

OSCILLATIONS de NEUTRINOS

Un panorama à la lumière des résultats de l'expérience T2K

ARNAUD ROBERT¹

¹Université Pierre et Marie Curie - LPNHE
Arnaud.Robert@cern.ch



Plan

- 1 Masse & oscillations de neutrinos
- 2 Mesurer θ_{13} sur accélérateur: l'expérience T2K
- 3 Résultats & interprétation
- 4 Conclusion & Perspectives

Il y a bien longtemps, dans une
galaxie lointaine,
très lointaine.

Neutrino & Modèle Standard Electrofaible Minimal

- Prélogie: des faits expérimentaux:

[(Pauli, Fermi), Reines & Cowan, Wu et al., Goldhaber et al., Lederman et al.,
DONUT, LEP (Z^0) ...]

Un (anti)neutrino détectable $\nu(\bar{\nu})$ est un fermion [lepton]
électriquement neutre, d'hélicité gauche(droite), et se décline
en **3** saveurs actives: ν_e , ν_μ , ν_τ

- et un modèle, le MSE:

- * Un groupe de jauge: $G_{SM} = SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
- * Un contenu en particules: 5 représentations de G_{SM}

$Q_L(3, 2)_{+1/6}$, $U_R(3, 1)_{+2/3}$, $D_R(3, 1)_{-1/3}$, $L_L(1, 2)_{-1/2}$, $E_R(1, 1)_{-1}$
répliquées chacune en **3** familles (saveurs)

Neutrino & Modèle Standard Electrofaible Minimal

- Pas de $\nu_R \leftrightarrow$ **pas de masse à l'ordre de l'arbre**
- Idée d'une théorie **renormalisable**

$G_{SM} \subset G_{ren} \leftrightarrow$ Groupe de symétrie global **accidentel**:

$$G' = U(1)_B \times U(1)_{L_e} \times U(1)_{L_\mu} \times U(1)_{L_\tau}$$

\leftrightarrow pas de masse ($|\Delta L| = 2$) perturbative

$U(1)_{B-L}$ sous-groupe de G' est sans anomalie quantique

\leftrightarrow pas de masse non-perturbative ...

$m_\nu = 0$ dans le Modèle Standard Electrofaible Minimal

Cependant ...

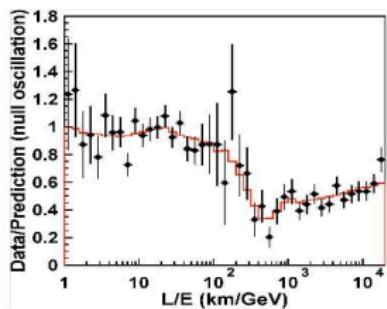


dans le cours de l'histoire ...

Neutrino & Modèle Standard Electrofaible Minimal

- [Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos

The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 81 (1998)]



- La saveur ν_μ n'est pas conservée
→ secteur *atmosphérique*
- Egalement le cas pour la saveur ν_e
→ secteur *solaire*
- Observation dans une vaste gamme d'énergies et de distances

[SNO, SK, Borexino, Chlorine, Gallium

+ KamLand ($\bar{\nu}_e$)]

Oscillations de saveur \leftrightarrow Neutrino massif !

mais ordre de grandeur limité: e.g. cosmologie:

$\sum m_\nu < O(0.5)$ eV [Lesgourgues et al. Adv.High.Energy Phys. 608515 (2012)]



Digression: modèle de masse pour le neutrino

Plus de questions que de réponses ...

fermion neutre & représentation $(1/2, 0) \oplus (0, 1/2)$ du groupe de Poincaré \leftrightarrow spineur de Dirac ou de Majorana ($\nu = \nu^c$) ?

Il faut renoncer à certains paradigmes (mais **l'invariance de jauge reste une forteresse inexpugnable**)

- Enrichir le contenu en particules ?
- Renoncer à la renormalisabilité ? \leftrightarrow Théorie effective
- Elargir le degré de symétrie (groupe de jauge ...) ?

Digression: modèle de masse pour le neutrino

- Enrichir le contenu en particules ?

→ n_s neutrinos *stériles* dans une sixième représentation $N_R(1, 1)_0$ de G_{SM} + **brisure électrofaible**

$$-\mathcal{L}_m^D = Y_{ij}^\nu \bar{\nu}_{iR} \tilde{\Phi}^\dagger L_{jL} + h.c. \quad \nu = \text{fermion de Dirac avec } n_S = 3$$

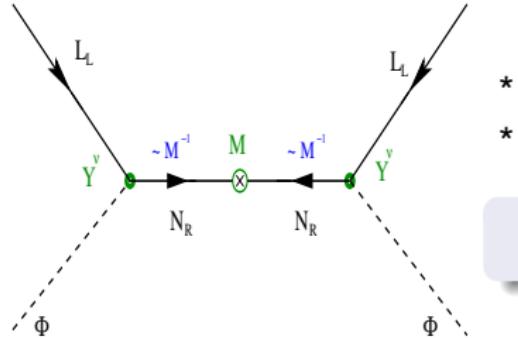
$U(1)_{B-L}$ toujours symétrie globale mais $Y^\nu / Y^{\text{top}} \sim O(10^{-12})$

$$-\mathcal{L}_m^M = \mathcal{L}_m^D + \frac{1}{2} \textcolor{blue}{M}_{ij} \bar{N}_{iR} N_{jR}^c + h.c. \quad \nu = \text{fermion de Majorana}$$

$U(1)_{B-L}$ est brisée. $n_s \geq 3$. M n'est protégé par aucune symétrie

Digression: modèle de masse pour le neutrino

Masse à l'arbre: mécanisme de bascule “See-Saw”



- * Brisure électrofaible $\langle \Phi \rangle \neq 0$
- * $M \gg Y^\nu \langle \Phi \rangle$

$$m_\nu \simeq - Y^\nu T \mathbf{M}^{-1} Y^\nu \langle \Phi \rangle^2$$

↔ plusieurs modèles/types sur le marché ... (étendre le secteur scalaire ?)

- Renoncer à la renormalisabilité ? $-\mathcal{L}_{d=5}^M = C_{ij} \frac{(\bar{L}_{iL}^c \tilde{\Phi}^*)(\tilde{\Phi}^\dagger L_{jL})}{\Lambda_{NP}}$
SUSY ?(hiérarchie & scalaire :-))(R_P ?)
- $U(1)_{B-L}$ jaugée ? - Introduire $G \supset G_{SM} \dots SO(10) \dots$?

Neutrinos massifs & physique des (3) saveurs

- Symétrie *globale* de saveur du lagrangien non-massif
e.g. MSE minimal : $G^{\text{MSE}} = [U(3)]^5$
- Brisure par les termes de masse
e.g. ν Dirac: $[U(3)]^5 \rightarrow U(1)_B \times U(1)_L$

↔ Paramètres inabsorbables par les éléments de G^{MSE} , secteur des leptons:

Dirac

Majorana (Découplage/Théorie effective)



9 modules dont **6** masses
+1 phase (violent CP)



9 modules dont **6** masses
+3 phases (violent CP)

Mélange des saveurs

- Couplages de masse (bi)diagonalisés:

$$\mathcal{L}_{cc} \sim \frac{g}{\sqrt{2}} \gamma^\mu W_\mu^- (\bar{L}_L \textcolor{red}{K}_I^\dagger) (\textcolor{red}{K}_I \nu_L) + h.c. \sim \frac{g}{\sqrt{2}} \gamma^\mu W_\mu^- \bar{L}_L \textcolor{red}{U} \nu_L + h.c.$$

- $\textcolor{red}{U}$ matrice (unitaire ?) de

Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata: $\nu_{L,\alpha} = \sum_{i=[1,3]} \textcolor{red}{U}_{\alpha i} \nu_{L,i}$

[Maki, Z.; Nakagawa, M.; Sakata, S. *Progress of Theoretical Physics*, Vol.28, No.5, (1962)]

- Paramétrisation standard avec 3 angles de mélange

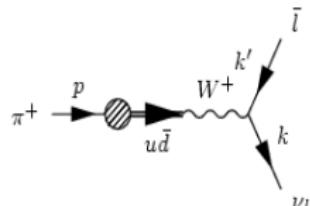
$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ et 1+2 phases de violation de CP

$$\textcolor{red}{U}_{[\alpha i]} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{i\eta_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\eta_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Un peu de mécanique quantique

- Le mélange des *champs*: $\nu_{L,\alpha} = \sum_{i=[1,3]} U_{\alpha i} \nu_{L,i}$

engendre a priori des états **intriqués**:



$$|I_\alpha \nu_{L,\alpha}\rangle \propto \sum_{i=[1,3]} \int \frac{d^3 \vec{k}'_i d^3 \vec{k}_i}{(2\pi)^6 2E_{k'_i} 2E_{k_i}} (2\pi)^4 \delta^4(p - k'_i - k_i) U_{\alpha i}^* |I(k'_i) \nu_{L,i}(k_i)\rangle$$

Hyp: état $|\pi^+\rangle$ bien déterminé \rightarrow oscillation de saveur **impossible** ... (matrice densité $\hat{\rho}_{\{\nu\}}$ diagonale) ...

- Avec **désintrication** (rapide) du lepton associé \rightarrow

$$|\nu_{L,\alpha}\rangle_{[\mathcal{T},X]} \propto \sum_{i=[1,3],\xi} \int \frac{d^3 \vec{k}_i}{(2\pi)^3 2E_{k_i}} \mathcal{F}_\xi(X, \vec{k}_i) U_{\alpha i}^* \hat{b}_{i,\xi}^\dagger(\vec{k}_i, \mathcal{T}) |0\rangle$$

$\mathcal{F}_\xi(X, \vec{k}_i)$: localisation du paquet d'onde dans l'espace(-temps) $\leftrightarrow [\sigma_X]$

Encore un peu de mécanique quantique

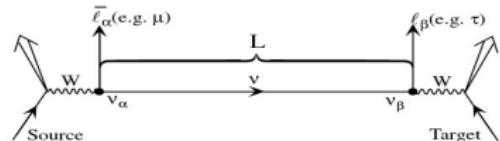
- Probabilité $\mathcal{P}(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = | \langle \nu_{L,\beta} | \nu_{L,\alpha} \rangle |^2$
- On mesure $\overline{\mathcal{P}(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)} \equiv P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta, L = X_d - X_p)$ ($E_i \gg m_i$)

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta, L, E) \simeq \sum_{i,j} \mathcal{U}_{\alpha i}^* \mathcal{U}_{\beta i} \mathcal{U}_{\alpha j} \mathcal{U}_{\beta j}^* \exp \left[-2\pi i \frac{L}{L_{ij}^{\text{osc}}} \right]$$

$$\times \left(\exp \left[- \left(\frac{L}{L_{ij}^{\text{coh}}} \right)^2 - \left(\frac{\bar{\sigma}_X}{L_{ij}^{\text{osc}}} \right)^2 \right] \right)$$

* Longueur d'oscillation: $L_{ij}^{\text{osc}} = \frac{4\pi E}{\Delta m_{ij}^2}$

* Longueur de cohérence: $L_{ij}^{\text{coh}} = \frac{4\sqrt{2}E^2}{|\Delta m_{ij}^2|} \sigma_X$



- $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta, L, E)$ est insensible aux phases de Majorana η_t

Violation de CP - Implications & conséquences

- Quantification “universelle” de la violation de symétrie CP ?
- e.g. secteur leptonique - ν Dirac:

$$\det([Y^\nu Y^{\nu\dagger}, Y^I Y^{I\dagger}]) = -2i J_{CP}^{PMNS} \prod_{\nu, I} \Delta m_I^2 \Delta m_\nu^2$$

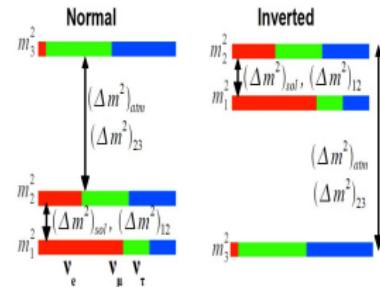
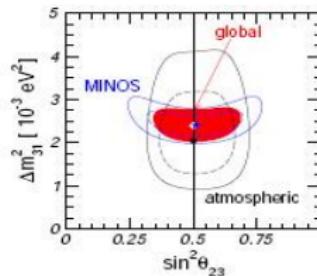
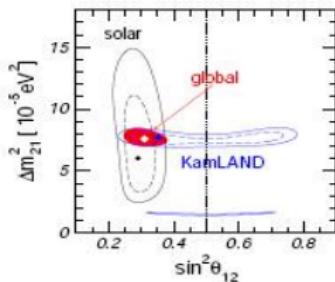
$$J_{CP}^{PMNS} = \text{Im}(U_{\mu 3} U_{e3}^* U_{e2} U_{\mu 2}^*) = s_{12} s_{23} s_{13} c_{12} c_{23} c_{13}^2 \sin \delta$$

- $J_{CP}^{CKM} = O(10^{-5})$ est insuffisant pour une baryogenèse électrofaible “Standard”
- Neutrinos massifs $\rightarrow CP \equiv$ condition de Sakharov (Leptogenèse \rightarrow Baryogenèse ?)

la réponse à la question $\theta_{13} \neq 0$? est cruciale
(tout comme la valeur de δ)

Oscillations de neutrinos - Etat de l'art pré-2012

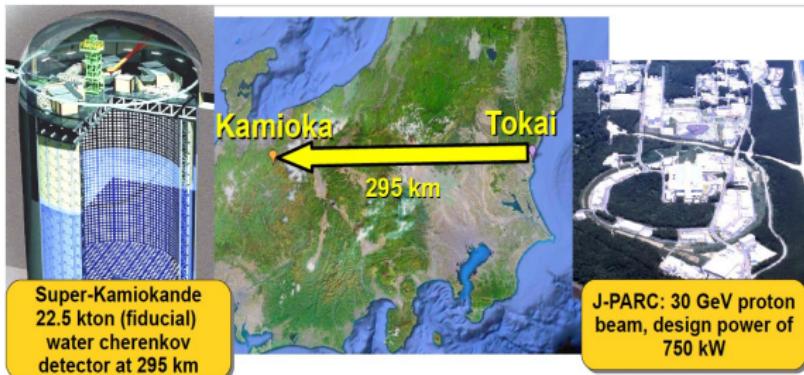
- Secteur solaire: $\sin^2(2\theta_{12}) = 0.87 \pm 0.03$ $\Delta m_{12}^2 = 7.59 \pm 0.20 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
[SNO, KamLAND, SK]
- Secteur atmosphérique:
 $\sin^2(2\theta_{23}) > 0.92$ (90% C.L) $|\Delta m_{31}^2| = 2.43 \pm 0.13 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
[SK, K2K, MINOS, → T2K]
- $\sin^2(2\theta_{13})$? [MINOS, → T2K, DAYA-BAY, RENO, (DOUBLE) CHOOZ]
- Hiérarchie (une autre ...) de masse ? δ ?



Plan

- 1 Masse & oscillations de neutrinos
- 2 Mesurer θ_{13} sur accélérateur: l'expérience T2K
- 3 Résultats & interprétation
- 4 Conclusion & Perspectives

T2K: Tokai to Kamioka



Buts fondateurs de l'expérience:

- Mise en évidence et mesure d'apparition de la saveur $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$
- Mesures de précisions dans le secteur atmosphérique
↔ Disparition de saveur ν_μ

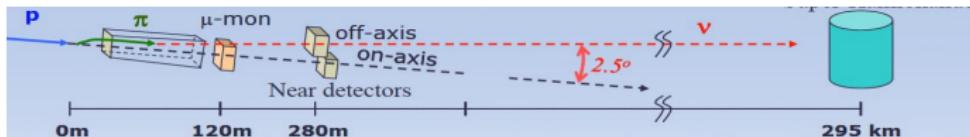
T2K: mesurer θ_{13} via $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

- Oscillation à **3** saveurs \otimes effets de matière
- Développement en $\alpha = \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2} \ll 1$

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e, L, E) \simeq & \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \frac{\sin^2([1-A]\Phi)}{[1-A]^2} \\
 & + \alpha \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin^2 \theta_{23} \sin 2\theta_{13} \frac{\sin([1-A]\Phi)}{[1-A]} \frac{\sin(A\Phi)}{A} \cos(\delta + \Phi) \\
 & + \alpha^2 \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2(A\Phi)}{A^2} + O(\alpha^3)
 \end{aligned}$$

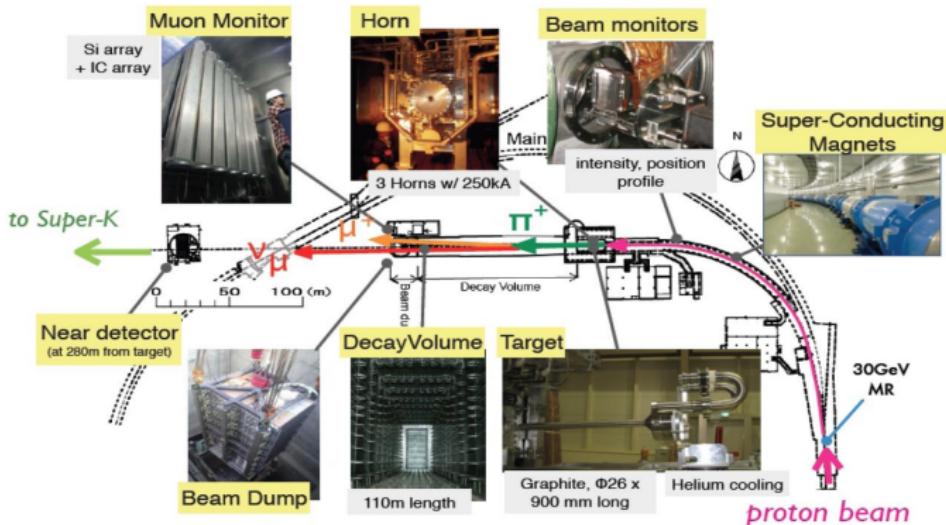
$$\Phi = \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \quad \text{Effets de matière modestes à T2K: } |A| \sim 0.07$$

T2K: principe



- Faisceau de protons de 31 GeV produit à J-PARC
- Cible de carbone \leftrightarrow hadrons chargés
- 3 cornes magnétiques pour focaliser les hadrons chargés (+)
- Pions, kaons & muons se désintègrent dans un tunnel de 100 m
- DéTECTEURS **proches** à 280 m:
 - INGRID, **sur l'axe**, mesure le taux d'interactions et le profil du faisceau
 - ND280, **hors-axe**, mesure le spectre des différentes saveurs avant oscillation
- SK, détECTEUR **lointain hors-axe**, à 295 km, mesure le spectre des neutrinos ayant potentiellement oscillé

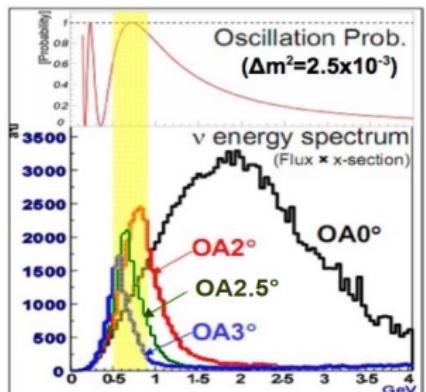
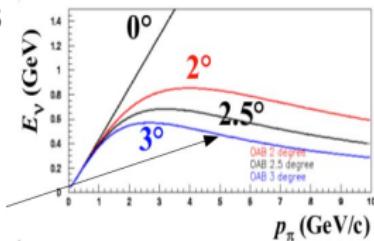
T2K: production du faisceau de neutrinos



Intensité nominale prévue: **750 kW** \leftrightarrow Intensité atteinte avant le tremblement de terre: **145 kW**

Technique du faisceau hors-axe

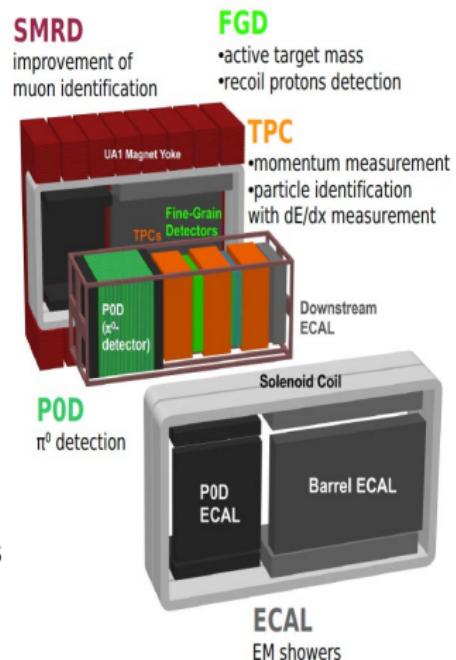
- A direction d'observation fixée $\neq 0^\circ$ dans le référentiel de l'expérience, la correspondance $E_\nu \leftrightarrow E_\pi$ est **bivaluée**
 - Spectre cinématique des ν -parents
 \leftrightarrow **pôle** dans le jacobien $\frac{D(E_\pi, \Omega^*)}{D(E_\nu, \Omega)}$
 - 2.5° implique un spectre étroit qui pique au premier maximum de l'oscillation ~ 0.6 GeV
 - Statistique plus élevée dans la région favorable. Discrimination à haute énergie avec les bruits de fond à 3 corps



Détecteur proche - ND280

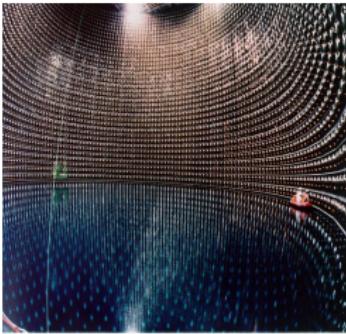
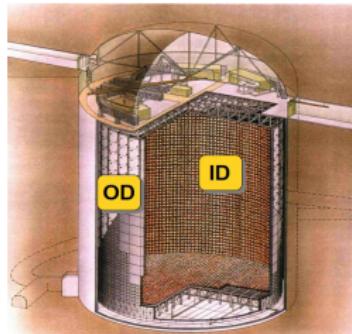
- Aimant de UA1/NOMAD (0.2 T)
- Eléments utilisés pour l'analyse
Runs 1+2+3 :

- **FGD** (Fine Grained Detectors): cible pour les ν et trajectographie (vertex)
- **TPC** (Time Projection Chambers): mesure de l'impulsion et du dE/dx
- **POD** (Pi0 Detector): → analyses pions neutres
- **ECAL**: calorimètres électromagnétiques → identification e^\pm et γ
- **SMRD**: → détecteurs de muons

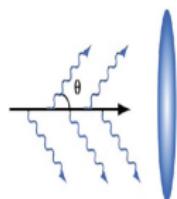


Détecteur lointain - SuperKamiokande

- 50 kt (22.5 kt de volume fiduciel): **détecteur Cherenkov à eau**
- Equipé de 11000 PMT (détecteur interne ID: 40% de couverture)
- ~ 2000 PMT "regardant" vers l'extérieur (OD veto contre rayons cosmiques, radioactivité extérieure ...)
- Domaine d'efficacité: $E_\nu \in [5.5 \text{ MeV}, \sim O(\text{GeV})]$



La lumière Cherenkov
produit un anneau mesuré



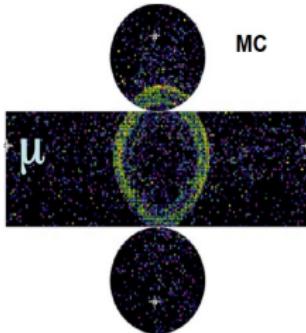
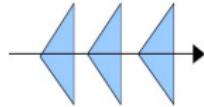
par les PMT
Energie déposée + temps
d'arrivée

$\leftrightarrow E_\nu + \text{direction} + \text{ID}$

Identification des particules dans SK

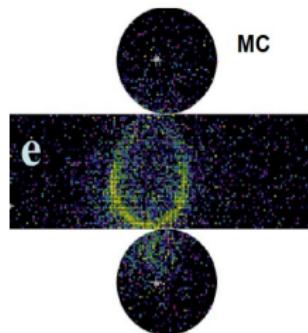
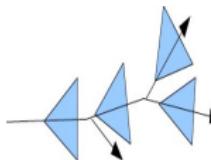
- Muons

- peu de réinteractions
- anneaux à bords francs



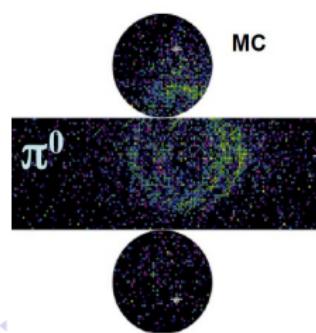
- Electrons

- gerbe EM
- anneaux à bords flous



- Pions neutres

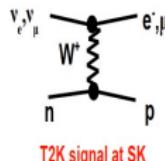
- les $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ produisent des gerbes qui peuvent être similaires à celles des électrons



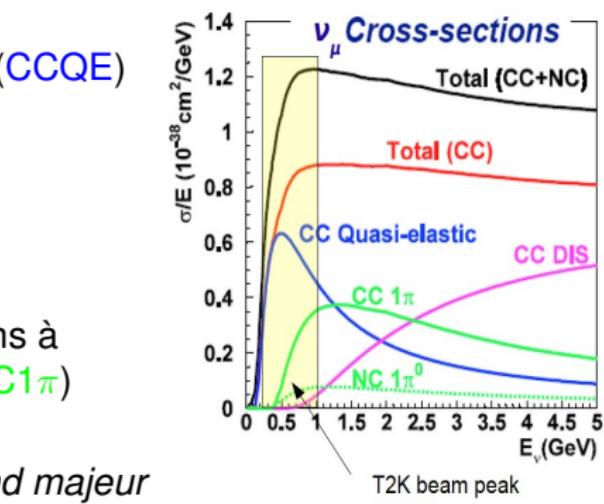
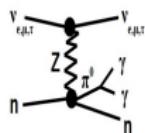
Les interactions de neutrinos dans T2K

Dans le domaine d'intérêt en énergie :

- Contribution *majeure* des interactions quasi-élastiques par courants *chargés* (CCQE)

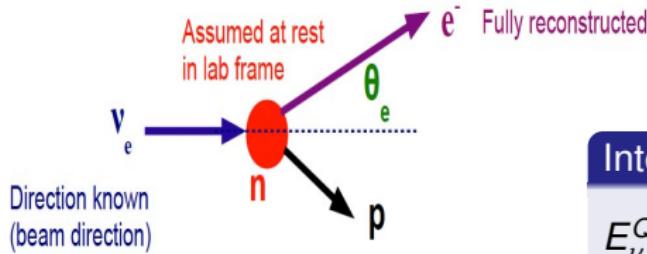


- Contribution *significative* des interactions à courants *chargés* avec “single” pion (CC1 π)
- Interactions par courants *neutres* avec production de π^0 (NC π^0) \rightarrow *bruit de fond majeur*



$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$: gerbe avec composante électronique

Reconstruire l'énergie du neutrino



Interaction quasi-élastique

$$E_\nu^{QE} = \frac{2M_n E_e - (M_n^2 + m_e^2 - M_p^2)}{2[M_n - E_e + \sqrt{E_e^2 - m_e^2 \cos \theta_e}]}$$

- Seul est reconstruit *le lepton* dans l'état final
- L'énergie du neutrino est accessible sous certaines hypothèses:
 - La direction du neutrino est connue (direction du faisceau)
 - La masse du nucléon de recul est connue
 - Le nucléon-cible est au repos (\rightarrow le moment de Fermi ajoute de la dispersion de la mesure de l'énergie)

Plan

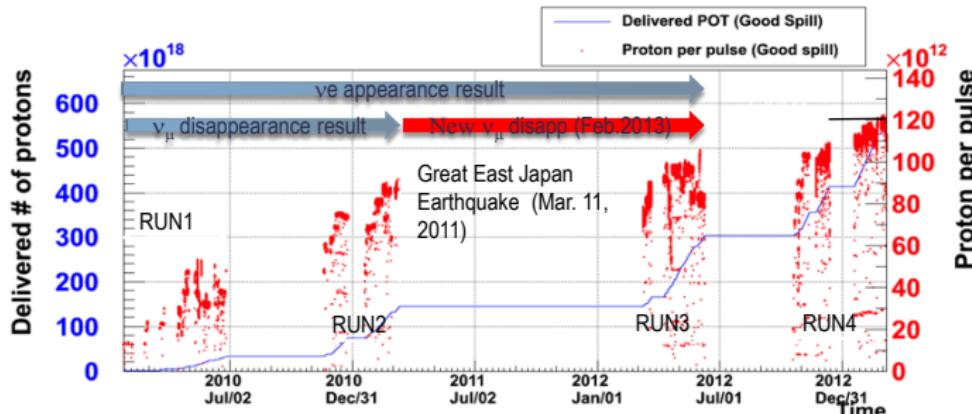
- 1 Masse & oscillations de neutrinos
- 2 Mesurer θ_{13} sur accélérateur: l'expérience T2K
- 3 Résultats & interprétation
- 4 Conclusion & Perspectives

Données collectées

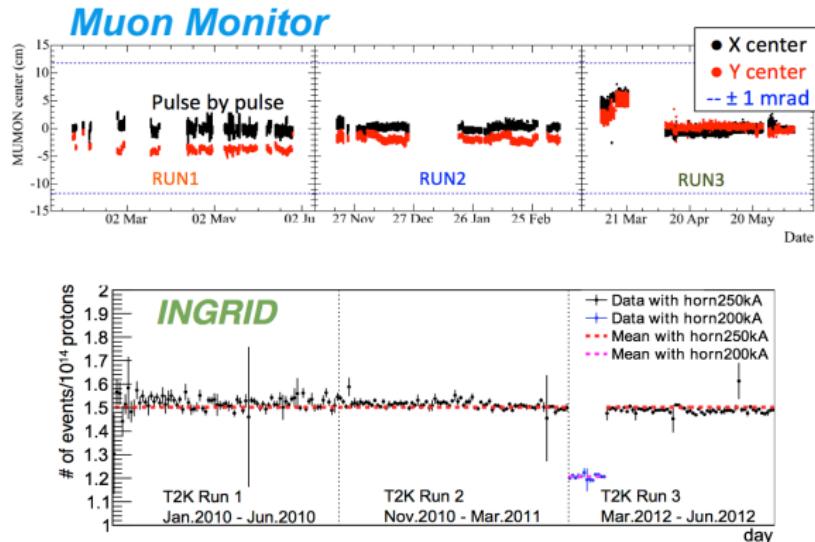
- Données cumulées $\text{Run 1} + \text{Run 2} + \text{Run 3} + \text{Run4} = 6.39 \times 10^{20}$ protons sur cible (12/4/2013)

Données analysées $\text{Run 1} + \text{Run 2} + \text{Run 3} = 3.01 \times 10^{20}$ protons sur cible $\sim 4\%$ de la statistique totale prévue

- Démarrage à **50 kW** au Run 1 mais avec **145 kW** en continu à la fin du Run 2 et **200 kW** pour le Run 3 [Feuille de route: **750 kW ...**]



Stabilité: taux d'interaction et direction du faisceau



↔ Direction du faisceau contrôlée mieux que 1 mrad ↔ O-A INGRID

Analyse d'oscillation - Principe actif

$$N_\nu^\alpha \propto \int \Phi^\alpha(E) (\times P_{osc}^\alpha(E, L)) \times \sigma^\alpha(E) \times \varepsilon_{det}^\alpha(E) dE$$

ν Flux prediction

With external hadron production data especially from NA61@CERN

Neutrino Cross section

Model(NEUT), uncertainties developed with fits to external data

ND280

Measurement

Momentum and angle of ν_μ CCQE and CCnonQE

- Fit the ND280 Data to refine flux and ν -int. model
- Verification with ν_e & π^0 data @ND280

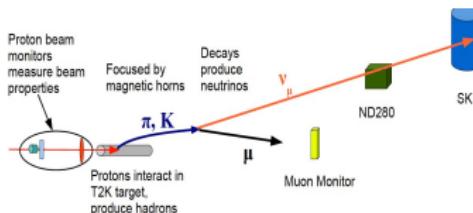
SK prediction

Tuned MC based on ND280 measurement

Comparison

SK Measurement

Flux de neutrinos & modélisation

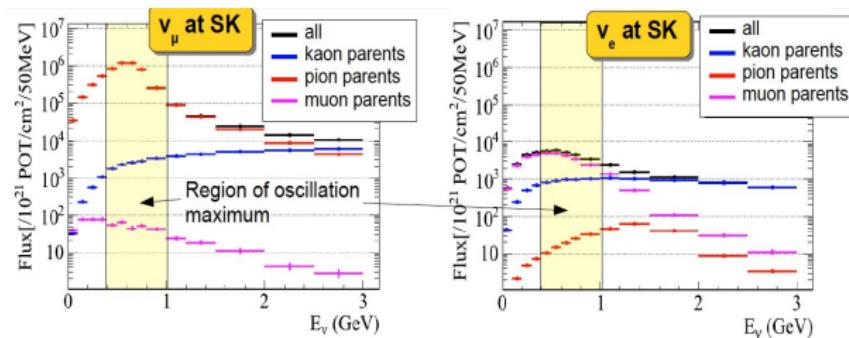


source **non-ponctuelle** pour ND280

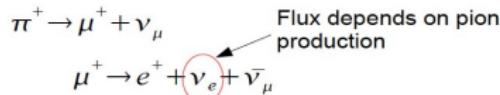
↔ Simulation du flux de neutrinos $\propto dN/dE$ essentielle (extrapolation à SK)

- Mesure des moniteurs du faisceau de protons
- Production de hadrons dans la cible de carbone:
Sections efficaces différentielles de production de π^\pm et de kaons simulées via FLUKA et repondération (en espace de phase) par les mesures dédiées de l'expérience "jumelle" NA61 (CERN)
- Interactions secondaires hors de la cible, focalisation par les cornes, propagation & désintégrations: Simulées via GEANT3 (...!)

Prédiction du flux de neutrinos

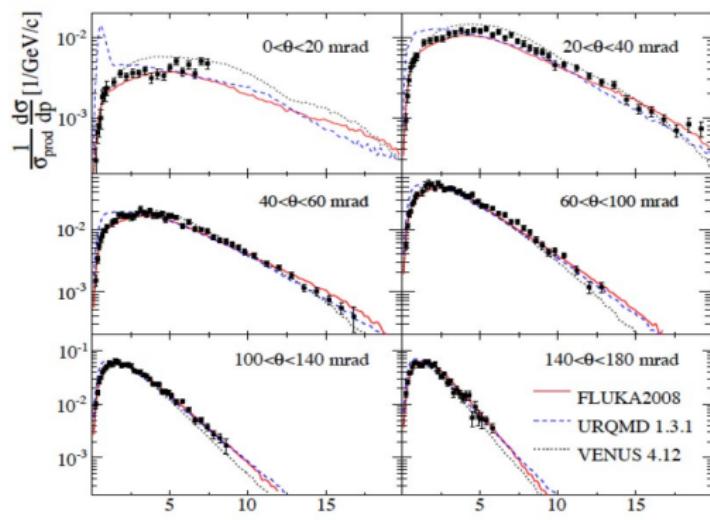
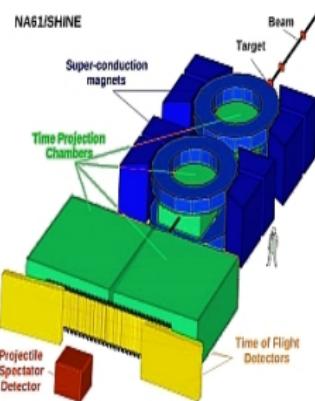


- La contribution des pions au flux de ν_μ autour du maximum d'oscillation est majoritaire
- Les ν_e intrinsèques du faisceau viennent des désintégrations de μ et K $\sim O(1\%)$ en dessous de 1 GeV
- Les ν_e dominants au maximum d'oscillation viennent des désintégrations de muons

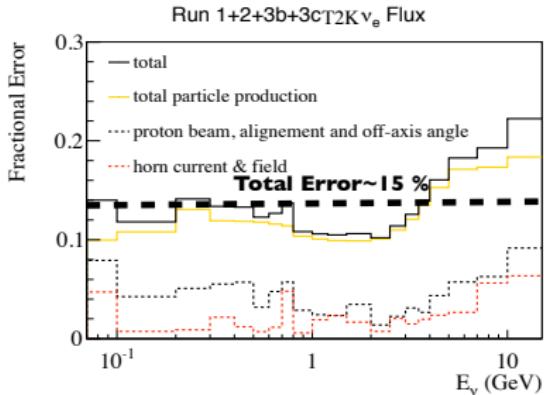
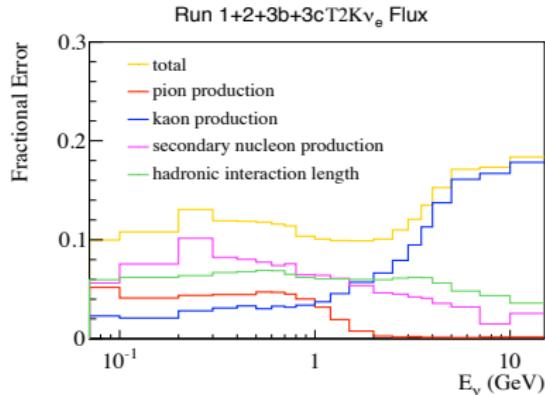


Réduction des systématiques: expérience NA61

- Faisceau de protons de 31 GeV sur une reproduction de la cible fixe de carbone
- Détecteur **NA61 (CERN)**: spectromètre à grande acceptance: **TPC & TOF**
↔ Sections efficaces différentielles de production de π^\pm et K
e.g π^\pm [Abgrall et al. Phys.Rev. C 84, 034604 (2011)]



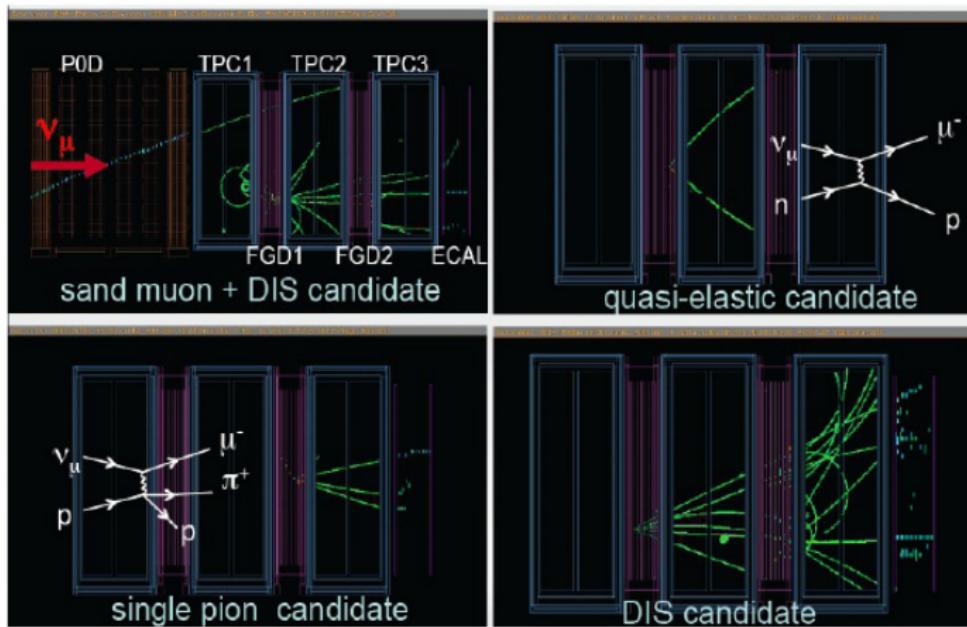
Réduction des systématiques: expérience NA61



- Erreur totale de l'ordre $O(15\%)$ dans la zone du maximum d'oscillation
- Erreur dominée par les incertitudes sur la production de particules

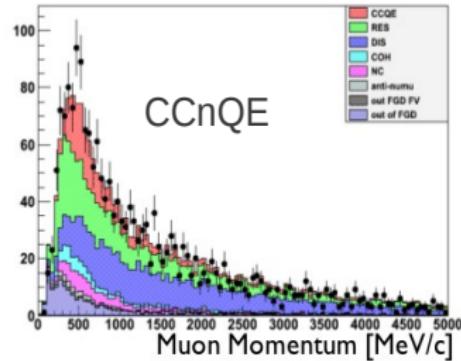
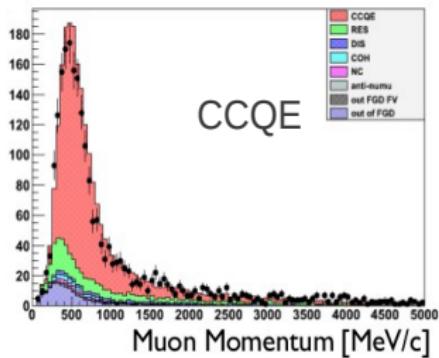


Réduction des systématiques: détecteur proche



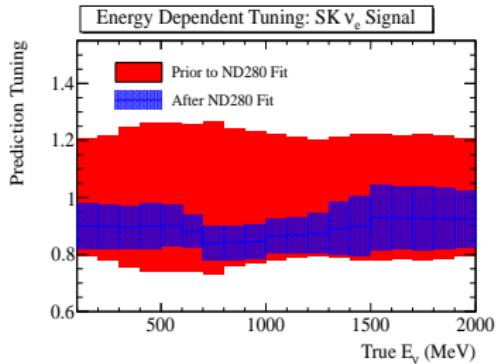
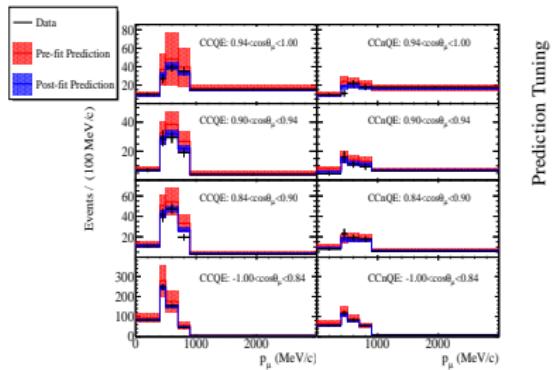
Réduction des systématiques: détecteur proche

- Interactions à courants chargés - Sélection inclusive
 - Au moins une trace de charge négative
 - Vertex dans le premier FGD
 - dE/dX de la trace de plus grande impulsion compatible avec l'identité d'un muon
- Catégorisation **CCQE** vs CCnQE
 - Une seule trace de type μ^-
 - Pas d'autre produit final de la chaîne $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ dans le FGD1



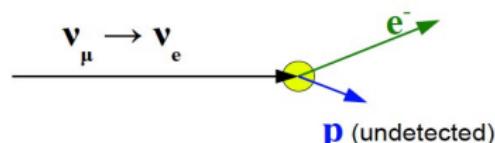
Réduction des systématiques: détecteur proche

- Ajustement de l'espace de phase $\{p_\mu, \theta_\mu\}$ pour contraindre **flux** et **sections efficaces d'interaction** dans la gamme d'énergie explorée
- Contrainte pour les flux ν_μ **et** ν_e

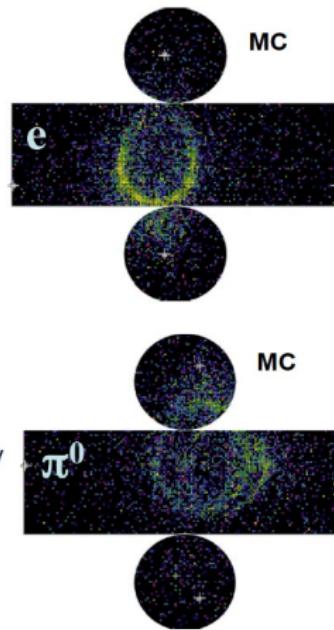


Analyse dans le détecteur lointain SuperKamiokande

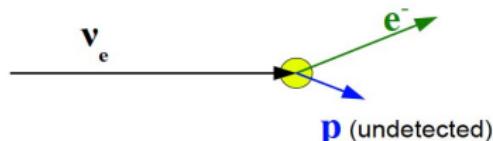
Oscillation Signal:



Identical for given neutrino energy.

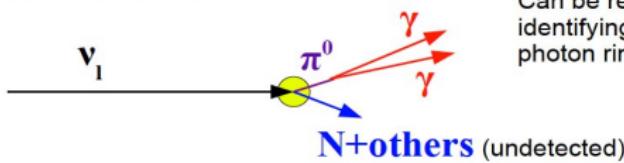


Beam ν_e Background:

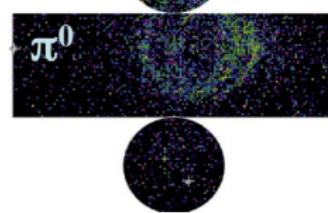


Beam background has harder spectrum

Neutral Current π^0 :



Can be removed by identifying second photon ring

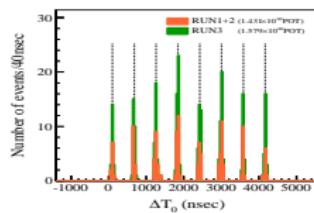


Sélection des ν_e à SuperKamiokande [2/7]

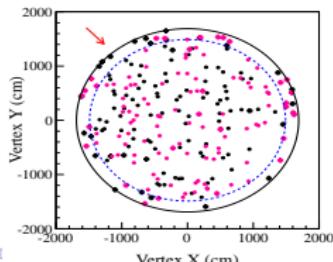
→ Objectif: sélection d'un échantillon avec anneau unique de type électron en minimisant le bruit de fond issu du faisceau et des interactions $NC\pi^0$

Coupures optimisées pour la statistique actuelle et **fixées avant de regarder les données**

- **-1-** Événement dans la fenêtre en temps du faisceau & complètement contenu dans l'ID [activité =0 dans OD]



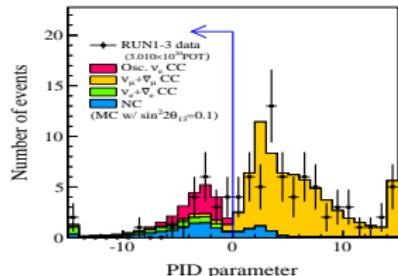
- **-2-** Vertex > 200 cm du mur de l'ID [coupure de Volume Fiduciel]



Sélection des ν_e à SuperKamiokande [4/7]

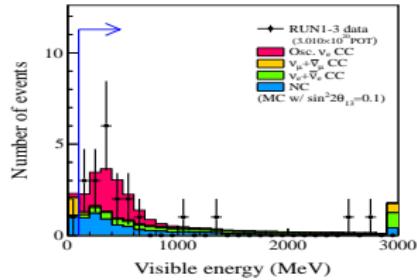
- **-3- Sélection de *single e-like ring***

- Fonction de vraisemblance à partir de la forme des anneaux & angle d'ouverture & énergie
- Performances vérifiées sur les données atmosphériques
- Probabilité de mauvaise identification
 $\mu \rightarrow e: \sim 1\%$



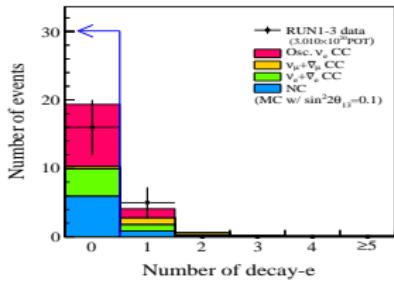
- **-4- Energie visible > 100 MeV**

Rejette le bruit de fond NC & les électrons de
 $\mu \rightarrow \nu_\mu \bar{\nu}_e e$ à basse énergie

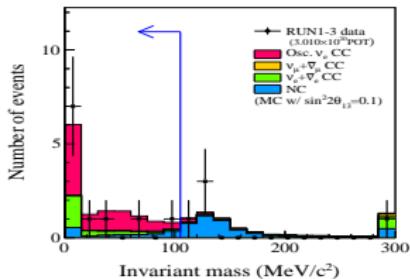


Sélection des ν_e à SuperKamiokande [6/7]

- **-5-** Pas d'électron de désintégration de μ
 - Rejet basé sur le timing dans SK

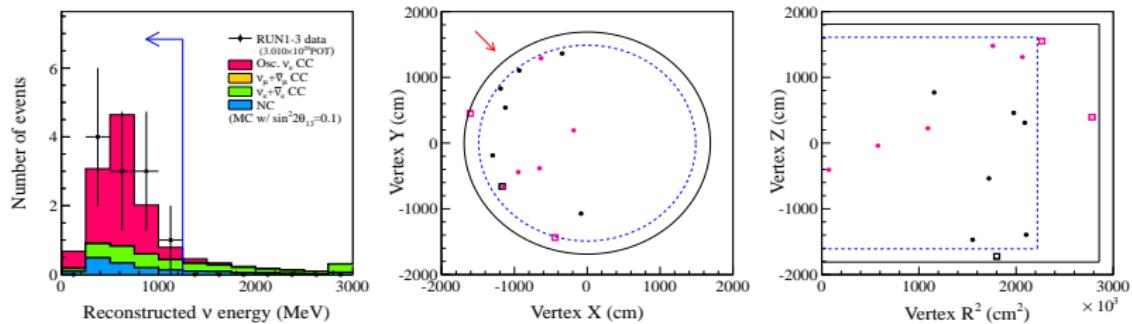


- **-6-** Coupure sur la masse invariante $m_{\pi^0} < 105 \text{ MeV}/c^2$
 - Masse calculée pour chaque événement dans l'hypothèse de 2 anneaux
 - Rejet du bruit de fond NC π^0



Sélection des ν_e à SuperKamiokande [7/7]

- 7- Hypothèse cinématique quasi-élastique



- Après sélection des ν_e : **11 candidats**
- Si pas d'oscillation, nombre attendu: **3.22 ± 0.43 événements**
 $\leftrightarrow p\text{-value} = 0.08\%$ Hypothèse exclue à (3.2 σ)

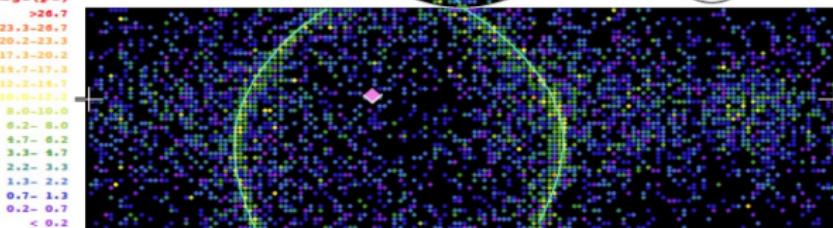
Candidat ν_e

Super-Kamiokande IV

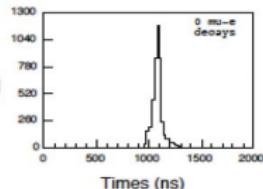
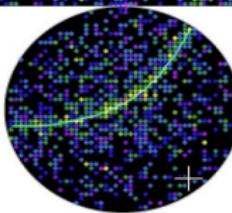
T2K Beam Run 0 Spill 1039222
Run 67969 Sub 921 Event 218931934
16-12-22:14:15:18
T2K beam dt = 1782.6 ns
Inner: 4804 hits, 9970 pe
Outer: 4 hits, 3 pe
Trigger: 0x80000007
D.wall: 244.1 cm
e-like, $p = 1049.0$ MeV/c

charge (pe)

- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.2-14.7
- 10.0-12.2
- 8.0-10.0
- 6.2- 8.0
- 4.7- 6.2
- 3.3- 4.7
- 2.2- 3.3
- 1.3- 2.2
- 0.7- 1.3
- 0.2- 0.7
- < 0.2

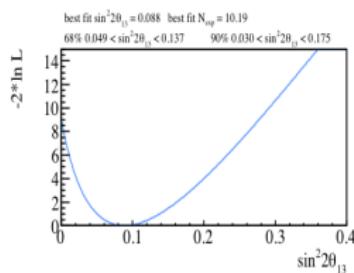
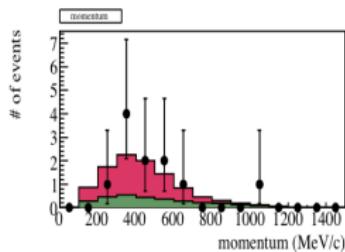
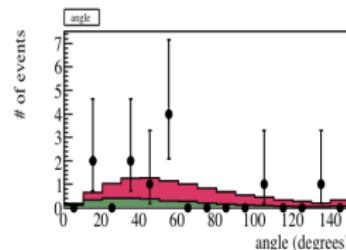
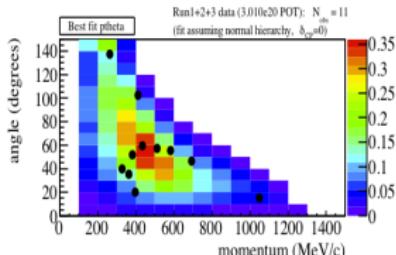


visible energy : 1049 MeV
of decay-e : 0
2 γ Inv. mass : 0.04 MeV/c²
recon. energy : 1120.9 MeV



Ajustement pour $\sin^2(2\theta_{13})$

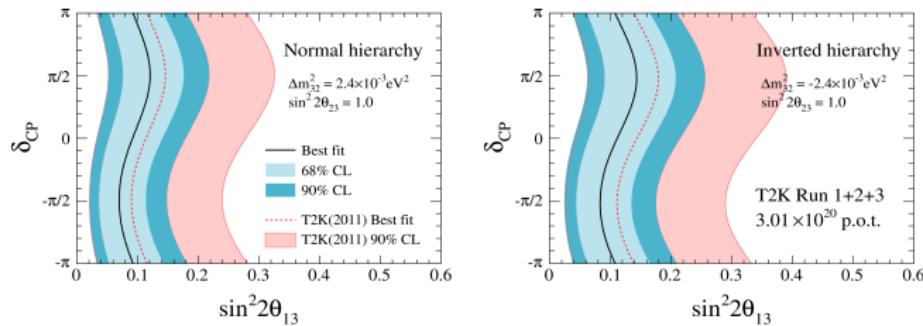
$$\mathcal{L}(N_{obs}, \vec{x}, \vec{o}, \vec{f}) = \mathcal{L}_{norm}(N_{obs}, \vec{o}, \vec{f}) \times \mathcal{L}_{shape}(\vec{x}, \vec{o}, \vec{f}) \times \mathcal{L}_{syst}(\vec{f})$$



- $\vec{x} = \{p_L, \theta_L\}$ espace des phases mesuré pour le lepton

Ajustement pour $\sin^2(2\theta_{13})$

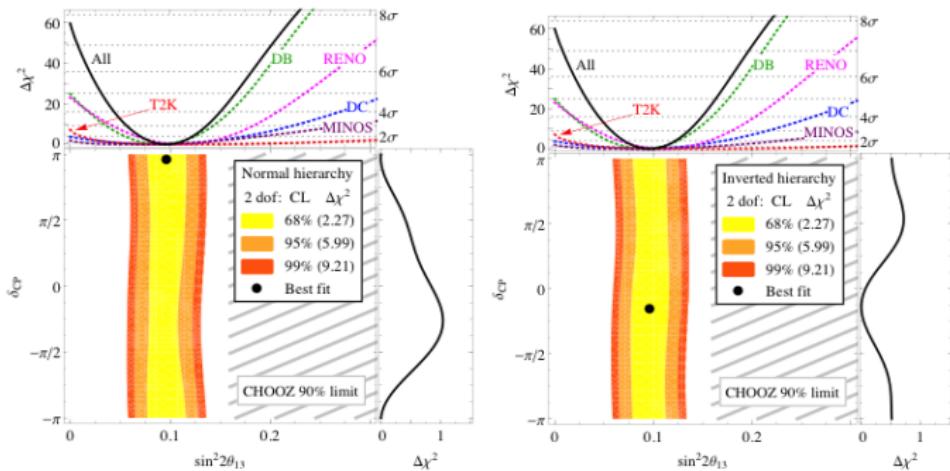
Pour $[\sin^2(2\theta_{23}) = 1.0$ et $\Delta m_{32}^2 = \pm 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2]$ fixés



- $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.094^{+0.053}_{-0.040}$ [68% CL - Hiérarchie normale, $\delta = 0$]
- $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.116^{+0.063}_{-0.049}$ [68% CL - Hiérarchie inversée, $\delta = 0$]

[Abe et al. Indication of neutrino electron appearance from an accelerator produced off-axis - Phys.Rev.Lett. 107 (2011)]

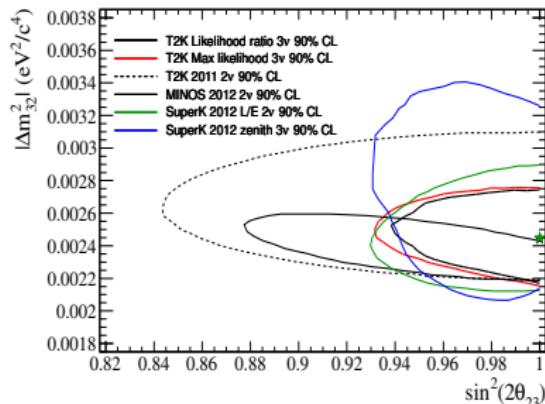
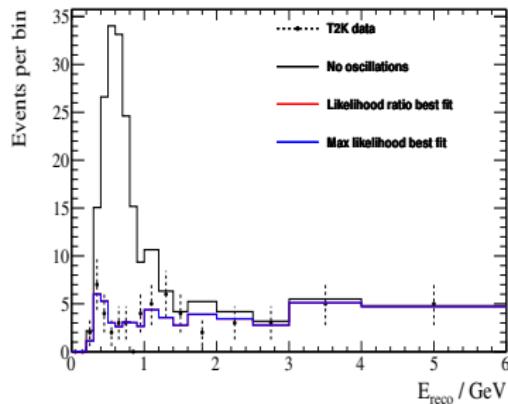
Exercice de combinaison: accélérateurs vs réacteurs



la valeur $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$ est exclue à $\sim 7.7 \sigma$

[Machado et al. Combining Accelerator and Reactor Measurements of θ_{13} : The First

Analyse en disparition ν_μ - Mesure de θ_{23}



- Ajustement: $\sin^2 2\theta_{23} \geq 0.94$ (90% C.L)
 $2.14 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 < |\Delta m_{32}^2| < 2.76 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (90% C.L)
- Valeur centrale: $\sin^2 2\theta_{23} = 1.00$ (θ_{23} scenario maximal ...?)

Plan

- 1 Masse & oscillations de neutrinos
- 2 Mesurer θ_{13} sur accélérateur: l'expérience T2K
- 3 Résultats & interprétation
- 4 Conclusion & Perspectives

Conclusion & Perspectives

Avec la statistique analysée sur les 3 premières sessions de prise de données ($\sim 4\%$ du total prévu et malgré un tremblement de terre majeur):

- **11** candidats ν_e sont observés à SK (pour **3.2** attendus sans oscillation)
→ *évidence d'une apparition à 3.2σ*
- **58** candidats ν_μ sont observés à SK (pour **207** attendus sans oscillation)
→ *Contrainte la plus forte à ce jour sur $\sin^2 2\theta_{23}$*
- La nature a eu la “délicatesse” de fournir une valeur vraisemblablement non-nulle pour θ_{13}
(et raisonnablement large: $\sin^2 2\theta_{13} = O(0.1)$)

Dans un futur (très ;-)) proche: mesure précise de $\sin^2 2\theta_{13}$ à 5σ et (peut-être/sûrement ?) jeter les bases pour δ

Epilogue: Nouvelle(s) question(s)

- Mélange des leptons

$$|U_{PMNS}| \sim \begin{pmatrix} O(1) & O(1) & \epsilon \\ O(1) & O(1) & O(1) \\ O(1) & O(1) & O(1) \end{pmatrix}$$

Mélange important

Structure *Tri-Bimaximale* ? ($\theta_{23} = 45^\circ$, $\theta_{12} = 35^\circ 3$, $\theta_{13} = 0$? **NON**)

- Mélange des quarks

$$|U_{CKM}| \sim \begin{pmatrix} O(1) & \epsilon & \epsilon^3 \\ \epsilon & O(1) & \epsilon^2 \\ \epsilon^3 & \epsilon^2 & O(1) \end{pmatrix}$$

Mélange faible. Structure fortement *hiérarchique*

Quelle est la conjecture qui pilote la structure en saveur (symétries ?) à l'échelle électrofaible ?



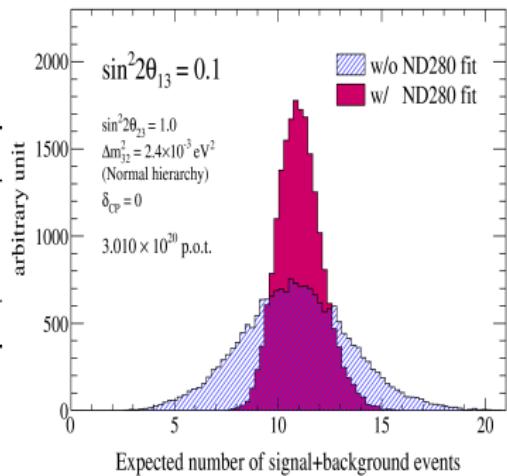
Fin de l'épisode



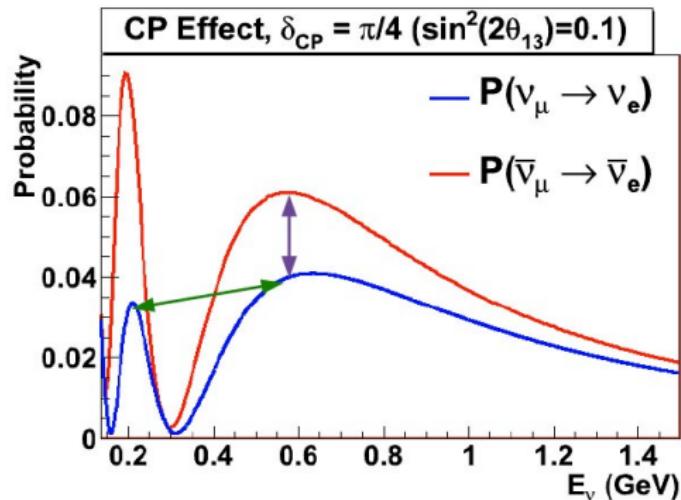
Backup - θ_{13} - Incertitudes systématiques

Incertitudes sur le nombre d'événements ν_e attendus:

| Incertitudes | ν_e sig+bkg |
|-----------------------------------|-----------------|
| Flux + Sections Efficaces (ND280) | $\pm 5.7\%$ |
| Sections Efficaces (hors ND280) | $\pm 7.5\%$ |
| Détecteur lointain | $\pm 3.9\%$ |
| Total | $\pm 10.3\%$ |



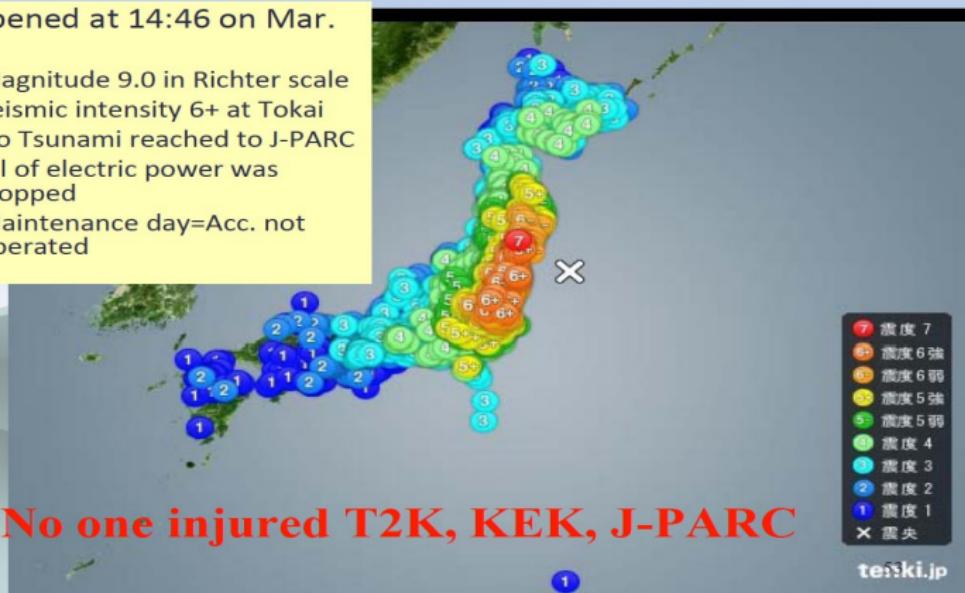
Backup - Violation de CP: accès



Backup - Tremblement de terre 2011

Earthquake on Mar. 11th

- Happened at 14:46 on Mar. 11th
 - Magnitude 9.0 in Richter scale
 - Seismic intensity 6+ at Tokai
 - No Tsunami reached to J-PARC
 - All of electric power was stopped
 - Maintenance day=Acc. not operated



Backup - Tremblement de terre 2011

Ground level damages



Severe subsidence here and there (1~2m depth)
Near by piping/cabling were damaged



RCS (elec yard)



Neutrino (TS)



LINAC



Neutrino (Dump)



Neutrino (Dump)