

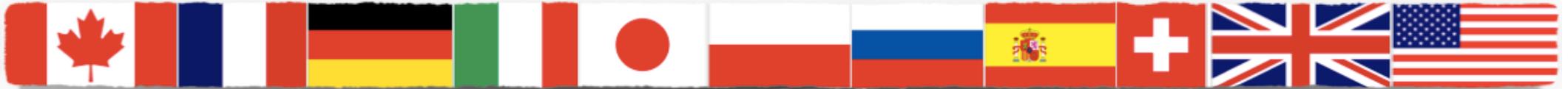
Misure di sezione d'urto al GeV con T2K

Lorenzo Magaletti per T2K Italia

10 Novembre 2015

In questo talk:

- 📌 **L'esperimento T2K**
- 📌 **Near detector complex**
 - Rivelatore on-axis INGRID
 - Rivelatore off-axis ND280
- 📌 **Importanza delle sezioni d'urto nelle analisi di oscillazione**
- 📌 **Misure di sezioni d'urto con T2K**
- 📌 **Nuove misure di sezioni d'urto con T2K presentate alle conferenze estive**
- 📌 **Risultati finali e prospettive**



Canada

TRIUMF
 U. Alberta
 U. B. Columbia
 U. Regina
 U. Toronto
 U. Victoria
 U. Winnipeg
 York U.

France

CEA Saclay
 IPN Lyon
 LLR E. Poly.
 LPNHE Paris

Poland

IFJ PAN, Cracow
 NCBJ, Warsaw
 U. Silesia, Katowice
 U. Warsaw
 Warsaw U. T.
 Wroklaw U.

Russia

INR

Germany

Aachen U.



~350 partecipanti, 58 istituzioni, 11 nazioni, 3 continenti

United Kingdom

Imperial C. London
 Lancaster U.
 Oxford U.
 Queen Mary U. L.
 STFC/RAL/Daresbury
 U. Liverpool
 U. Sheffield
 U. Warwick

Spain

IFAE, Barcelona
 IFIC, Valencia

Japan

ICRR Kamioka
 ICRR RCCN
 Kavli IPMU
 KEK
 Kobe U.
 Kyoto U.
 Miyagi U. Edu.
 Osaka City U.
 Okayama U.
 Tokyo Metropolitan U.
 U. Tokyo

USA

Boston U.
 Colorado S. U.
 Duke U.
 Louisiana S. U.
 Stony Brook U.
 U. C. Irvine
 U. Colorado
 U. Pittsburgh
 U. Rochester
 U. Washington

ITALY

INFN, U. Bari
 INFN, U. Napoli
 INFN, U. Padova
 INFN, U. Roma

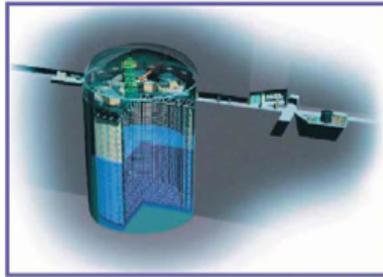
Switzerland

ETH Zurich
 U. Bern
 U. Geneva

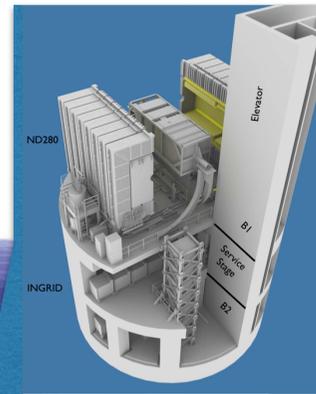
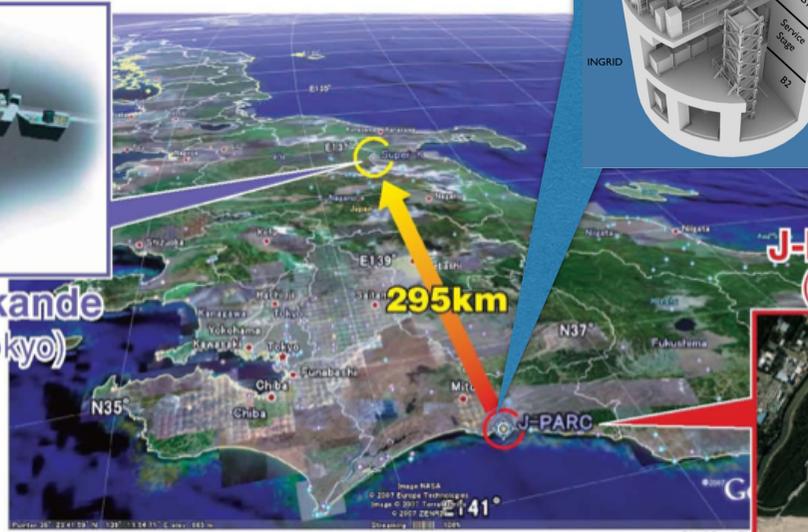
L'esperienza T2K

T2K è un esperimento di tipo LBL capace di osservare l'oscillazione del neutrino in un fascio ad elevata purezza di ν_μ

rivelatore lontano (295 km)
SK ("off-axis")

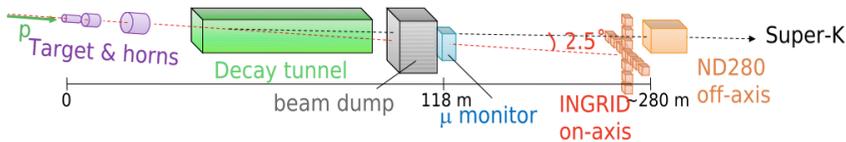


Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)

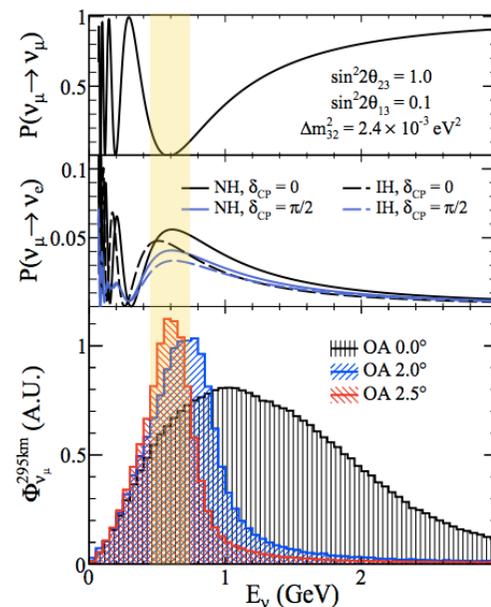


rivelatori vicini (280 m)
INGRID ("on-axis")
ND280 ("off-axis")

J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



T2K è il primo esperimento al mondo ad utilizzare un fascio di neutrini "off-axis"



$E_\nu \sim 0.6 \text{ GeV}$

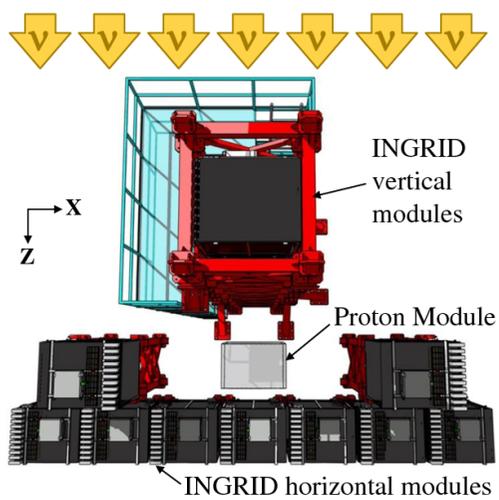
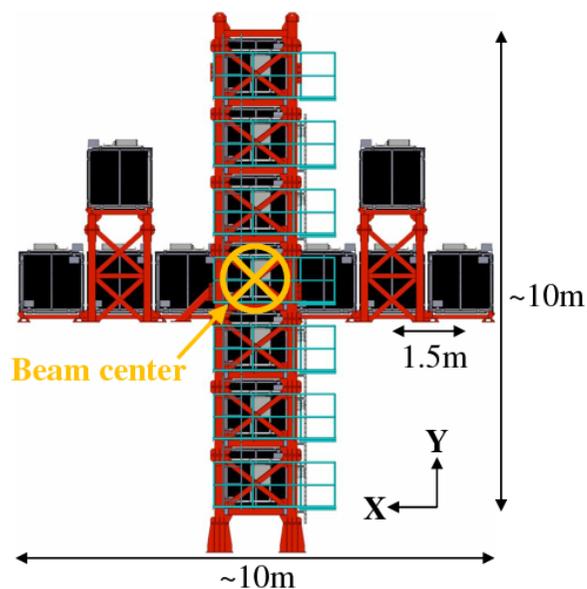
Vantaggi del fascio "off-axis":

- Massimizzazione effetto dell'oscillazione del neutrino
- Riduzione al minimo del fondo (piccola coda ad alta energia)

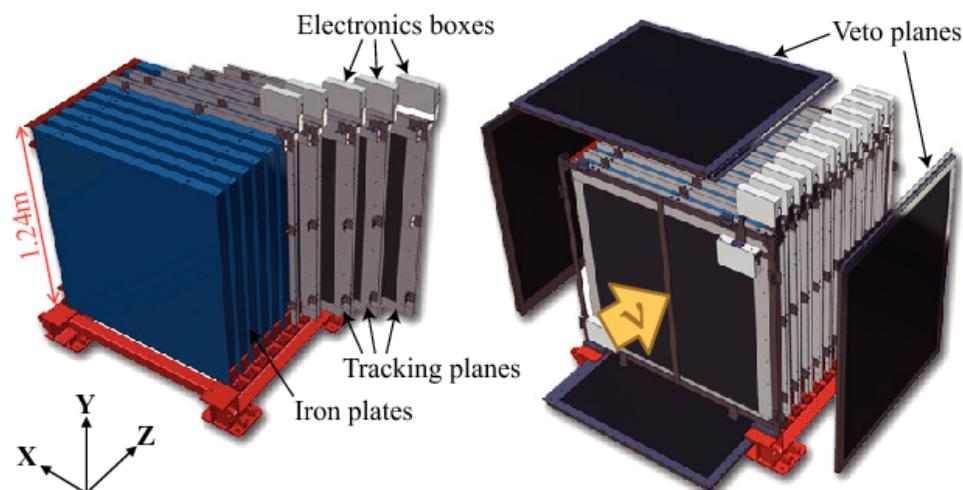
INGRID (“on-axis”)

INGRID (Interactive Neutrino GRID)

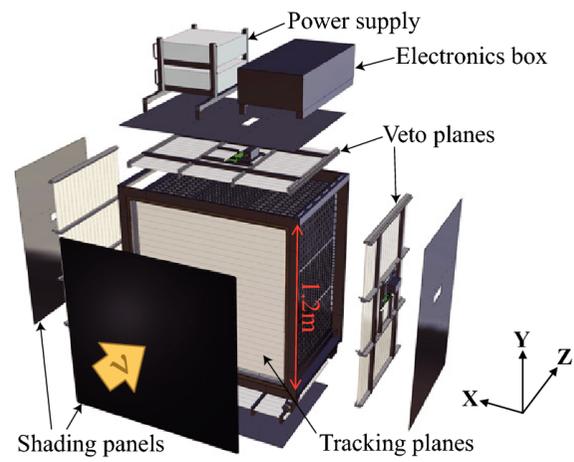
- Misura diretta della direzione, intensità e stabilità del fascio “on-axis”
 - misura del centro del fascio con precisione migliore di 10 cm (4 mrad)
- Studio delle sezioni d’urto inclusive ed esclusive sopra il GeV



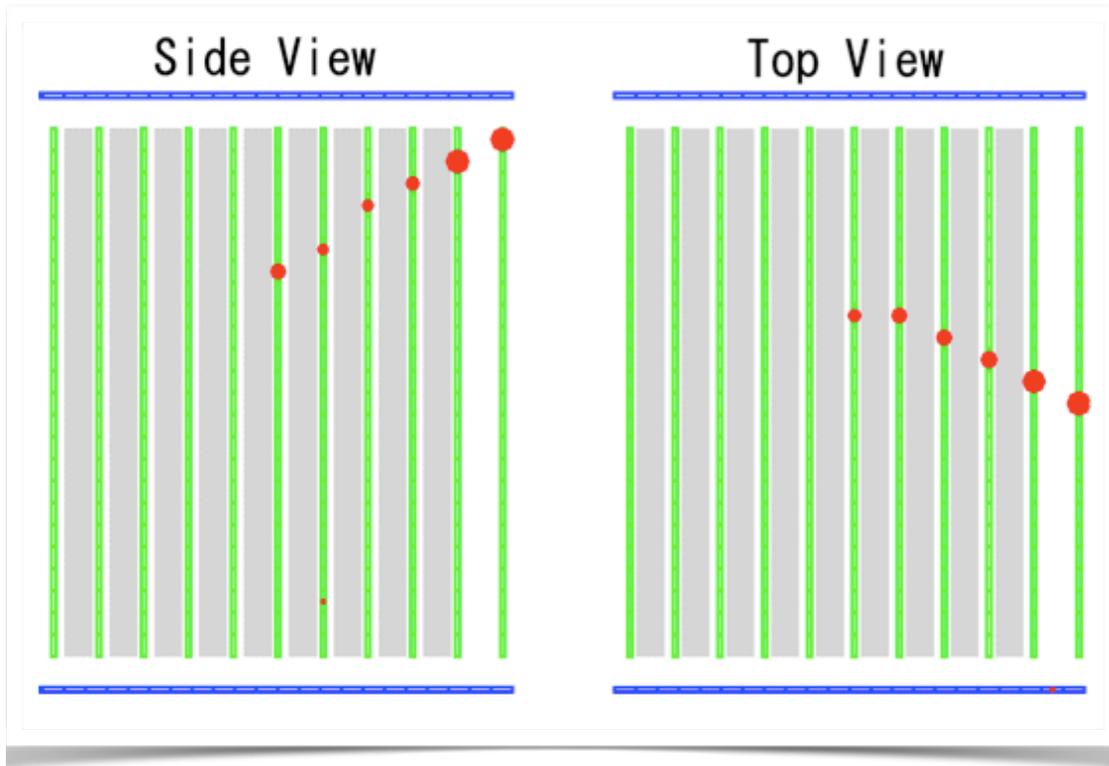
16 moduli scintillatore/ferro



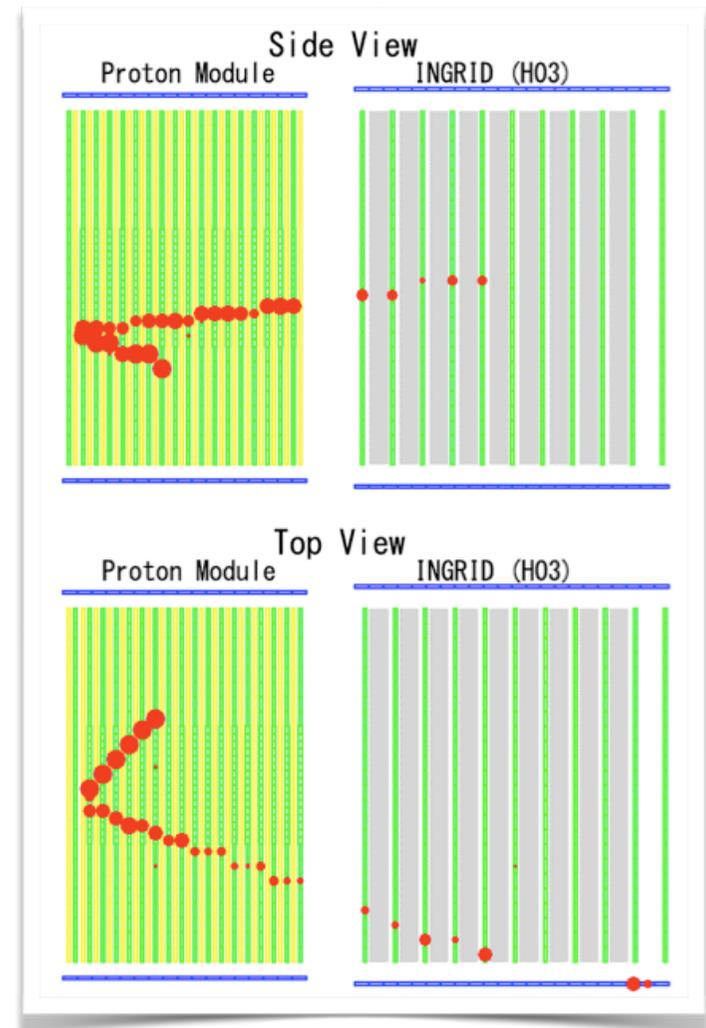
I modulo extra (“Proton module”) di solo scintillatore:
Rivelazione di $\mu^- + p$ prodotti in interazioni CC



INGRID Event gallery



Interazione ν_μ in uno degli "standard module"



Interazione ν_μ nel "proton module"

ND280 (“off-axis”)

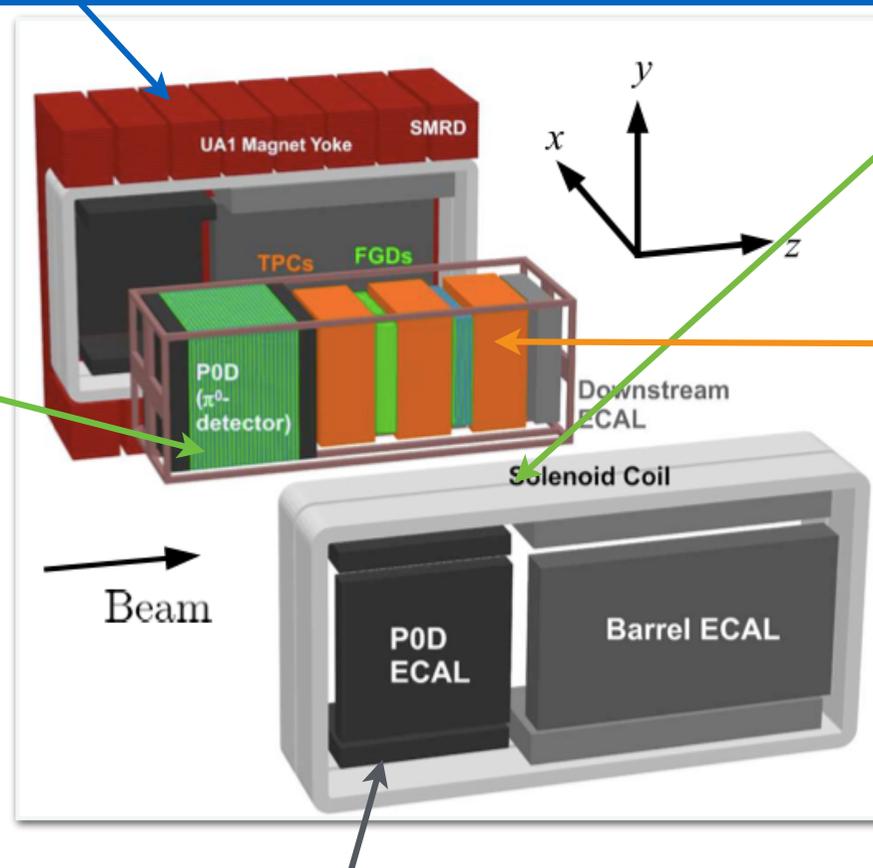
ND280 (Off-axis Near Detector @ 280 m from the target)

- Misura spettro non oscillato
- Riduzione dei sistematici legati a flusso e sezioni d’urto a SK
- Contaminazione intrinseca di neutrini di diversa specie
- Studio della produzione di π^0 da NC
- Studio delle sezioni d’urto esclusive sotto il GeV

Il **Magnete UA1/NOMAD** produce un campo magnetico da 0.2 T.

Gli **SMRD** (installati all’interno del magnete): piani di scintillatore che servono a ricostruire μ a grande angolo, raggi cosmici ed eventi correlati al fascio che interagisce con le pareti del pozzo e nel magnete.

P0D:
piani di scintillatore intervallati da strati di piombo/ottone e acqua. “Target” attivo per la misura di fotoni provenienti da interazioni NC e $CC\pi^0$



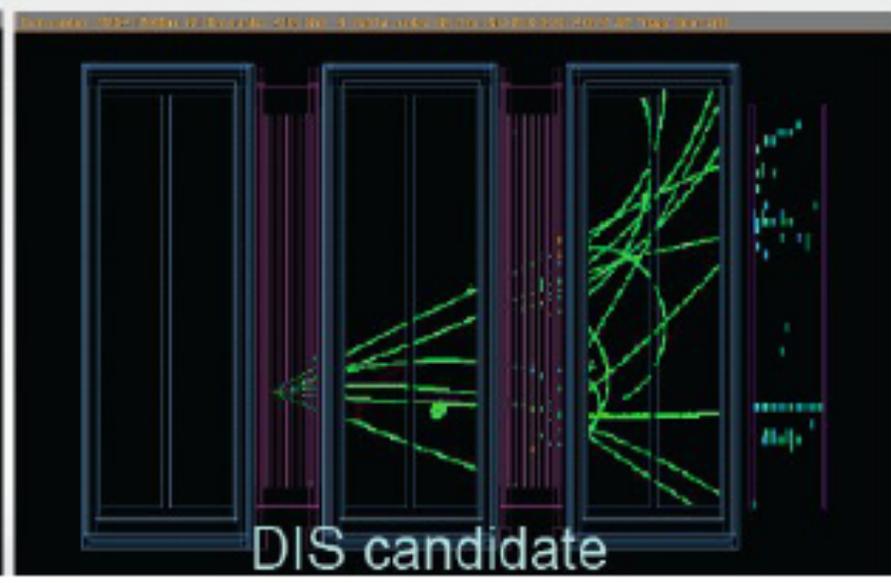
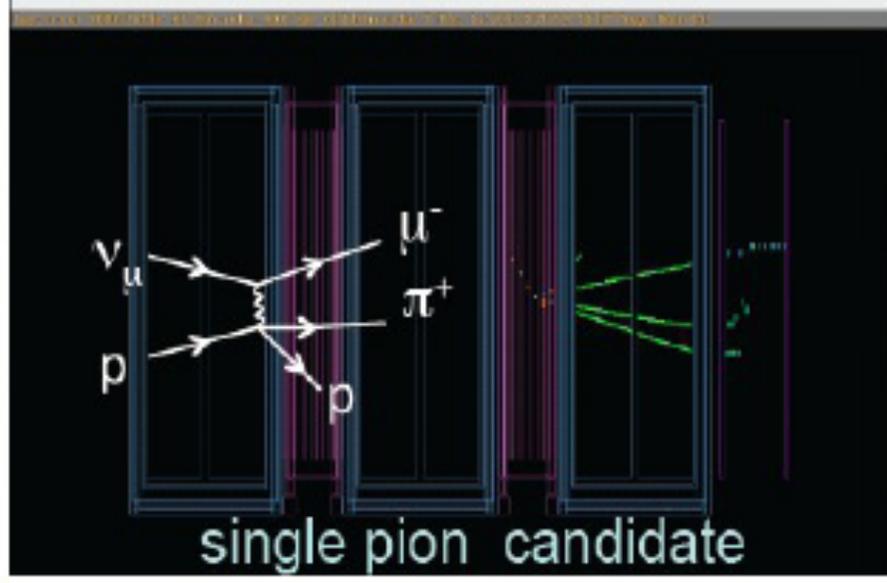
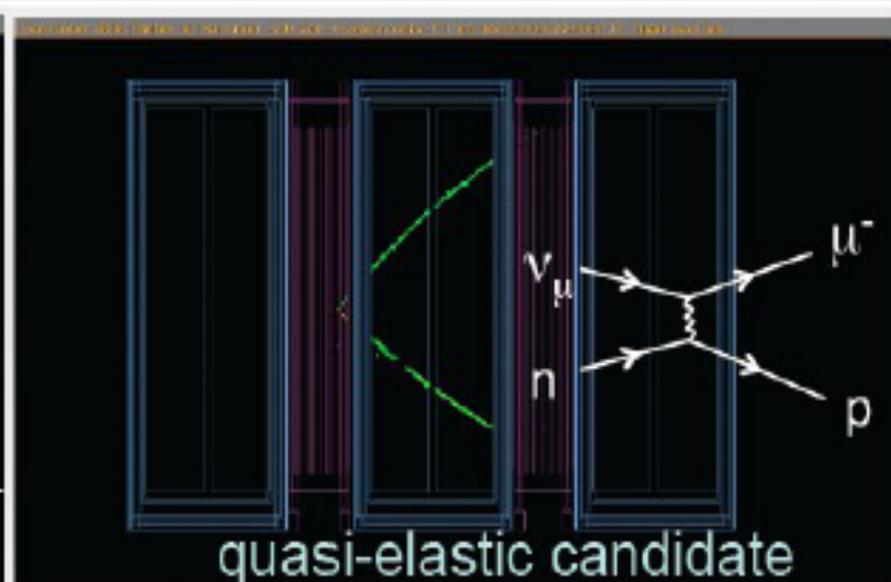
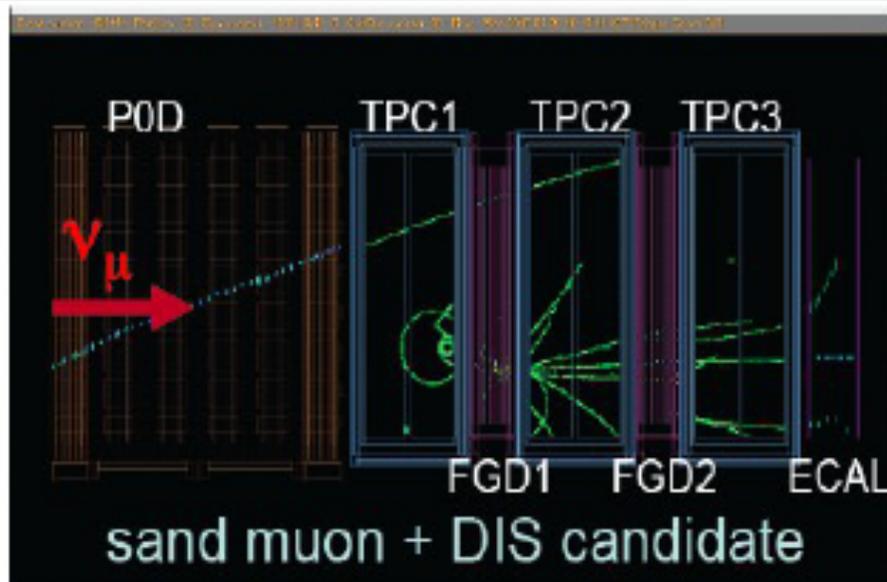
Tracciatore:

2 **FGD**: piani X e Y di barre di scintillatore utilizzate come “target” per le interazioni di ν e tracciamento di particelle cariche.

3 **TPC**: forniscono un tracciamento 3D, misura di carica, impulso e dE/dx delle particelle cariche.

ECAL: circonda i rivelatori interni ed ha capacità di separazione $\gamma/e/\mu$. E’ un calorimetro a campionamento costituito da 13 moduli indipendenti di piani XY costituiti da scintillatore plastico/piombo.

ND280 off-axis event gallery



Incertezze sistematiche nelle analisi di oscillazione di T2K

Nelle analisi di oscillazione, l'errore sul numero degli eventi predetti a SK viene ridotto utilizzando i dati raccolti a ND280.

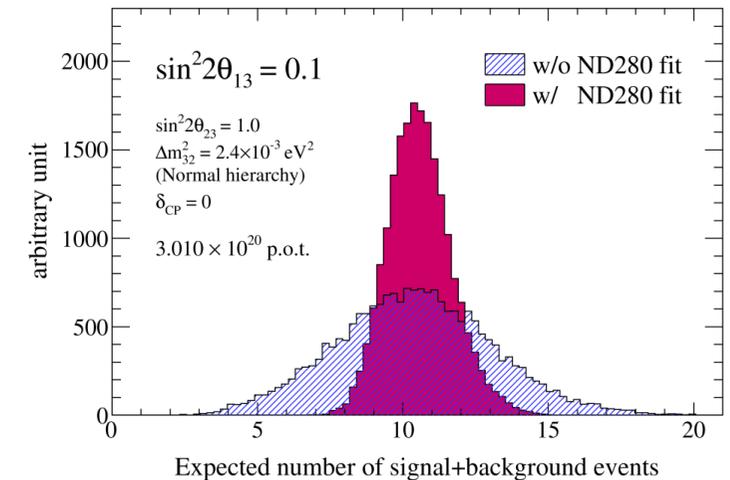
errore frazionale sul numero degli eventi predetti a SK

2014 → 2015

		ν_μ sample	ν_e sample	$\bar{\nu}_\mu$ sample	$\bar{\nu}_e$ sample
ν flux		16%	11%	7.1%	8%
ν flux and cross section	w/o ND measurement	21.8%	26.0%	9.2%	9.4%
	w/ ND measurement	2.7%	3.1%	3.4%	3.0%
ν cross section due to difference of nuclear target btw. near and far		5.0%	4.7%	10%	9.8%
Final or Secondary Hadronic Interaction		3.0%	2.4%	2.1%	2.2%
Super-K detector		4.0%	2.7%	3.8%	3.0%
total	w/o ND measurement	23.5%	26.8%	14.4%	13.5%
	w/ ND measurement	7.7%	6.8%	11.6%	11.0%

errori sistematici sulle x-sec non ridotti con i dati raccolti a ND280:

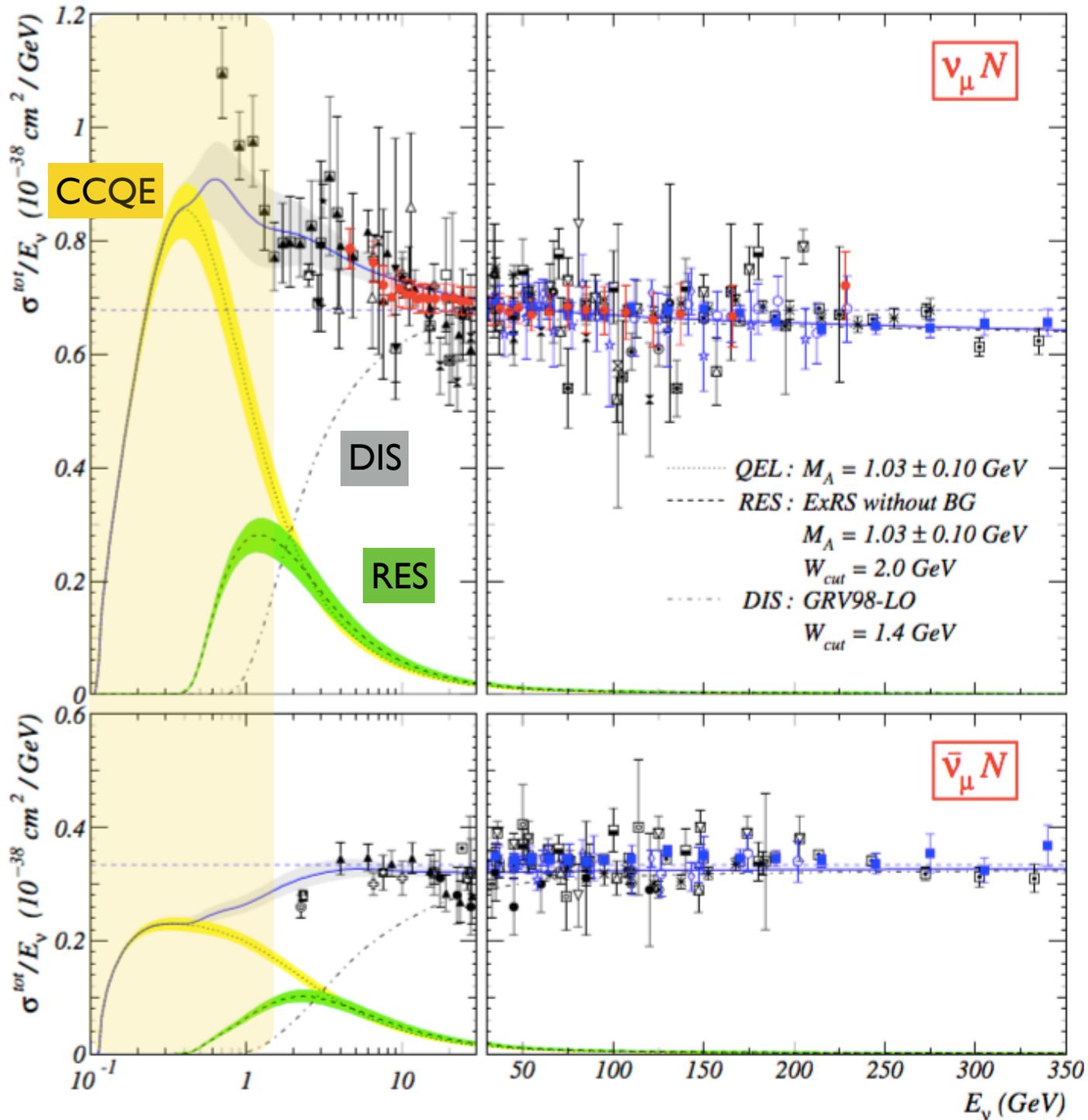
- Effetti nucleari in acqua
- Effetti "Multi-nucleon" (MEC) in acqua



Le future misure di sezione d'urto a ND280 saranno cruciali per ridurre le incertezze sistematiche al livello del ~3% nelle analisi di oscillazione

*Gli errori del 2014 non includono gli effetti dei MEC

Tipi di interazione alle energie di T2K



Misure di sezione d'urto con T2K

Le misure di sezione d'urto con ND280:

- ν_{μ} CC Inclusivo su C (Phys.Rev. D87 (2013) 9, 092003)
- ν_e CC Inclusivo su C (Phys.Rev.Lett. 113 (2014) 24, 241803)
- ν_{μ} CCQE su C (arXiv:1411.6264)

Verifica dei modelli di sezione d'urto implementati nei generatori (NEUT GENIE) utilizzati da T2K

Le misure di sezione d'urto con INGRID:

- ν_{μ} CC Inclusivo su CH e Fe (Phys.Rev. D90 (2014) 5, 052010)
- ν_{μ} CC Inclusivo su Fe nel range di energia 1-3 GeV (arXiv:1509.06940)
- ν_{μ} CCQE su C (Phys.Rev. D91 (2015) 11, 112002)

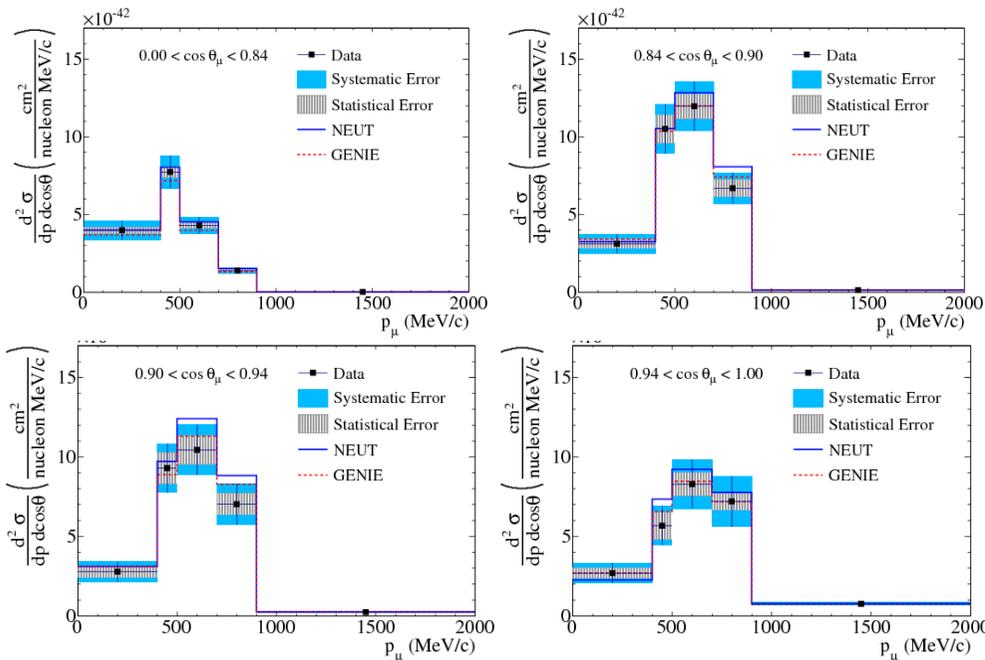
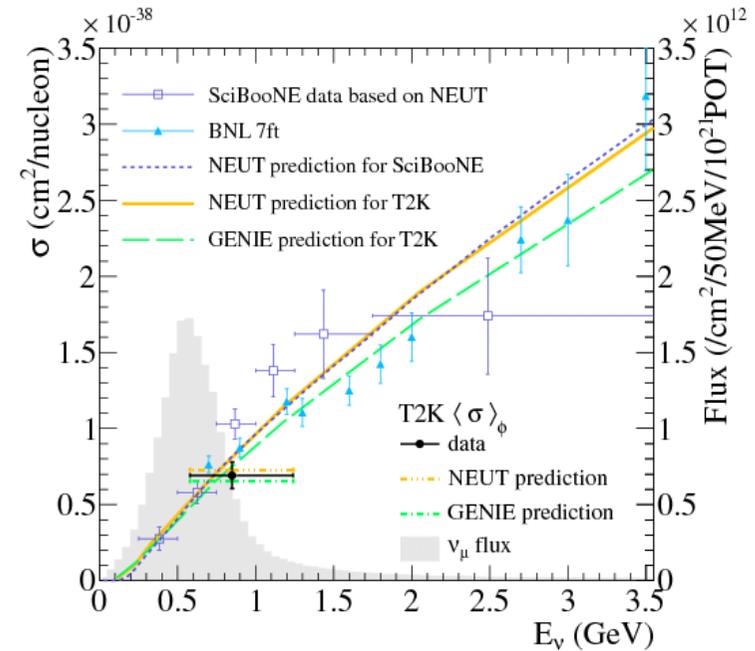
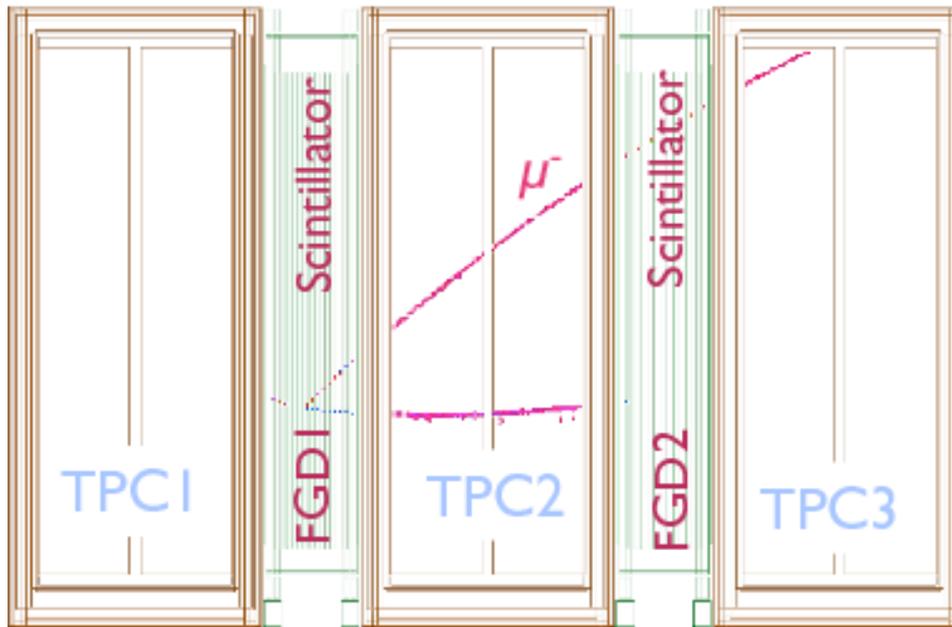
Verifica della validità dei modelli di sezione d'urto ad energie superiori al GeV e con target diversi dal C

Goal delle nuove misure:

- Aggiornamento delle misure esistenti incrementando statistica e spazio delle fasi
- Riduzione degli errori sistematici nelle analisi di oscillazione
- Misure di sezione d'urto su H₂O, O, Ar, Fe

Misure di x-sec @ ND280: ν_μ CC Inclusivo su C

Run #: 4200 Evt #: 24083 Time: Sun 2010-03-21 22:33:25 JST



Buon accordo della misura con le predizioni di NEUT/GENIE

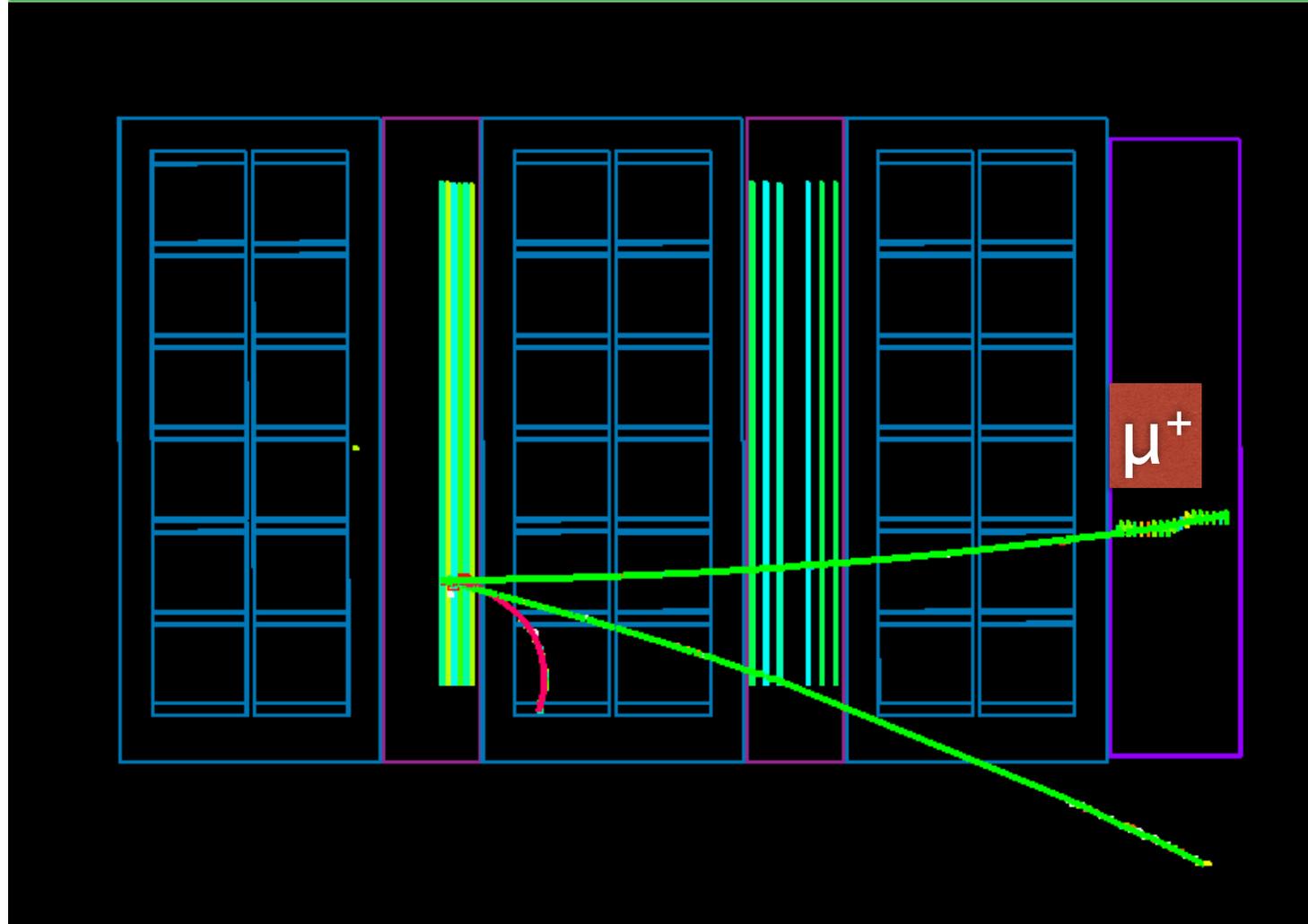
Statistica utilizzata 1.08×10^{20} POT

Sviluppi futuri:

- Misura della sezione d'urto $\bar{\nu}_\mu$ CC con i dati raccolti in anti-neutrino beam mode
- Misura a 4T con tutta la statistica raccolta in neutrino beam mode

Misure di χ -sec @ ND280: $\bar{\nu}_\mu$ CC Inclusivo su C

Run number : 10339 | SubRun number : 52 | Event number : 587757 | Spill : 19829 | Time : Sat 2014-06-07 14:43:54 JST | Partition : 63 | Trigger: Beam Spill



- 📌 Analisi in via di finalizzazione del gruppo INFN
- 📌 Prima misura di sezione d'urto di anti-neutrino in T2K!
- 📌 Risultati nelle prossime conferenze invernali

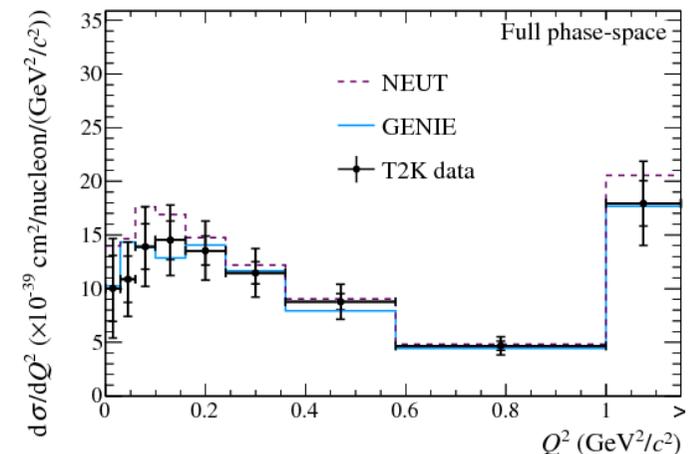
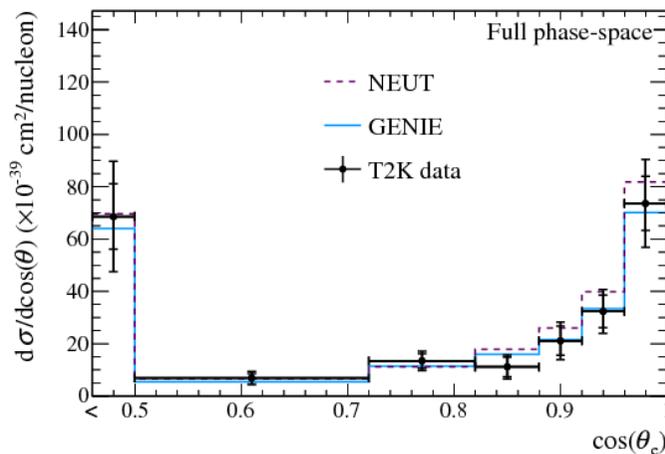
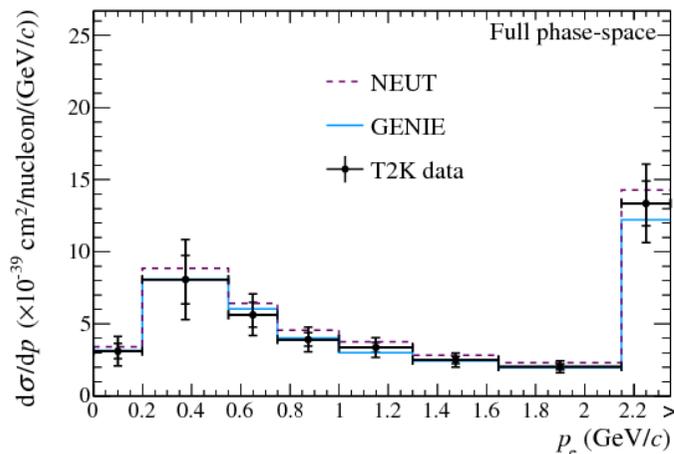
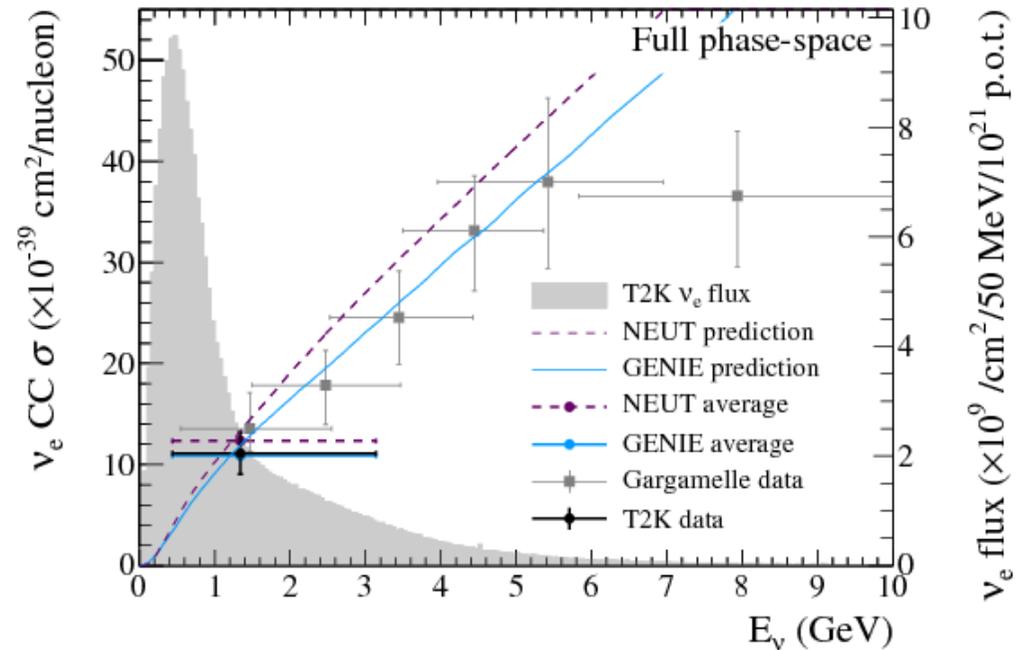
Misure di x-sec @ ND280: ν_e CC Inclusivo su C

Prima misura di sezione d'urto ν_e CC dopo Gargamelle (1978)

Prima misura di sezione d'urto ν_e CC differenziale di sempre!

● Buon accordo della misura con le predizioni di NEUT/GENIE

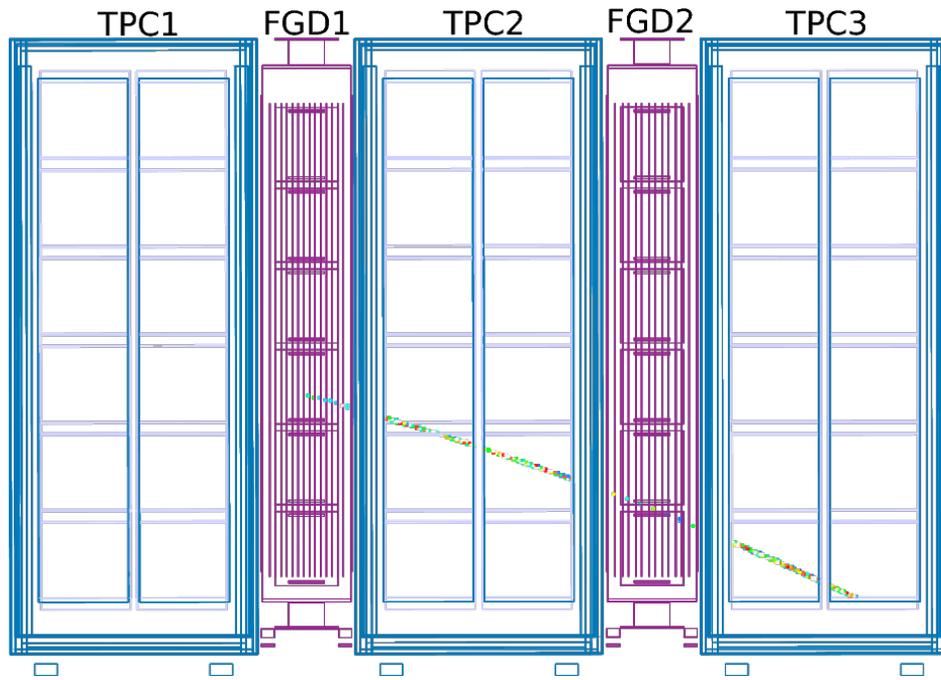
● Statistica utilizzata 6.04×10^{20} POT



Sviluppi futuri:

● Misura della sezione d'urto $\bar{\nu}_e$ CC con i dati raccolti in anti-neutrino beam mode

Misure di x-sec @ ND280: ν_μ CCQE su C

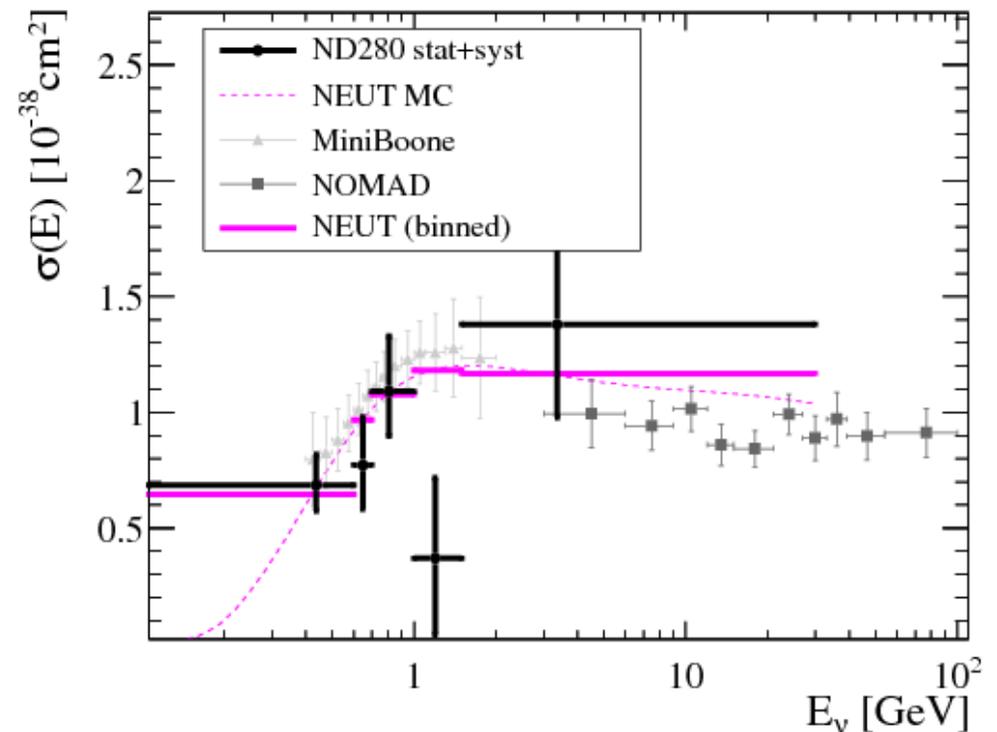


Buon accordo con le precedenti misure di NOMAD e MiniBoone

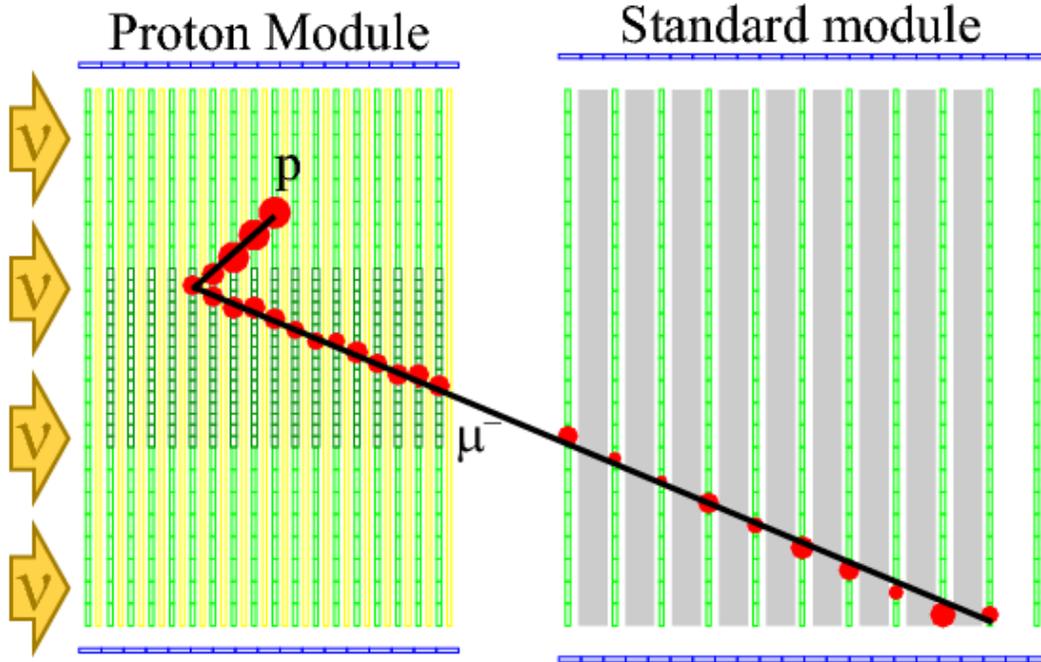
Misura model dependent

Buon accordo della misura con le previsioni di NEUT ($M_A^{\text{QE}} = 1.2 \text{ GeV}/c^2$)

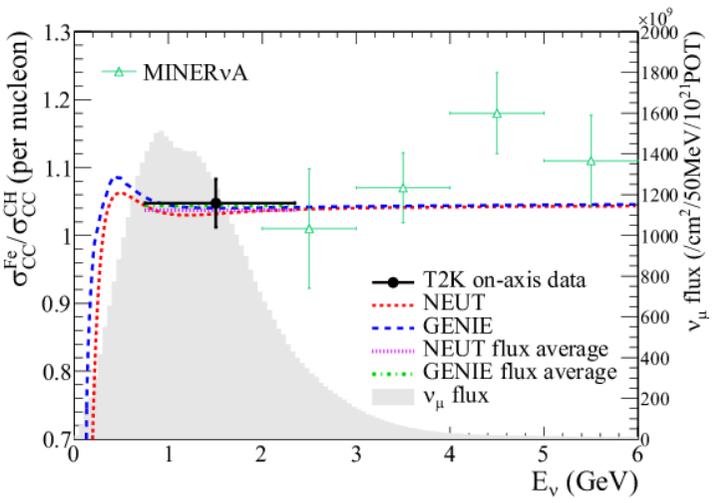
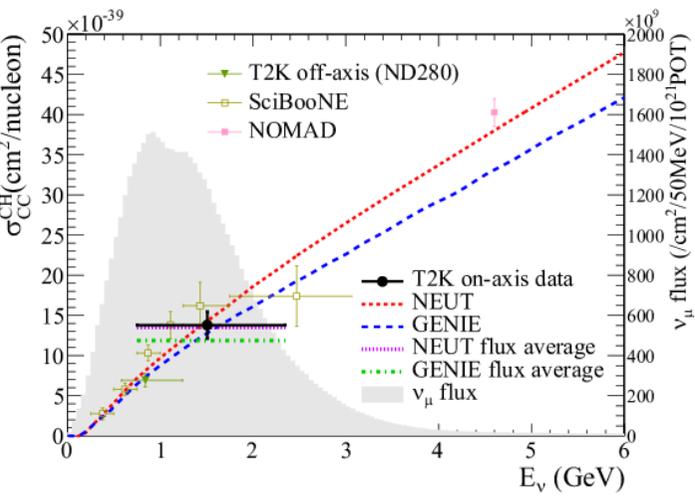
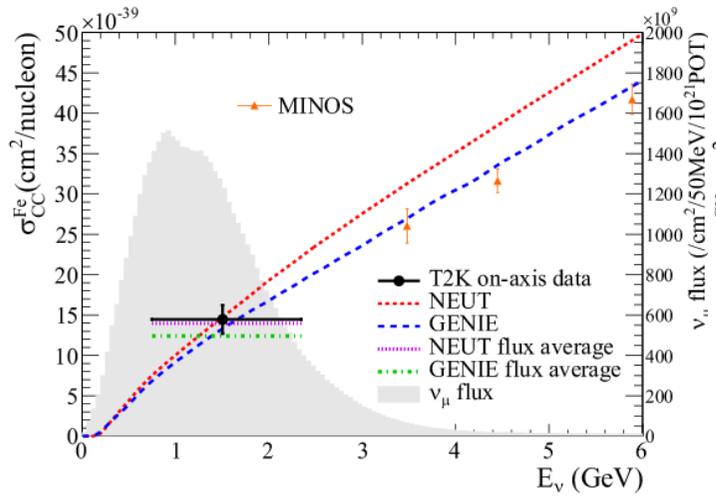
Statistica utilizzata 2.6×10^{20} POT



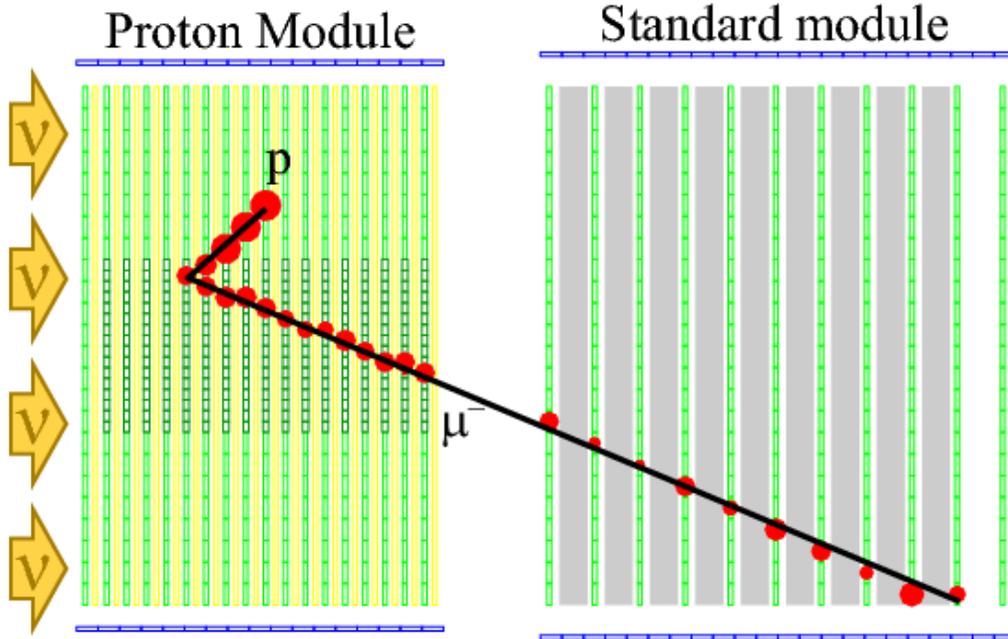
Misure di x-sec @ INGRID: ν_μ CC Inclusivo su CH e Fe



- Buon accordo della misura con le predizioni di NEUT/GENIE
- Test della corretta implementazione degli effetti nucleari per Fe e CH nei generatori NEUT/GENIE
- Statistica utilizzata 6.04×10^{20} POT
- La stessa misura nel range 1-3 GeV (arXiv:1509.06940) conferma il buon accordo con le predizioni NEUT/GENIE

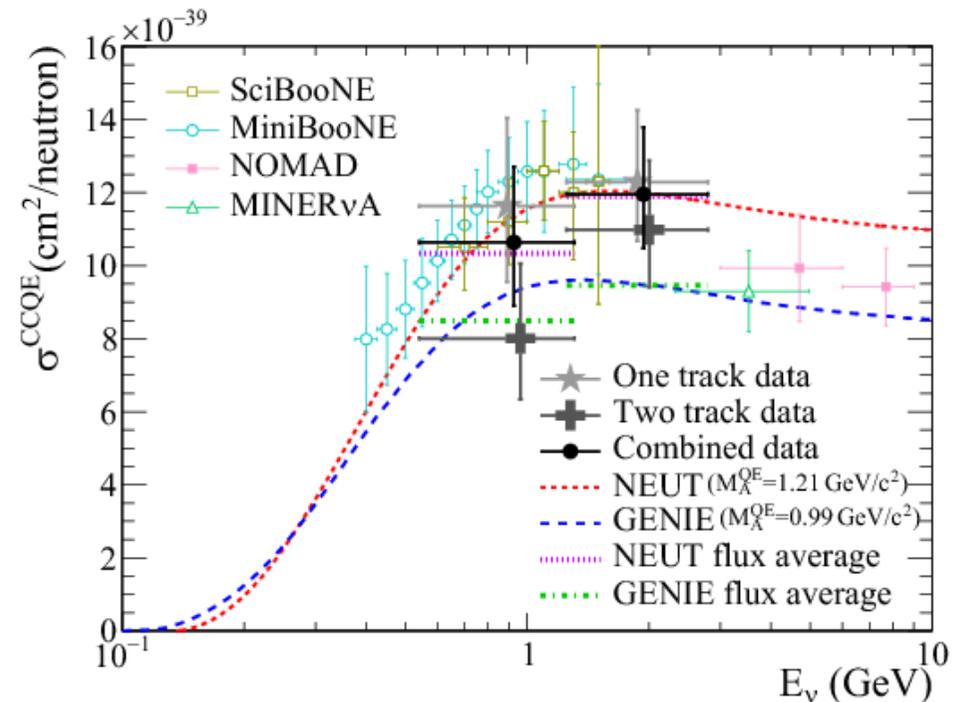


Misure di x-sec @ INGRID: ν_μ CCQE



- Misura di sezione d'urto ν_μ CCQE a 0.93 GeV e 1.94 GeV
- Buon accordo della misura con le predizioni di NEUT/GENIE
- Statistica utilizzata 6.04×10^{20} POT

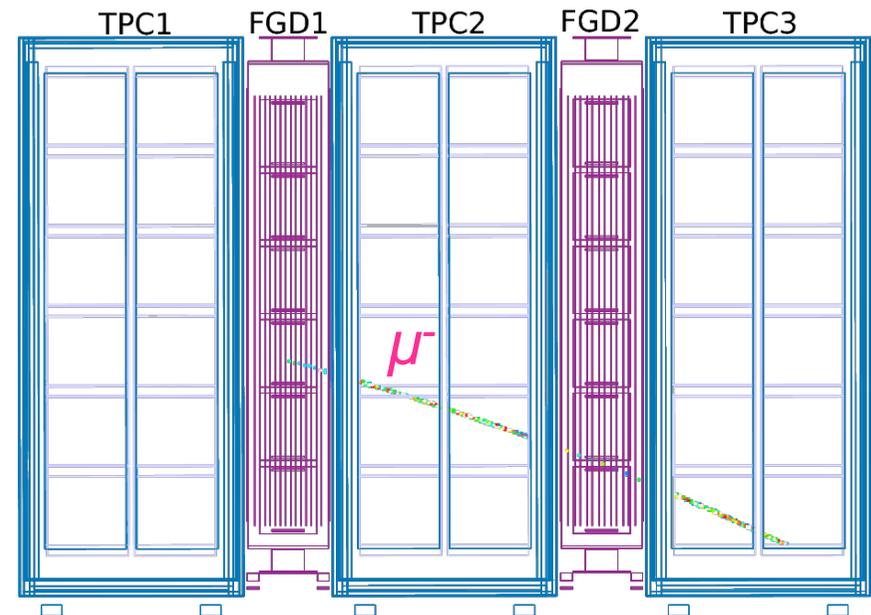
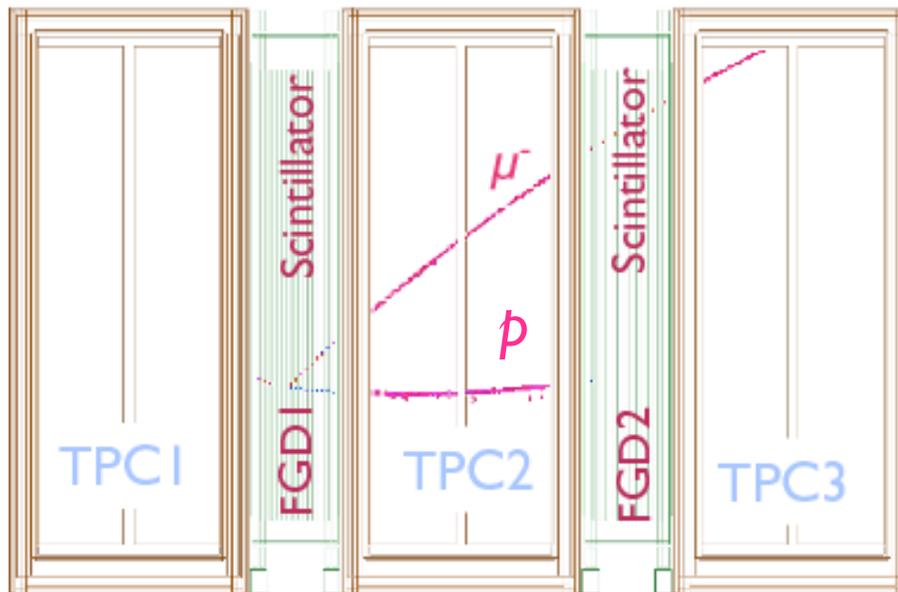
- Test degli effetti nucleari e MEC
- Misura della sezione d'urto CCQE dipende da modelli nucleari ed esistenza dei MEC al livello del 10%



Nuove misure di sezione d'urto

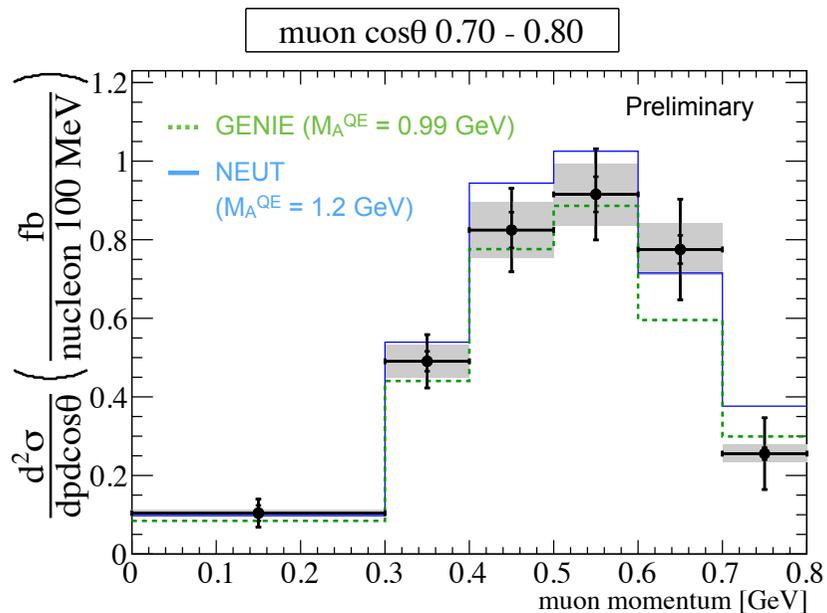
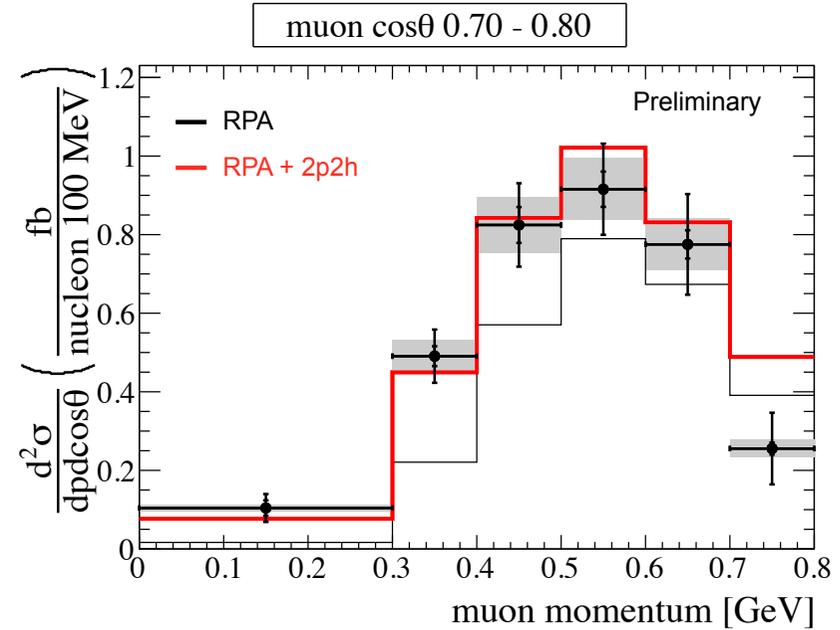
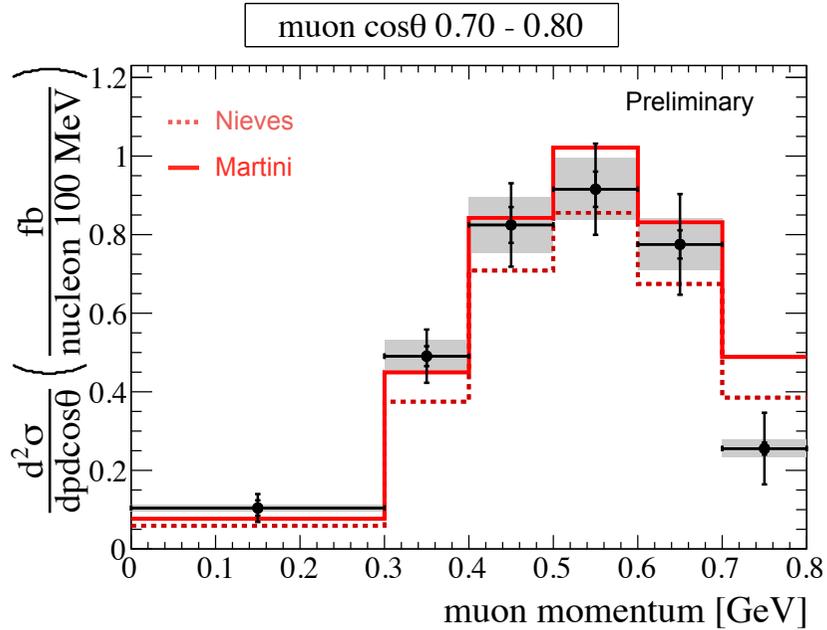
Misure di x-sec @ ND280: ν_μ CC0 π

Run #: 4200 Evt #: 24083 Time: Sun 2010-03-21 22:33:25 JST



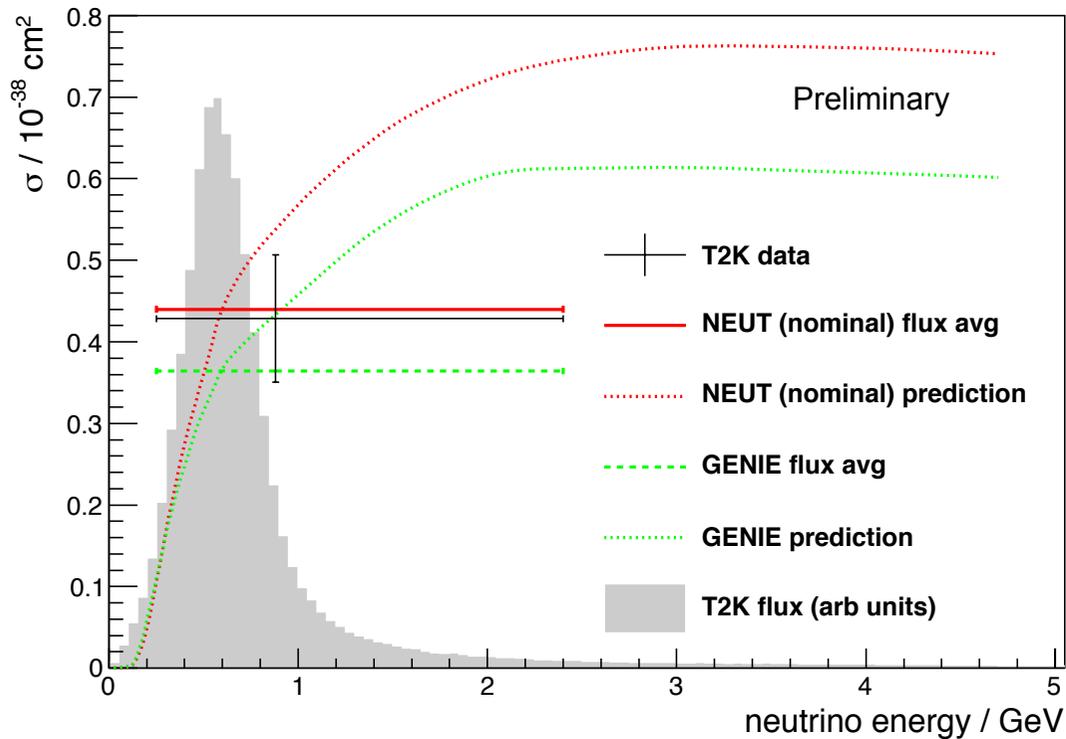
- Le interazioni ν_μ CCQE ($\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$) sono caratterizzate dalla presenza di un μ^- e di un protone nello stato finale
- Molto spesso il protone ha bassa energia tale da non essere ricostruito da ND280
- Per questo motivo definiamo la categoria CC0 π (CCQE-like) a cui appartengono tutti gli eventi senza pioni nello stato finale

Misure di x-sec @ ND280: ν_μ CC0 π



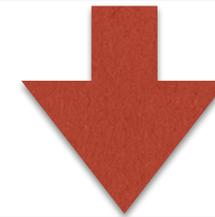
- Buon accordo della misura con le predizioni di NEUT/GENIE
- Buon accordo con i modelli di Martini e Nieves
- I dati sembrano preferire un modello che preveda l'esistenza delle interazioni multi-nucleone (MEC)

Prospettive dell'analisi ν_μ CC0 π a ND280



Estensioni dell'analisi:

- Studio della sezione d'urto CC0 π in acqua utilizzando l'FGD2 come target



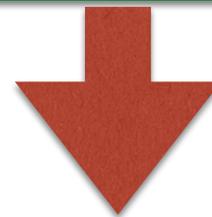
Studio degli effetti nucleari in acqua



riduzione della relativa incertezza sistemica nelle analisi di oscillazione

Sviluppi futuri:

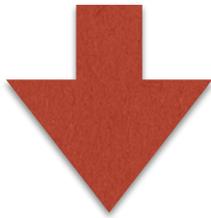
- Analysis $\bar{\nu}_\mu$ CC0 π con i dati raccolti in anti-neutrino beam mode (analisi INFN)



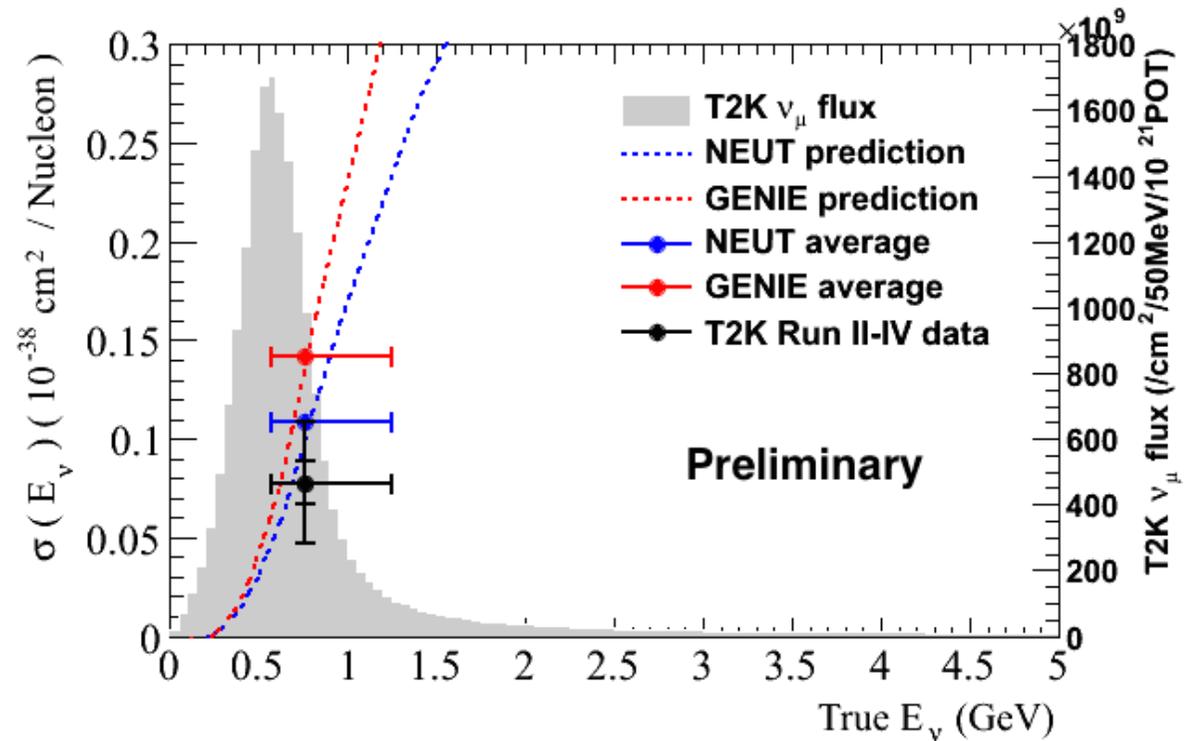
Identificazione univoca dei MEC \Rightarrow riduzione della relativa incertezza sistemica nelle analisi di oscillazione

Misure di x-sec @ ND280: ν_μ CCI π^+ in H_2O

La categoria ν_μ CCI π^+ comprende tutte le interazioni con produzione di un π^+ nello stato finale



Fondo per le analisi di oscillazione
=> importante verificare la correttezza dei modelli

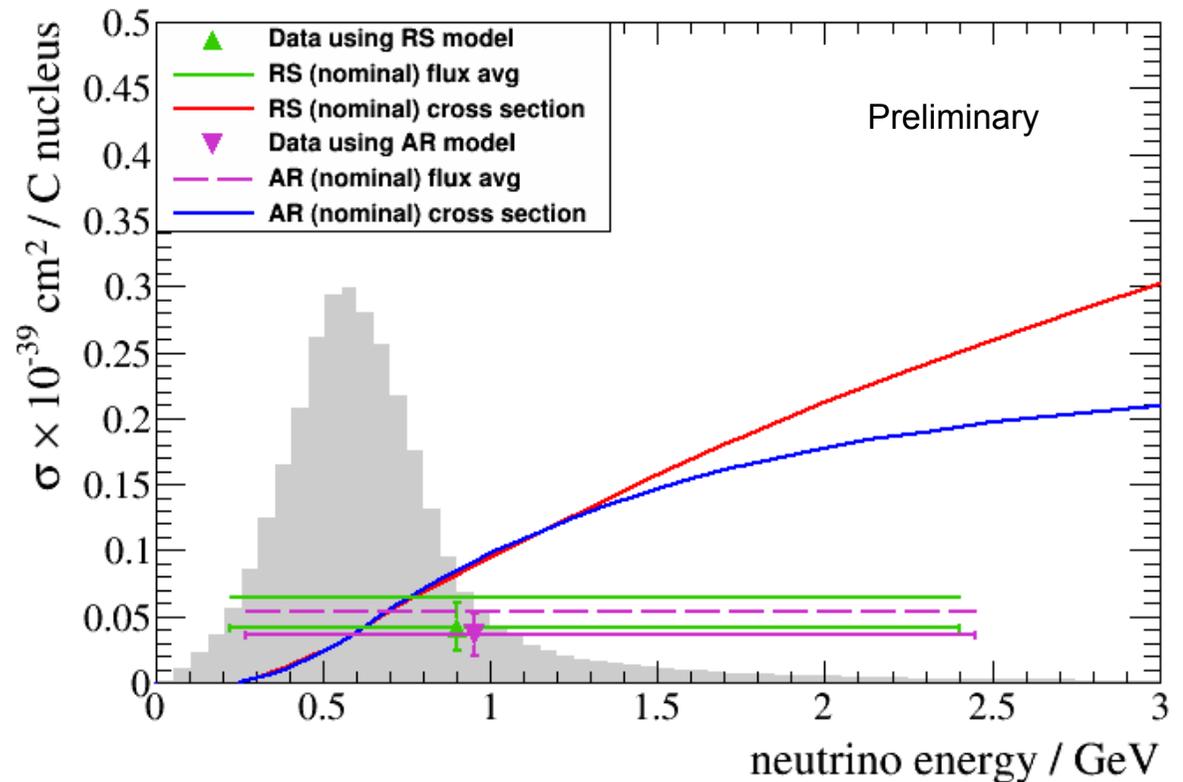


Il risultato ottenuto presenta una soppressione di $\sim 1\sigma$ rispetto alla predizione di NEUT e ancora peggiore se confrontato con GENIE

Sviluppi futuri:

Una nuova analisi con più statistica è prevista per confermare il risultato ottenuto

Le interazioni ν_μ CC Coherent ($\nu_\mu + C \rightarrow \mu^- + \pi^+ + C$) è stata studiata a basso t (quadrimpulso trasferito al nucleo)



- Il risultato ottenuto presenta un eccesso di $\sim 2.7\sigma$ rispetto al fondo
- A causa della statistica limitata, non è possibile determinare quale modello fra Rein-Sehgal (utilizzato in GENIE) e Alvarez-Ruso riproduce al meglio i dati

Sviluppi futuri:

Una nuova analisi con più statistica è prevista per migliorare la precisione del risultato ottenuto

Conclusioni e prospettive

- 📌 **Le incertezze sulle sezioni d'urto al GeV sono la sorgente predominante di errori sistematici per gli esperimenti di oscillazione**
- 📌 **Il complesso di rivelatori vicini dell'esperimento T2K ha già verificato con successo i modelli implementati nei generatori NEUT/GENIE**
- 📌 **Le future misure di sezione d'urto di T2K potranno essere utilizzate per ridurre i relativi errori sistematici nelle analisi di oscillazione**
- 📌 **È possibile affinare tali misure con un futuro upgrade dei rivelatori vicini?**

Backup slides

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial k'} = \frac{G_F^2 \cos^2 \theta_c (\mathbf{k}')^2}{2 \pi^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[G_E^2 \left(\frac{q_\mu^2}{\mathbf{q}^2} \right)^2 R_\tau^{NN} \right. \\
+ G_A^2 \frac{(M_\Delta - M_N)^2}{2 \mathbf{q}^2} R_{\sigma\tau(L)}^{N\Delta} + G_A^2 \frac{(M_\Delta - M_N)^2}{\mathbf{q}^2} R_{\sigma\tau(L)}^{\Delta\Delta} \\
+ \left(G_M^2 \frac{\omega^2}{\mathbf{q}^2} + G_A^2 \right) \left(-\frac{q_\mu^2}{\mathbf{q}^2} + 2 \tan^2 \frac{\theta}{2} \right) (R_{\sigma\tau(T)}^{NN} + 2R_{\sigma\tau(T)}^{N\Delta} + R_{\sigma\tau(T)}^{\Delta\Delta}) \\
\left. \pm 2 G_A G_M \frac{k + k'}{M_N} \tan^2 \frac{\theta}{2} (R_{\sigma\tau(T)}^{NN} + 2R_{\sigma\tau(T)}^{N\Delta} + R_{\sigma\tau(T)}^{\Delta\Delta}) \right]$$

➤ $q_\mu = k_\mu - k'_\mu = (\omega, \mathbf{q})$ is the four momentum transferred to the nucleus
 θ the scattering angle,

M_Δ (M_N) the Delta (nucleon) mass

➤ electric, magnetic and axial form connected to cut-off parameters (M_A, M_V)

$$\underbrace{G_E, G_M}_{M_V = 0.84 \text{ GeV}/c^2} \quad \left| \quad \underbrace{G_A}_{M_A = 1.032 \text{ GeV}/c^2} \right.$$

(same as ep scattering) (only in neutrino scattering)

➤ various responses R τ = isospin only, $\sigma\tau$ = spin – isospin

- 2p2h affect only the spin-isospin

- difference in sign between nu and anti-nu (for the 'axial-vector' interference term)

→ **2p2h effect smaller in antinu**