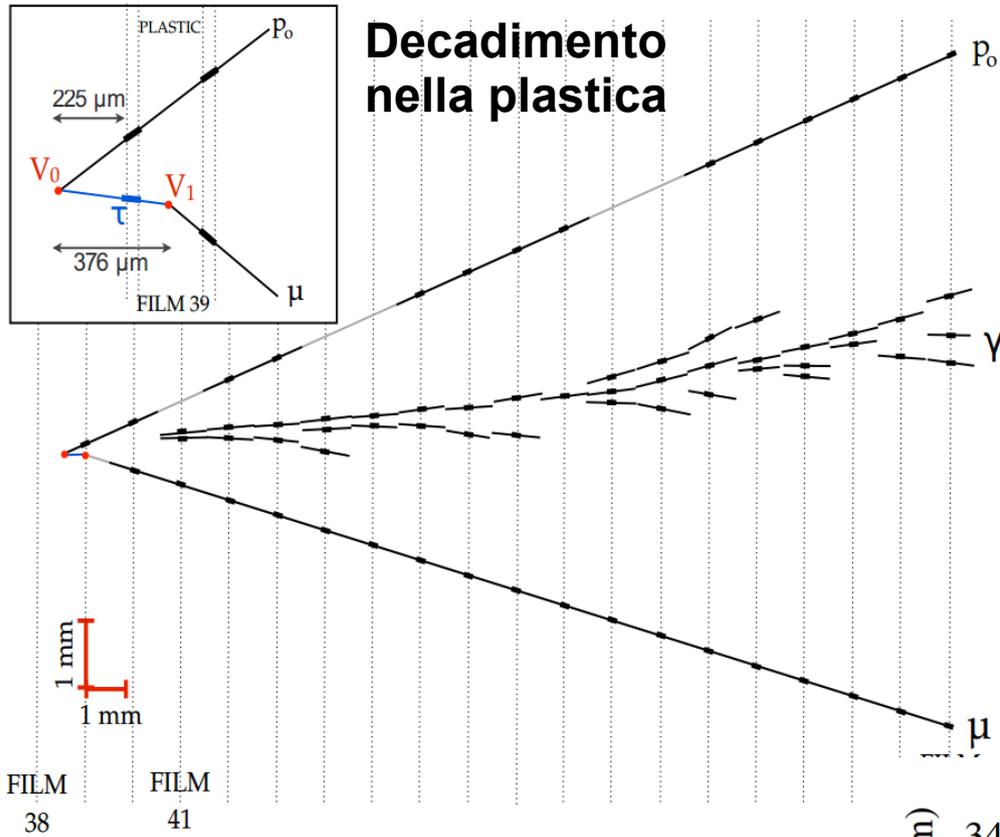
Il 2° candidato ($\tau \rightarrow 3h$)



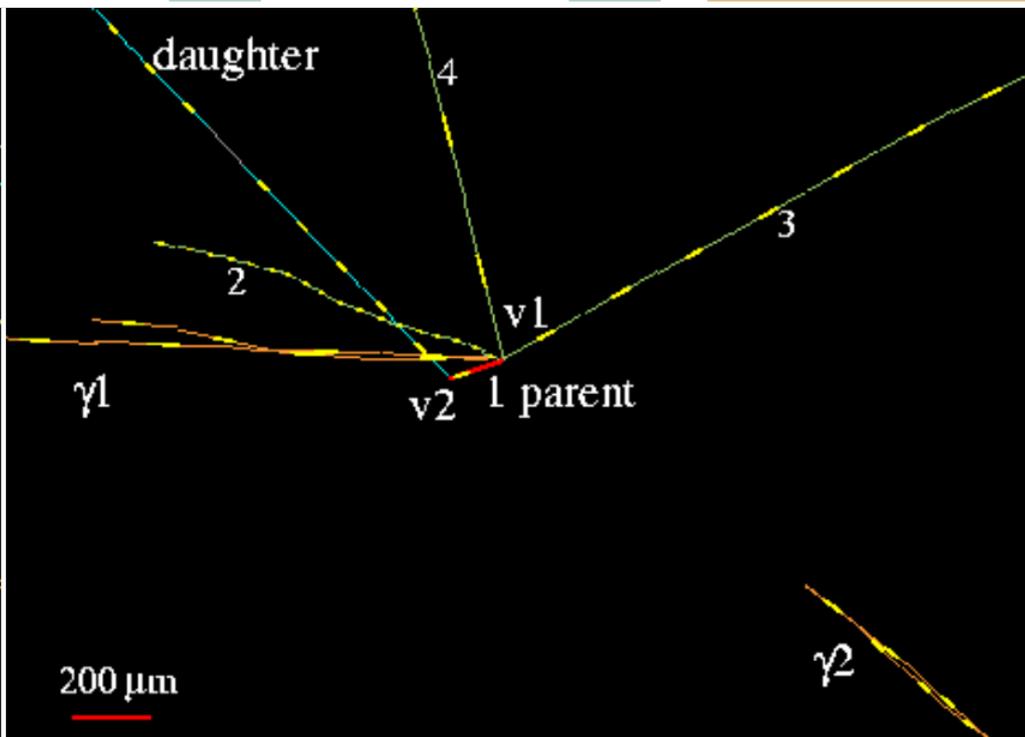
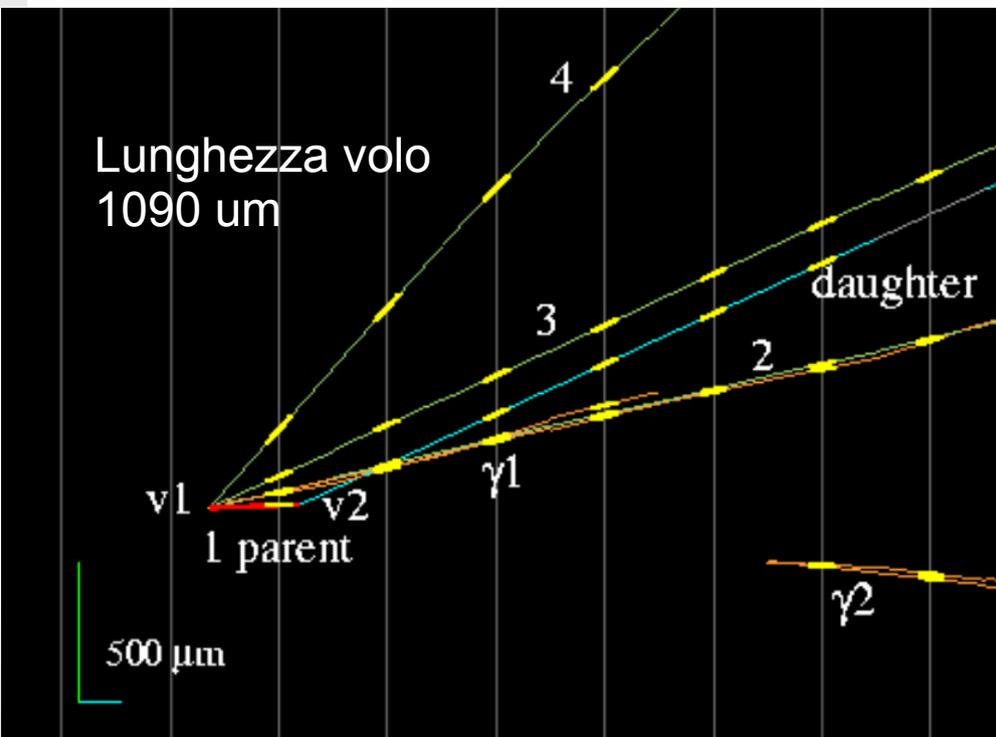
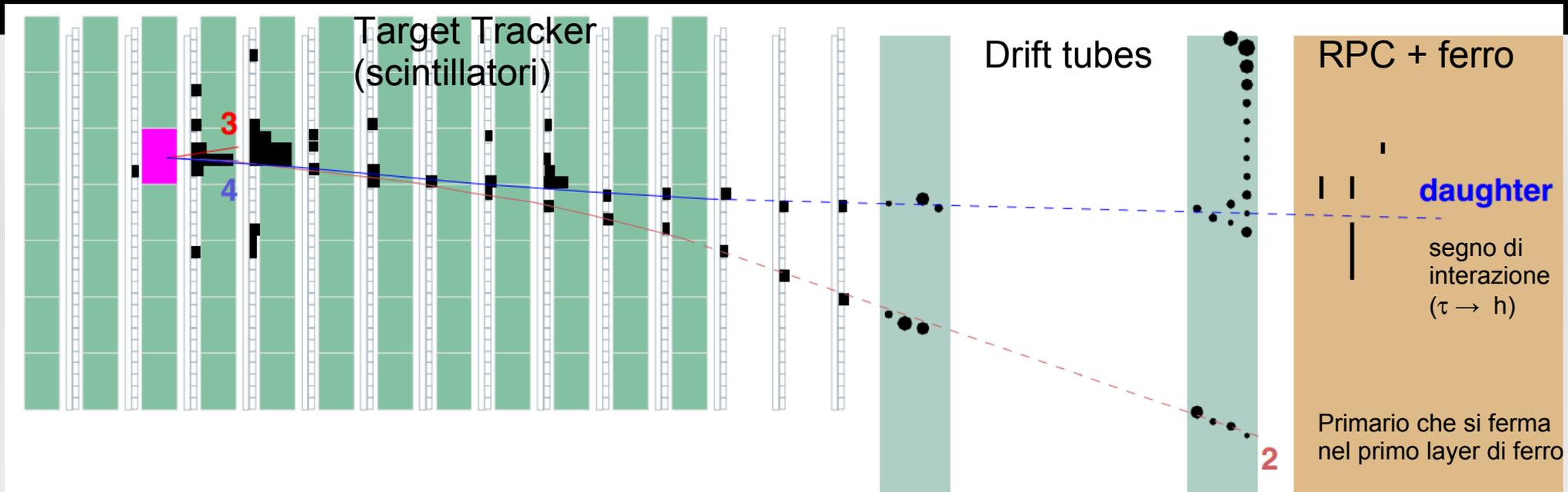
Decadimento nella plastica

Il 3° candidato ($\tau \rightarrow \mu$)

Phys. Rev. D 89 (2014) 051102(R)



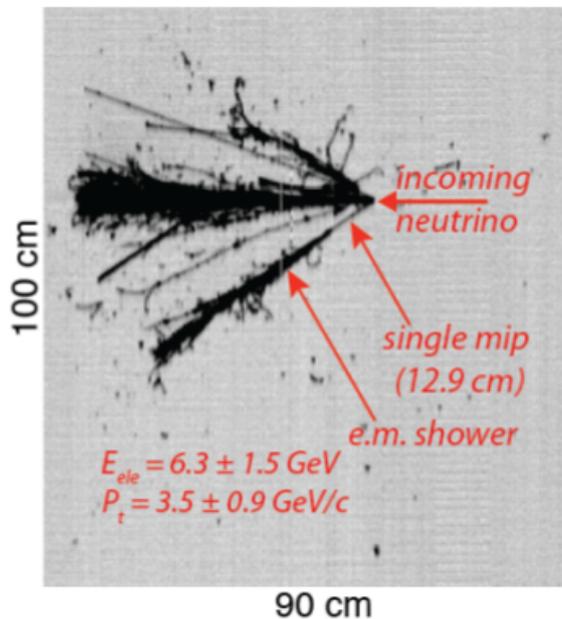
Il 4° candidato ($\tau \rightarrow 1h$, 25 Marzo 2014)



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ con ICARUS

4 eventi osservati
($E < 30$ GeV)

Esempio:



First result based on the analysis of **1091 ν events** (3.3×10^{19} pot, 2010-2011 data, half the total statistic) published in Eur. Phys. J. C73 (2013).

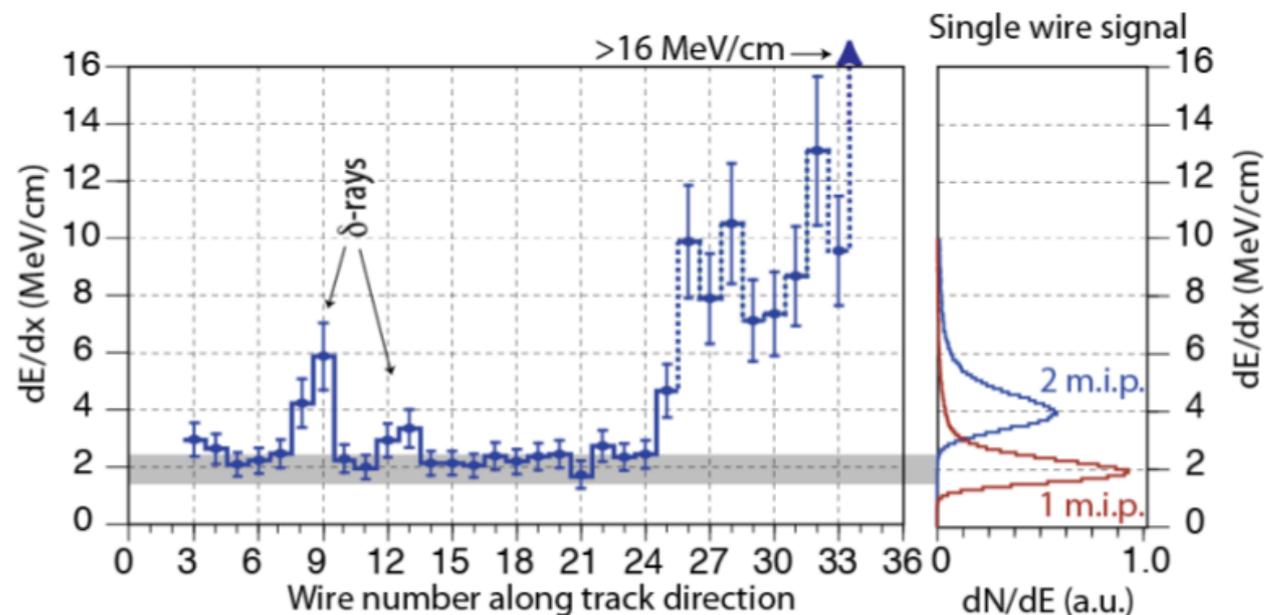
Analysis presented here refers to **1995 ν events** (6.0×10^{19} pot)

Expected number of ν_e events:

- **5.7 ± 0.8** , due to the **intrinsic ν_e** beam contamination,
- **2.3 ± 0.5** , due to **θ_{13} oscillations**, $\sin^2(\theta_{13}) = 0.0242 \pm 0.0026$,
- **1.3 ± 0.1** , from **$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillations** with subsequent electron production, (3 ν mixing).

Total: **9.3 ± 0.9 expected events.**

Expected events, weighting for efficiency: **6.4 ± 0.9 events.**



Slide: 14

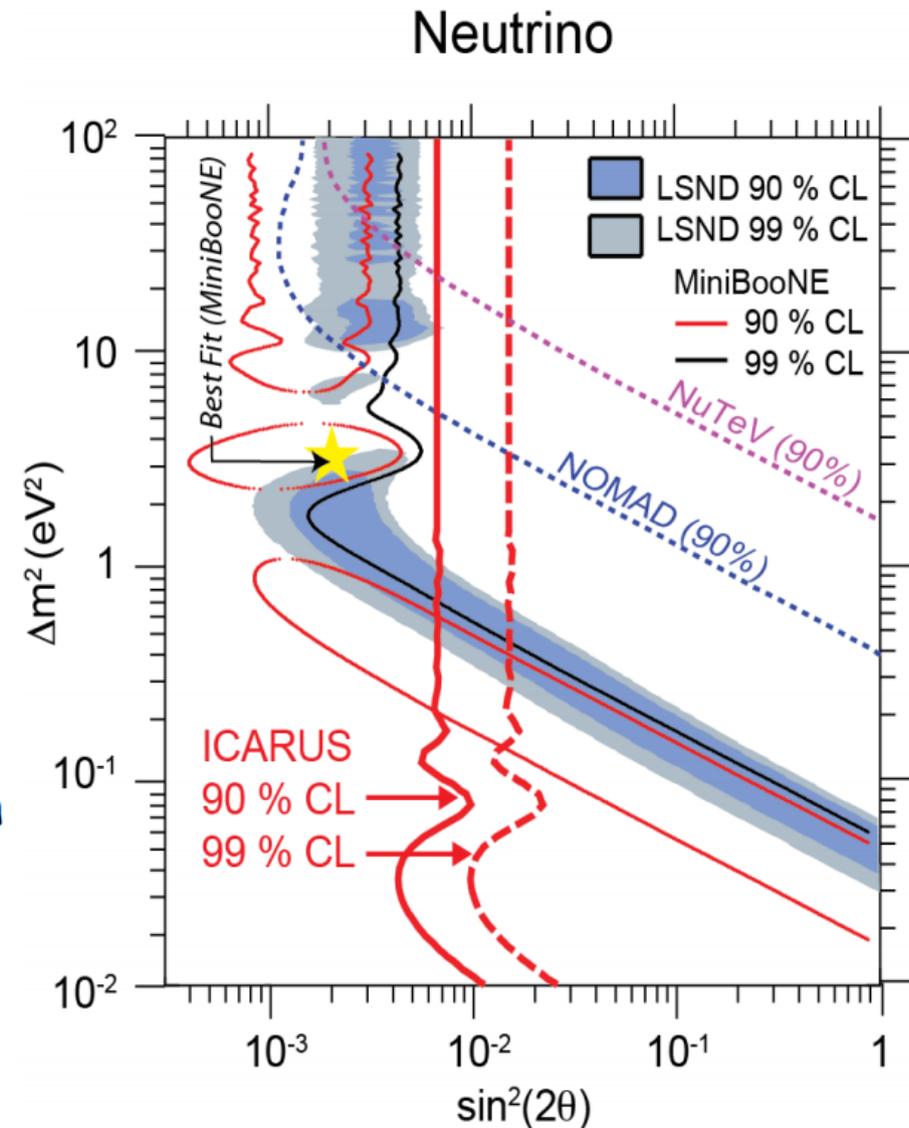
ICARUS results on the LSND-anomaly search (double statistics)

Within the present observation, our results is consistent with the **absence of the LSND anomaly**.

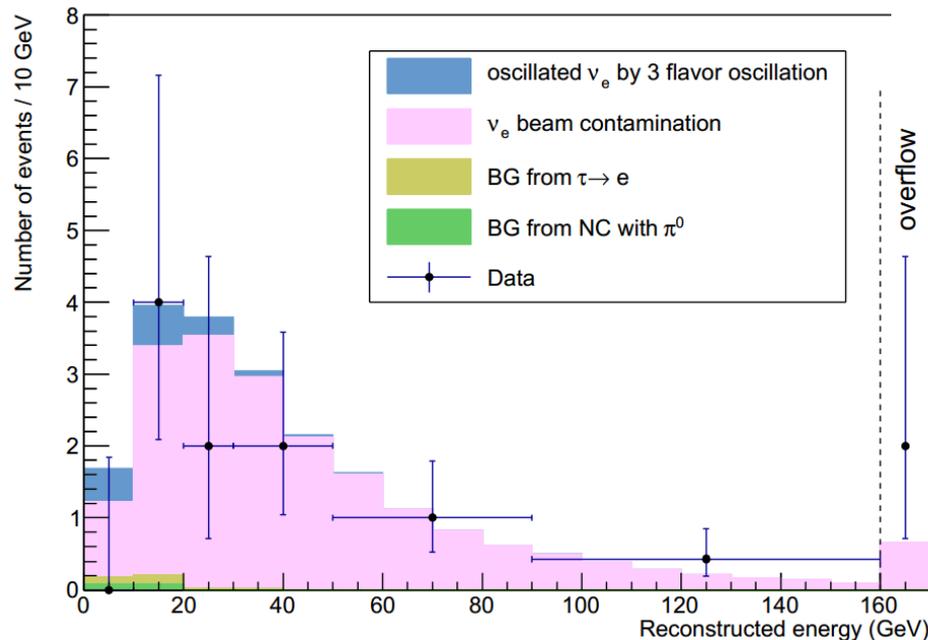
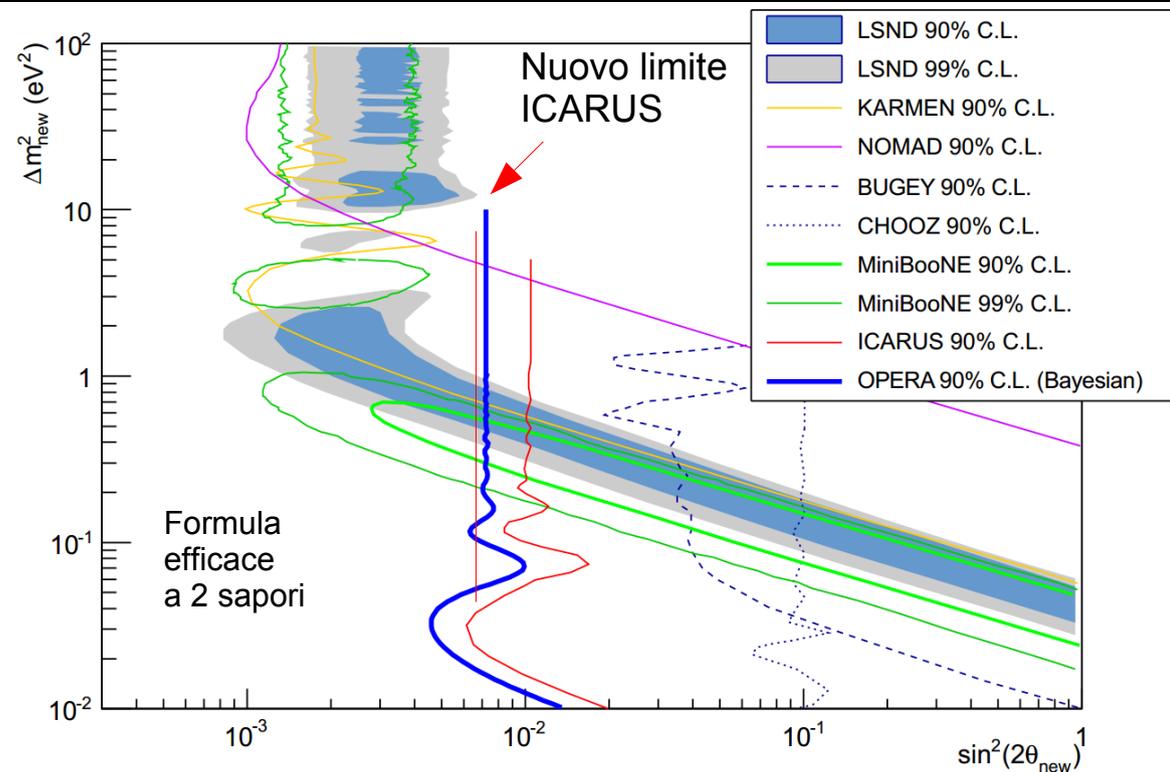
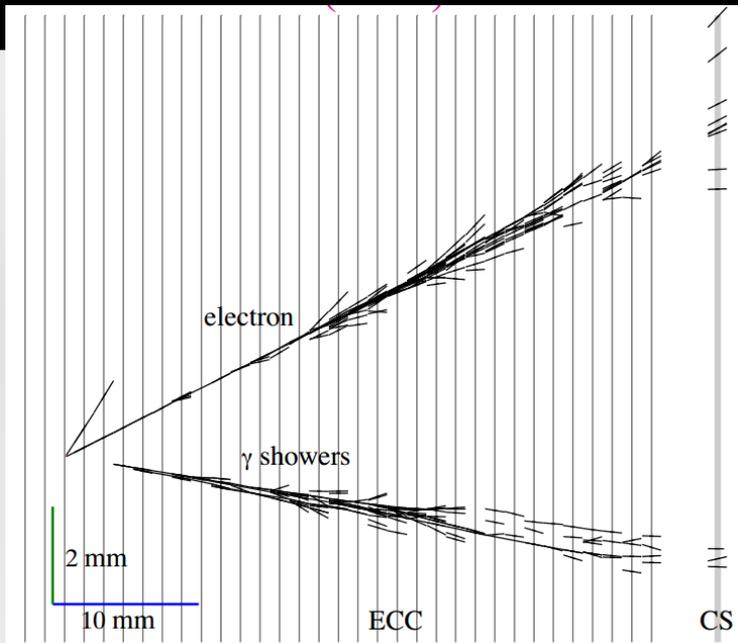
Weighting for efficiency, our limits on the number of events due to LSND anomaly are:
3.68 (90% CL) and
8.34 (99% CL).

which give the limits on oscillation probabilities:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \leq 3.4 \times 10^{-3} \text{ (90\% CL);}$$
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \leq 7.6 \times 10^{-3} \text{ (99\% CL).}$$



$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ con OPERA



505 interazioni senza muoni identificati
(~ meta` della statistica finale)

	E < 20 GeV	
Candidati ν_e	19	4
Fondo atteso	19.8 ± 2.8 (sys.)	4.6

$\sin^2 2\theta_{\text{NEW}} < 7.2 \times 10^{-3}$ (90% CL)

$\sin^2 2\theta_{13} < 0.44$ (90% CL)

Conclusioni

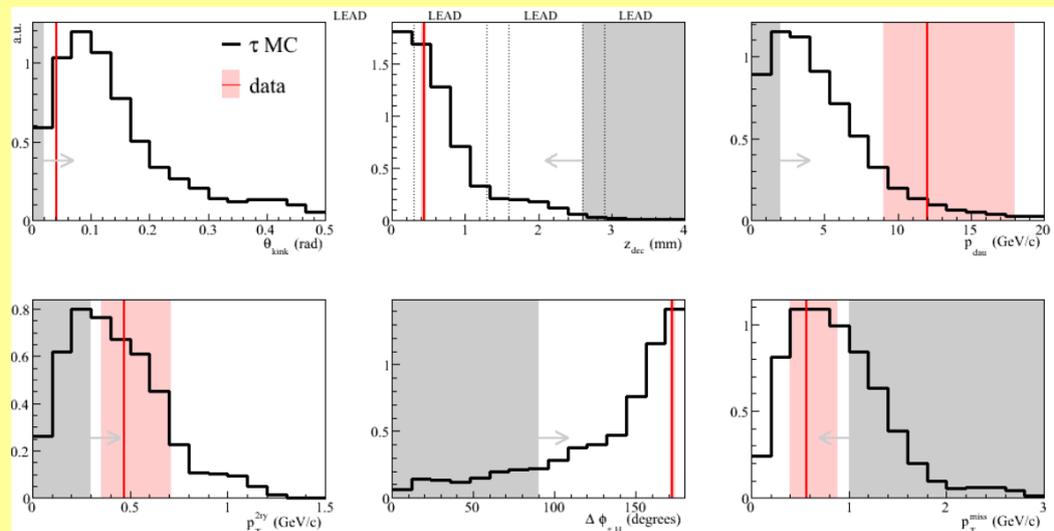
- L'ultimo anno e' stato ricco di **risultati importanti** che coronano i notevoli sforzi sperimentali delle collaborazioni coinvolte
- L'**appearance** e' un tassello importante nel quadro del modello delle oscillazioni
- Osservata da esperimenti ad **alto rapporto segnale/rumore**
 - OPERA: **4 candidati ν_τ** S/B=10. Assenza di segnale esclusa a **4.2 σ**
 - T2K: **28 candidati ν_e** . S/B 4-5. $\theta_{13} = 0$ escluso a **7.5 σ**
- T2K: Misure di “precisione” della matrice di mixing (θ_{23}), **primi hints su δ_{CP}**
- ICARUS (e OPERA): Limiti su effetti da **neutrini sterili** su baseline lunga

Ci sono le basi potenziali per prolungare questa “serie positiva” nel futuro mantenendo un ruolo importante nel quadro internazionale

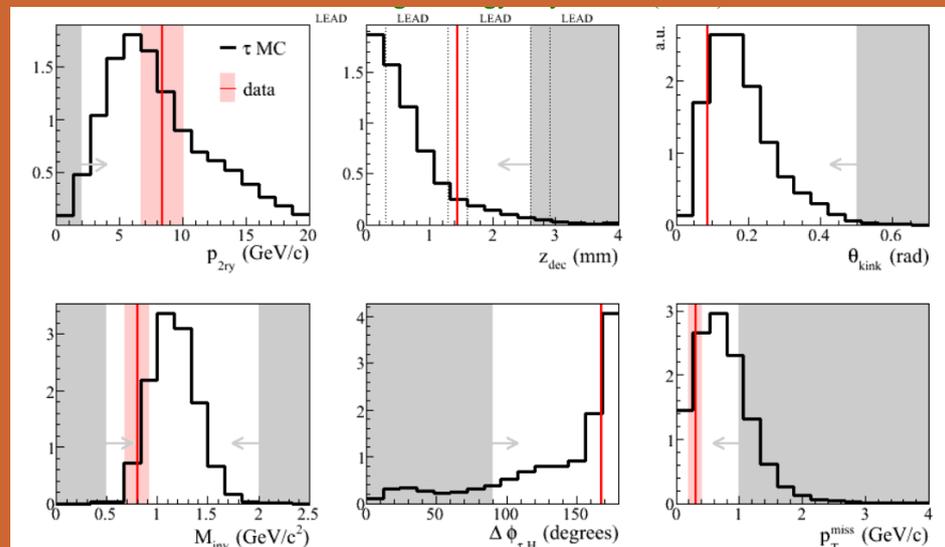
- **grande θ_{13} + esperienza su rivelatori chiave (alta granularita`)**
- **→ CP violation leptonica + nuovi fenomeni (p.e. ν sterili)**

Variabili cinematiche per i quattro candidati

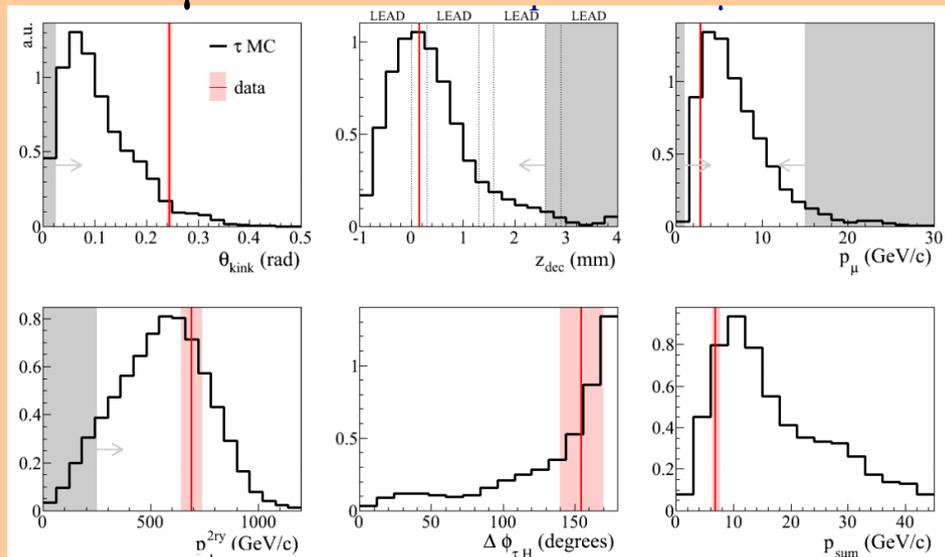
$\tau \rightarrow 1h$



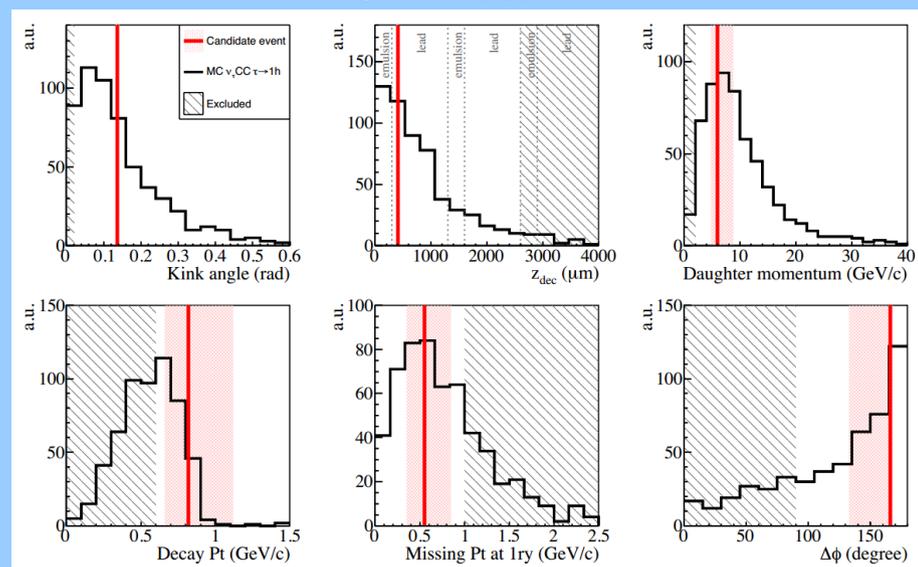
$\tau \rightarrow 3h$



$\tau \rightarrow \mu$

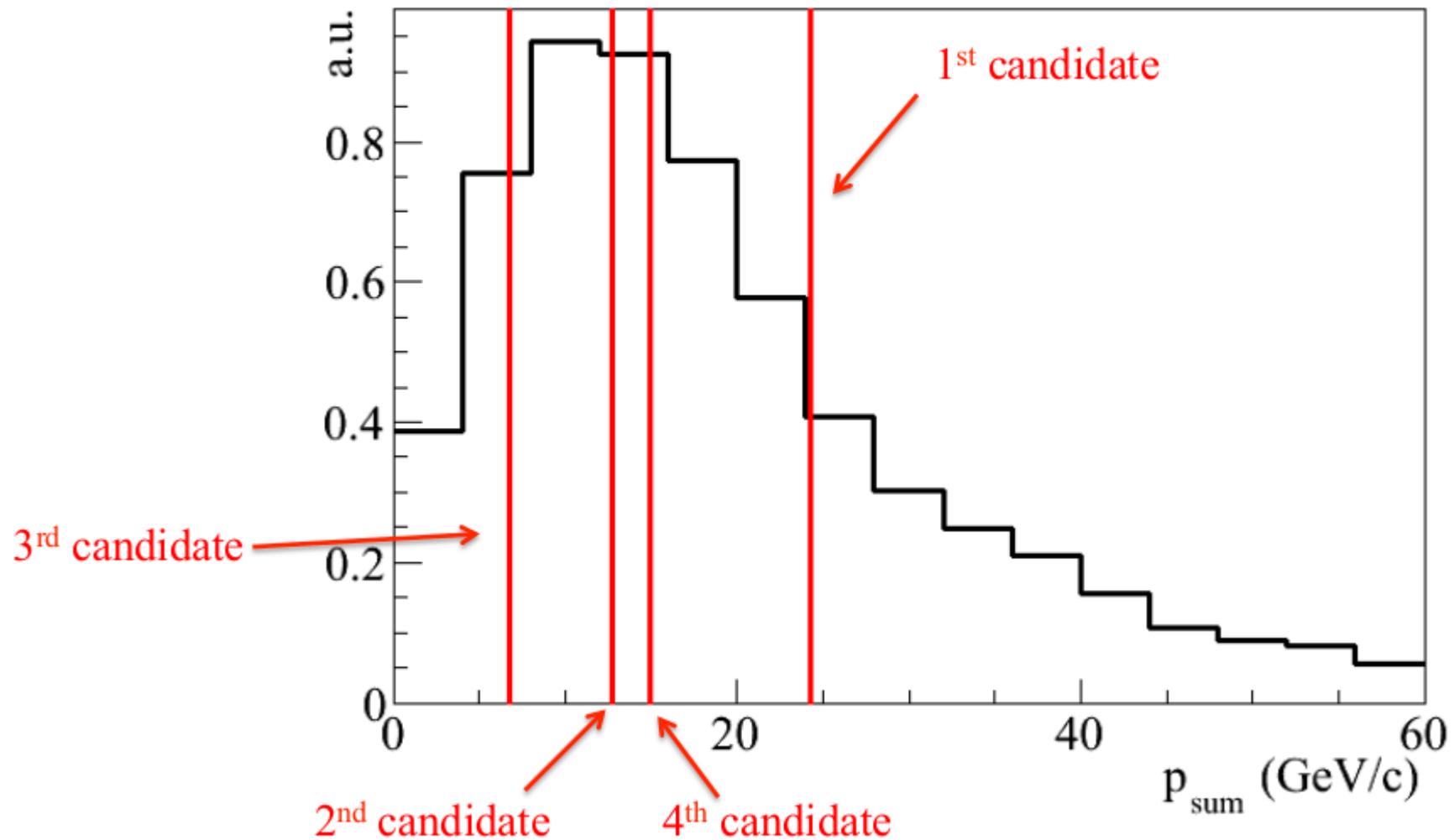


$\tau \rightarrow 1h$



Visible energy of all the candidates

Sum of the momenta of charged particles and γ 's measured in emulsion



Vista schematica a bilanciamento in pT

Transverse plane

