

Acquis et futur des oscillations de neutrinos

Congrès du LLR

Th. A. Mueller

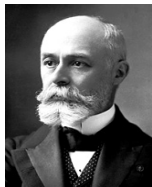
17 octobre 2012

- 1 Un peu d'histoire
- 2 L'oscillation des neutrinos
- 3 Les années 2011-2012 : la mesure de θ_{13}
 - Double Chooz, Daya-Bay, RENO : les expériences nouvelle génération
 - L'expérience T2K
- 4 Futur des oscillations de neutrino

- 1 Un peu d'histoire
- 2 L'oscillation des neutrinos
- 3 Les années 2011-2012 : la mesure de θ_{13}
 - Double Chooz, Daya-Bay, RENO : les expériences nouvelle génération
 - L'expérience T2K
- 4 Futur des oscillations de neutrino

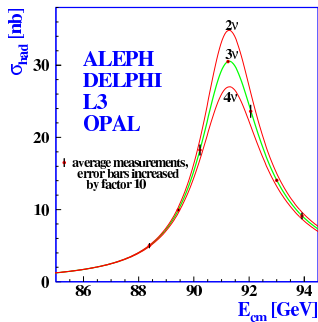
Du postulat...

- En 1896, Becquerel réalise les 1^{ère} expériences sur le phénomène de la radioactivité. Début des recherches fondamentales sur les noyaux atomiques qui aboutissent, entre autre, à la **découverte du neutrino 50 ans plus tard**
- En 1914, Chadwick montre que le **spectre en énergie de l'électron** provenant de la désintégration β est **continu** ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^-$
- En 1930, **Pauli "invente" le neutrino** dans une opération de sauvetage du "principe de conservation de l'énergie" \Rightarrow nouvelle particule légère, neutre et interagissant très peu avec la matière (+ spin 1/2) ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$
- En 1934, Fermi lui confère le statut de particule à part entière en incorporant le ν dans sa théorie de la désintégration $\beta \Rightarrow$ **seul 1 neutrino sur 10000 milliards émis par le Soleil est intercepté en traversant la Terre**



...à la mise en évidence expérimentale des neutrinos

- En 1956, Reines et Cowan apportent la **preuve expérimentale** de l'existence du neutrino auprès du réacteur nucléaire de Savannah River
- En 1962, l'existence de **deux familles distinctes** de neutrino est démontrée à Brookhaven. Il existe un neutrino associé au muon, le ν_μ , et un neutrino associé à l'électron, le ν_e
- En 2000, un **troisième type de neutrino**, le ν_τ associé au lepton lourd τ est mis en évidence par l'expérience DONUT
- Les mesures effectuées au LEP concernant la largeur de désintégration du boson Z^0 montrent qu'**il n'existe que 3 familles de neutrinos** correspondant aux ν_e , ν_μ et ν_τ



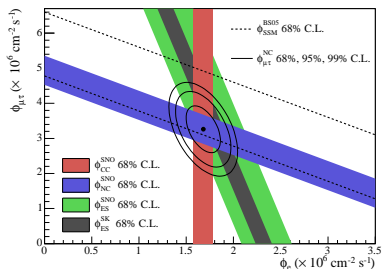
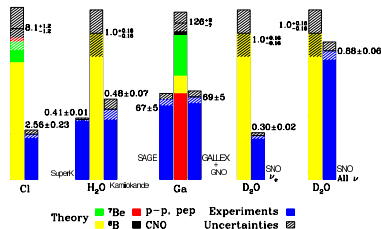
- 1 Un peu d'histoire
- 2 L'oscillation des neutrinos
- 3 Les années 2011-2012 : la mesure de θ_{13}
 - Double Chooz, Daya-Bay, RENO : les expériences nouvelle génération
 - L'expérience T2K
- 4 Futur des oscillations de neutrino

Le problème des neutrinos solaires

- Soleil = source intense de ν_e
 $\rightarrow 6.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Fusion thermonucléaire :
 $4p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu_e + 26.73 \text{ MeV}$
- Problème : les flux de ν_e mesurés par les expériences terrestres sont tous en désaccord avec les prédictions théoriques (SSM) avec un déficit observé de 50 à 70%

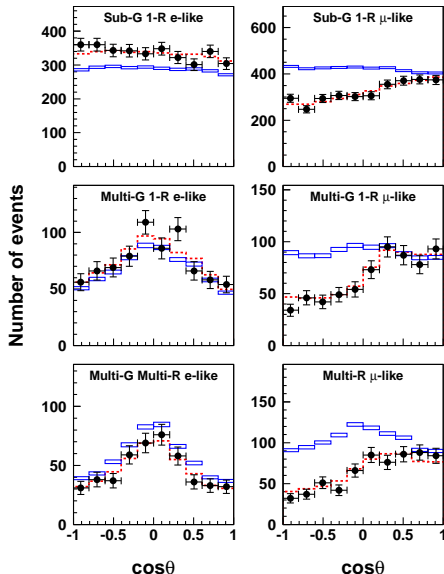
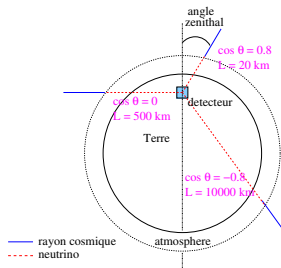
- Solution : le flux de neutrinos $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ est en accord avec les prédictions du SSM (expérience SNO, 2001)
 \Rightarrow phénomène d'oscillation des ν_e entre leur production dans le Soleil et leur détection sur Terre

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Serenelli 2005 [BS05(OP)]



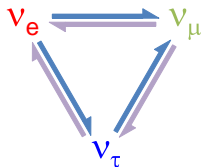
Le problème des neutrinos atmosphériques

- Interaction des rayonnements cosmiques dans l'atmosphère : $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ puis $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
- Problème : le rapport ν_μ/ν_e observé est différent du rapport théorique de 2
- Solution : **oscillation des neutrinos dépendant de la distance parcourue** (expérience SuperK, 1998)



L'oscillation des neutrinos

- Super-Kamiokande (1998) & SNO (2001) : les neutrinos sont massifs et oscillent entre 3 états de saveur
- Ces oscillations sont décrites par la matrice unitaire U^{PMNS} :
 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$

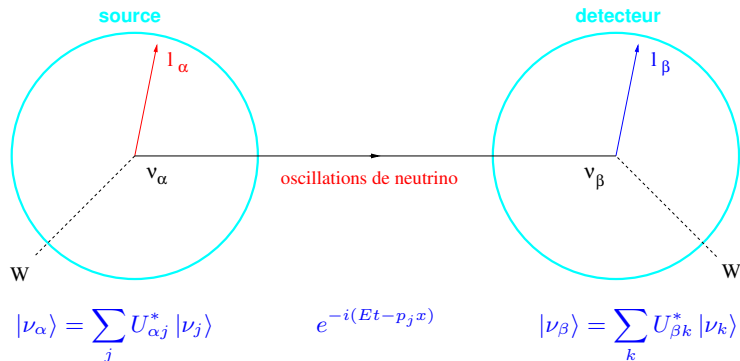


$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & e^{-i\delta} s_{13} \\ & 1 & \\ -e^{i\delta} s_{13} & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} \\ -s_{12} & c_{12} \\ & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

ν atmosphériques ν solaires

- 6 paramètres nécessaires :

- 3 angles de mélange : θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}
- 2 différences de masse carrée : $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$, $\Delta m_{31}^2 = m_3^2 - m_1^2$
- et une phase de violation CP : δ



les états de propagation sont les états propres de masse

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(E, L) = |\mathcal{A}_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}|^2 = \sum_{j,k} U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^* \exp\left(-i \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{2E}\right)$$

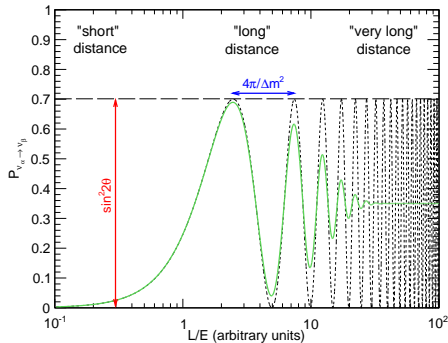
Cas à deux saveurs :

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \Phi$$

$$\Phi = \frac{\Delta m^2 L}{4E} = 1,27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]}$$

- “courte” distance $\Leftrightarrow \Phi \ll 1$
oscillations non développées

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \delta_{\alpha\beta}$$

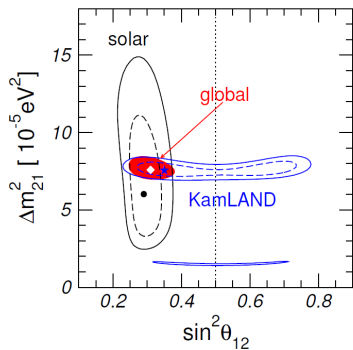


- “longue” distance $\Leftrightarrow \Phi \gtrsim \pi/2$
oscillations observables
- “très longue” distance $\Leftrightarrow \Phi \gg 2\pi$
oscillations moyennées
(indépendantes de L et E)

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sum_j |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2$$

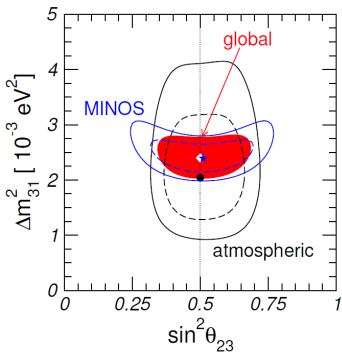
Paramètres mesurés expérimentalement

Contours à 90% et 99.73% C.L.



Δm_{21}^2 : mesuré par KamLAND
[Abe et al. *Phys. Rev. Lett.* 100]

θ_{12} : mesuré par SNO
[Aharmim et al. *Phys. Rev. C*72]



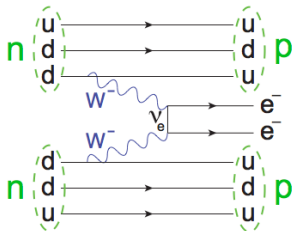
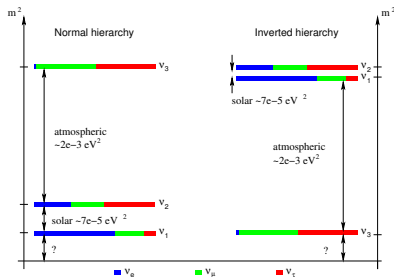
$|\Delta m_{31}^2|$: mesuré par MINOS
[Adamson et al. *Phys. Rev. Lett.* 101]

θ_{23} : mesuré par Super-K
[Ashie et al. *Phys. Rev. D*71]

Paramètres non mesurés et questions non-résolues en 2011

- Accessible par des expériences d'oscillation
 - ① Valeur de l'angle de mélange θ_{13} ?
 - ② Valeur de la phase de violation CP : origine de l'asymétrie matière / anti-matière de l'univers via la leptogénèse ?
 - ③ Hiérarchie des masses = signe de Δm_{31}^2 ?

- Nécessitant d'autres types d'expériences
 - ① Echelle absolue des masses des neutrinos ?
 - ② Nature du neutrino - Dirac ou Majorana ?



1 Un peu d'histoire

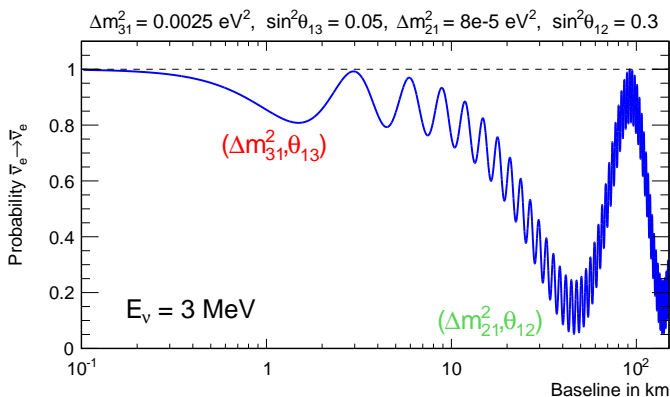
2 L'oscillation des neutrinos

3 Les années 2011-2012 : la mesure de θ_{13}

- Double Chooz, Daya-Bay, RENO : les expériences nouvelle génération
- L'expérience T2K

4 Futur des oscillations de neutrino

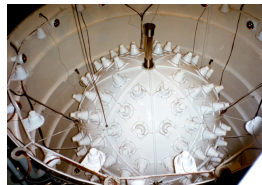
Oscillation des neutrinos de réacteurs



$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \right)$$

De CHOOZ (1997-98) aux expériences nouvelle génération

- CHOOZ : disparition des $\bar{\nu}_e$ @ 1,05 km des réacteurs cible de 5 m³ de liquide scintillant dopé Gd



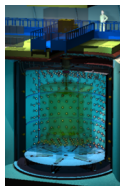
- Pas d'oscillation détectées :

$$R = \frac{N_{\text{observés}}}{N_{\text{attendus sans osc.}}} = 1,01 \pm 2,8\%(\text{stat.}) \pm 2,7\%(\text{syst.})$$

- Systématiques principales : flux $\bar{\nu}_e$ de réacteur (2,1%) et nombre de H cible (0,8%)
- Nouvelle génération : mesures relative entre **deux détecteurs identiques** pour s'affranchir de la plupart des systématiques

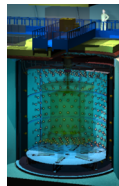


$\bar{\nu}_e$



100 m

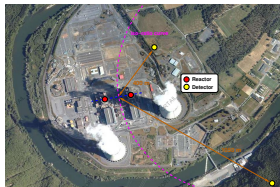
$\bar{\nu}_e, \mu, \tau$



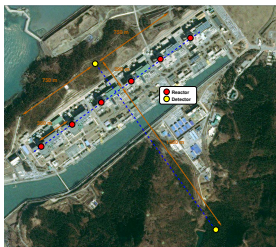
1000 m

Comparaison des expérience réacteur de nouvelle génération

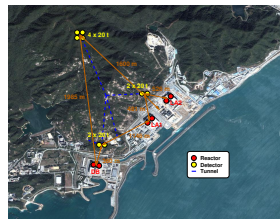
Expérience	Puissance thermique (GW)	Distance proche/lointain (m)	Blindage proche/lointain (m.w.e.)	Masse cible (tonnes)	Sensibilité $\sin^2 2\theta_{13}$ (90% C.L.)
Double Chooz (France)	8.4	390/1050	115/300	8/8	0.03
RENO (Corée du Sud)	17.3	290/1380	120/450	16/16	0.02
Daya Bay (Chine)	17.4	360(500)/1985(1615)	260/910	2x2x20 (P) 4x20(L)	0.01



Double Chooz



RENO



Daya Bay

Mesure de θ_{13} par les expériences sur réacteur

- Double Chooz

Déc. 2011 : $\sin^2 2\theta_{13} = 0.086$
 $\pm 0.041(\text{stat}) \pm 0.030(\text{syst})$

Jui. 2012 : $\sin^2 2\theta_{13} = 0.109$
 $\pm 0.030(\text{stat}) \pm 0.025(\text{syst})$

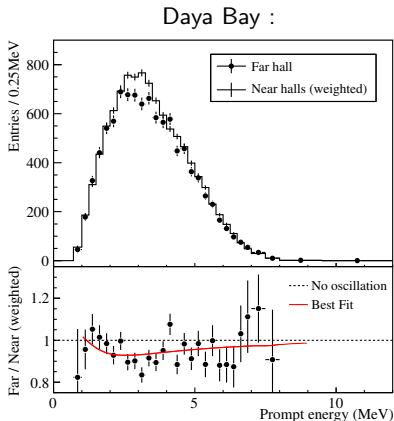
- Daya Bay

Mar. 2012 : $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092$
 $\pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst})$

- RENO

Avr. 2012 : $\sin^2 2\theta_{13} = 0.113$
 $\pm 0.013(\text{stat}) \pm 0.019(\text{syst})$

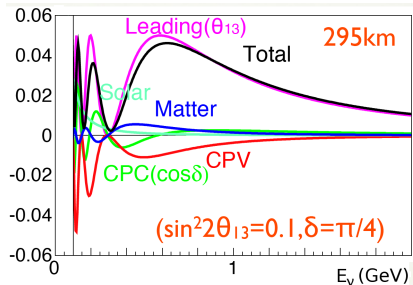
- PDG : $\sin^2 2\theta_{13} = 0.098 \pm 0.013$ positif à 7.5σ (Juin 2012)



Oscillation des neutrinos d'accélérateurs

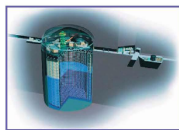
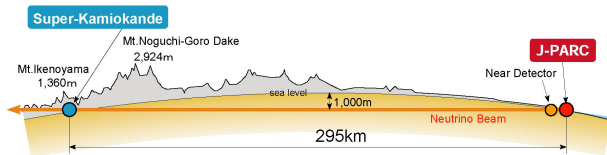
$$\begin{aligned}P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \sin^2 \Delta_{31} \\ & + 8c_{13}^2 s_{12} s_{13} s_{23} (c_{12} c_{23} \cos \delta - s_{12} s_{13} s_{23}) \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21} \\ & - 8c_{13}^2 c_{12} c_{23} s_{12} s_{13} s_{23} \sin \delta \sin \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21} \\ & + 4s_{12}^2 c_{13}^2 (c_{12}^2 c_{23}^2 + s_{12}^2 s_{23}^2 s_{13}^2 - 2c_{12} c_{23} s_{12} s_{23} s_{13} \cos \delta) \sin^2 \Delta_{21} \\ & - 8c_{13}^2 s_{12}^2 s_{23}^2 \frac{aL}{4E} (1 - 2s_{13}^2) \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \\ & + 8c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \frac{a}{\Delta m_{31}^2} (1 - 2s_{13}^2) \sin^2 \Delta_{31}\end{aligned}$$

- Apparition des ν_e :
 - tous les paramètres d'oscillation
 - violation CP
 - effets de matière
- Disparition des ν_μ :
 - paramètres "atmosphériques"



L'expérience T2K (Tokai to Kamioka)

- 1 Accélérateur de grande puissance (30 GeV)
- 2 Faisceau de neutrino intense et de grande qualité
- 3 Détecteurs proches de grande résolution
- 4 Très grand détecteur lointain (50 kTon)



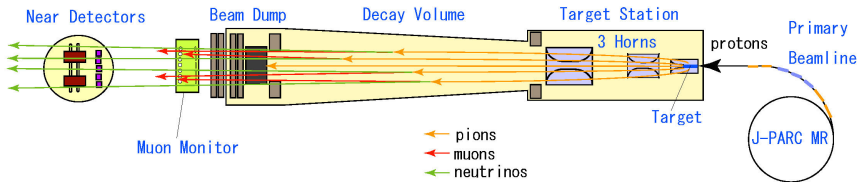
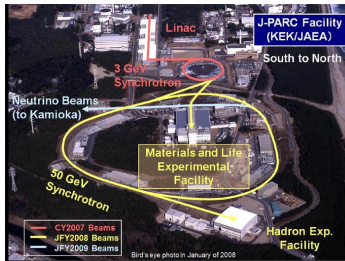
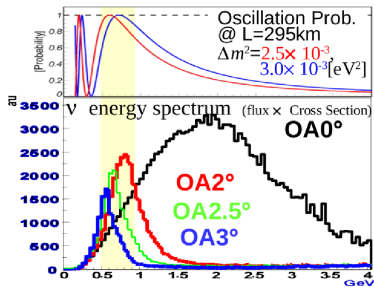
Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



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

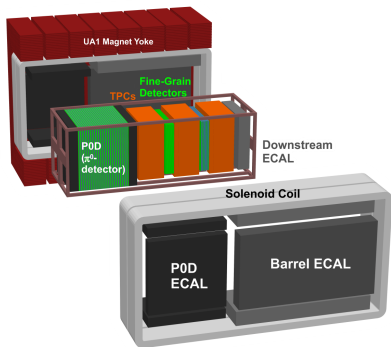
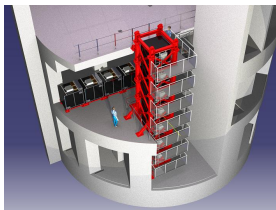
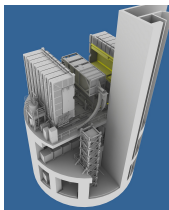


Production de neutrinos et technique hors-axe



Faisceau hors-axe (2.5°), énergie "tunée" pour max. d'oscillation, 1% contamination ν_e

Les détecteurs proches ND280

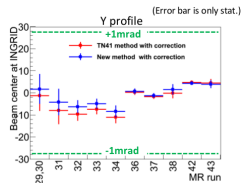
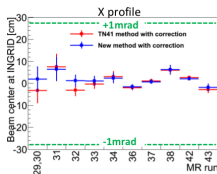
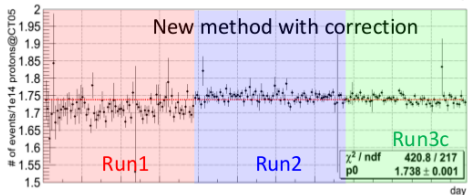
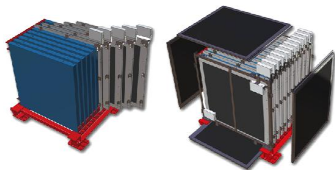
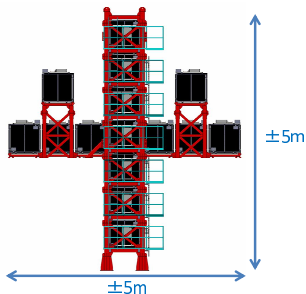


- INGRID, détecteur sur-axe :
 - Monitoring du faisceau de ν
- ND280, détecteurs hors-axe @ 2.5° :
 - Normalisation du flux de ν
 - Mesure des sections efficaces

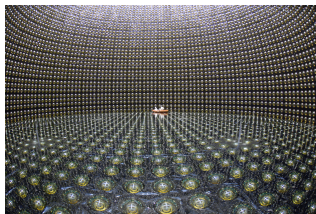
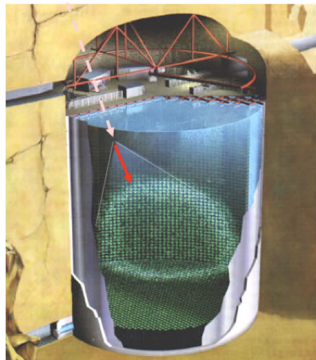
[Aimant UA1 (0.2 T), P0D (détecteur π^0), FGD+TPC (cible, tracking), ECAL (calorimètre e.m.), détecteur muons]

Contribution du LLR - INGRID & Module proton

- Design, fabrication, installation + slow-control
- INGRID : mesure du taux, direction, profile et stabilité du faisceau de ν en temps réel
- Module proton : étude de la composition du faisceau + sections efficaces relatives

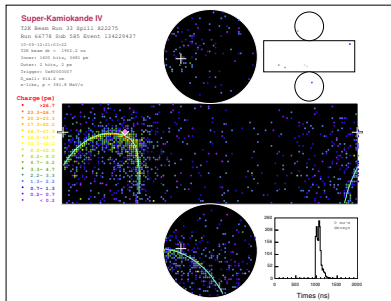


Le détecteur lointain : Super-Kamiokande

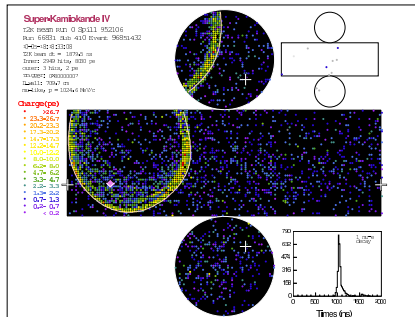


- Détecteur Cherenkov à eau pure de 50 kTons (22.5 kTon FV) situé à 1 km de profondeur
- 11129 PMTs de 20" (ID) / 1885 PMTs de 8" (véto)
- Très bonne résolution en position et impulsion
- Identification des électrons / muons produits par courant chargé : $\nu_\alpha + n \rightarrow l_\alpha^- + p$ par la forme de l'anneau
- Efficacité de détection de 61% pour ν_e / 95% rejection des π^0
- Acquisition sans temps-mort
- Synchronisation faisceau-détection par un système de GPS

Identification des particules dans Super-Kamiokande



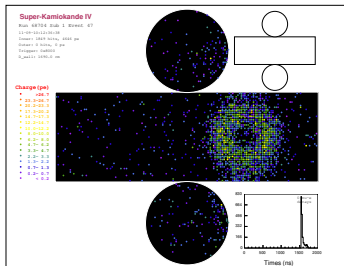
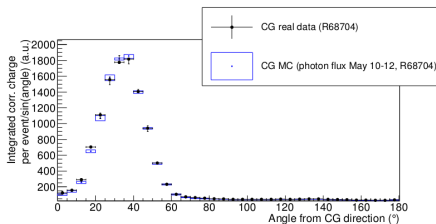
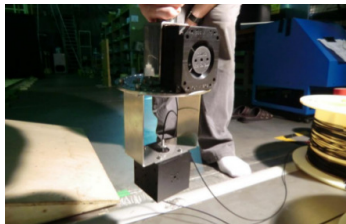
electron



muon

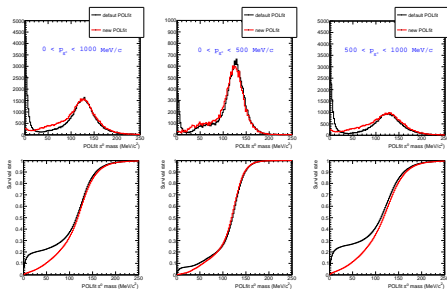
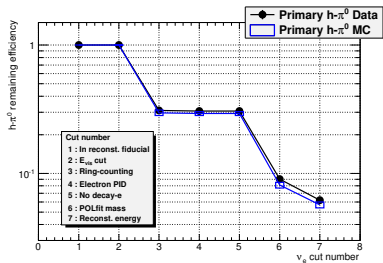
Contribution du LLR - Hardware : le "Cone Generator"

- Un des bruits de fond dominant à SK sont les π^0 mal reconstruit ($\sim 40\%$)
- Il n'existe pas d'échantillon de contrôle disponible
- Outil développé pour reproduire la topologie des événements + Simulation dédiée
- Etude avec MC-CG en cours : TRIUMF, Imperial College, LLR

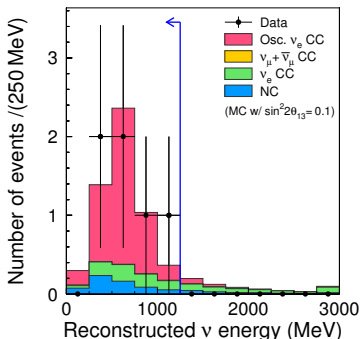


Contribution du LLR - Software : Hybrid- π^0 + POLfit

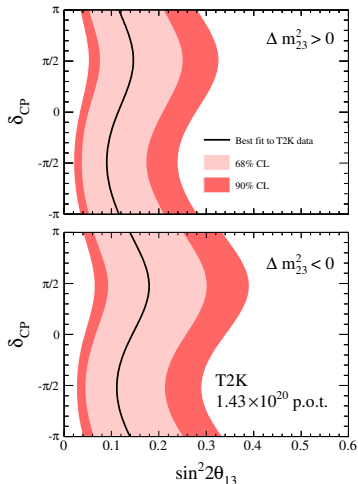
- Hybrid- π^0 :
 - Événements mélangant données électron et MC reproduisant topologie d'événements π^0
 - Etude des erreurs systématiques sur les bruits de fond π^0
 - Résultats utilisés dans l'analyse officiel publiée (2011) + futures analyses
- POLfit :
 - Algorithme officiel d'identification des π^0 mal reconstruit (un seul anneau)
 - Etude d'optimisation de l'algorithme en cours
 - BUT : réduire la contamination en π^0 sans impact sur le signal électron



- Jun 2011** : Six événements ν_e ont été observés avec un bruit de fond prévu de 1.5 ± 0.3 ($\theta_{13} = 0$) $\Rightarrow \theta_{13} > 0$ à 2.5σ

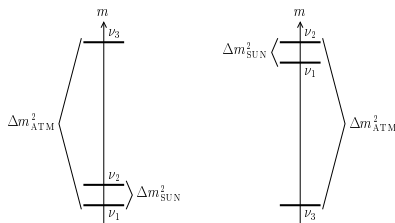


- La prise de données a repris après le travail de reconstruction dû au tremblement de terre de mars 2011 (10 événements @ Neutrino 2012)



- 1 Un peu d'histoire
- 2 L'oscillation des neutrinos
- 3 Les années 2011-2012 : la mesure de θ_{13}
 - Double Chooz, Daya-Bay, RENO : les expériences nouvelle génération
 - L'expérience T2K
- 4 Futur des oscillations de neutrino

- Le mélange leptonique reflète-t-il une symétrie sous-jacente? e.g. $\sin^2 2\theta_{23} = 1$?
⇒ mesures de précision (expériences long baseline)
- Quelle est la hiérarchie de masse ?



⇒ distinguée par effet de matière (expériences long baseline)

- La symétrie CP est-elle violée dans le secteur des leptons? i.e. a-t-on $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$ dans le vide
condition nécessaire pour la leptogénèse
⇒ expériences long baseline car dû à terme d'oscillation sous-dominant

- Expérience auprès de réacteur :

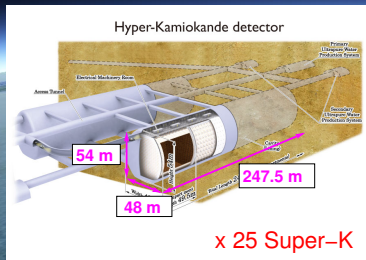
- ① Amélioration de la **précision sur θ_{13}**
- ② **Pas de sensibilité** à la hiérarchie de masse @ $L = 1-2$ km
- ③ Si **expérience dédiée @ $L \sim 60$ km**, précision de 2% sur $\sin^2 2\theta_{12}$, sensibilité à la hiérarchie de masse \Rightarrow Daya Bay II?

- Expérience T2K :

- ① **Confirmer indépendamment** les résultats de Daya Bay et atteindre une mesure de $\sin^2 2\theta_{13}$ à 5σ
- ② Amélioration de la **précision sur les paramètres "atmosphériques"** ($\sin^2 2\theta_{23}, \Delta m_{32}^2$) par disparition des ν_μ
- ③ Run en $\bar{\nu}_\mu$ confirmation mesure θ_{13} , premières informations sur la hiérarchie de masse et δ_{CP} , détecteur LAr en Corée T2KK?

\Rightarrow la précision requise aujourd'hui nécessite des expériences de nouvelle génération
long-baseline / haute intensité / détecteur Mton

Le projet Japonais Hyper-K / T2HK



Baseline design

- ID : 20% photo-coverage, 99000 20" PMT
- OD (2m) : 25000 8" PMT

Technically feasible design established

Hyper-K Super-K



Each cavity separated into five

- Each volume twice of Super-K
- Photo-sensors on separation walls

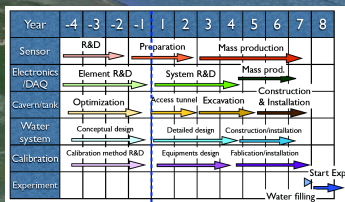
Performance equivalent to Super-K

Double caverns

- Total mass : 0.99 Mton
- Fiducial : 0.56 Mton

**0.6 GeV
295 km**

- 8 km south of Super-K
- 648m of rock (1750 mwe) overburden
- 13000 m3/day natural water (1Mt/80days)



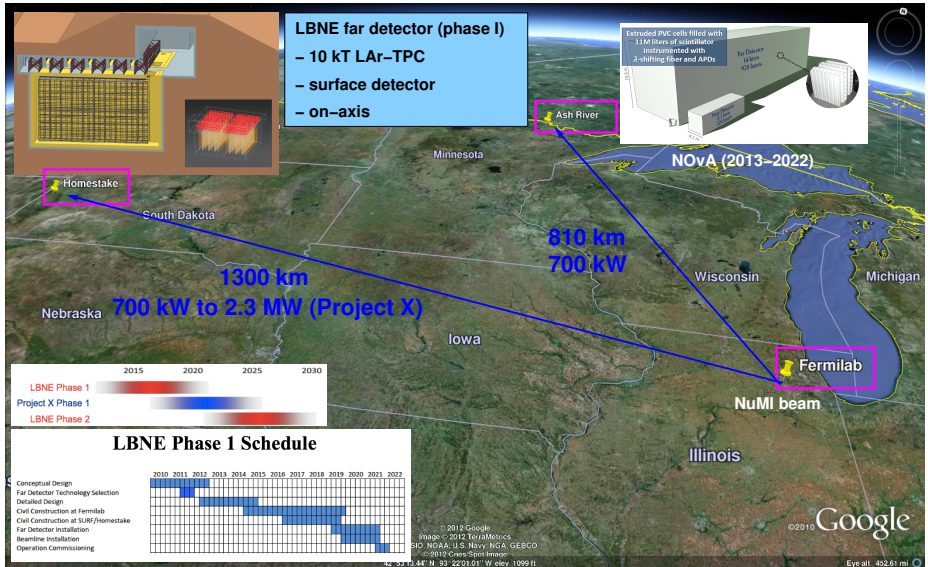
J-PARC

© 2012 CrossSpot Image
Data Japan Hydrographic Association
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
Image © 2012 TerraMetrics
36°41'01.26" N 138°47'57.68" E elev 3323 ft

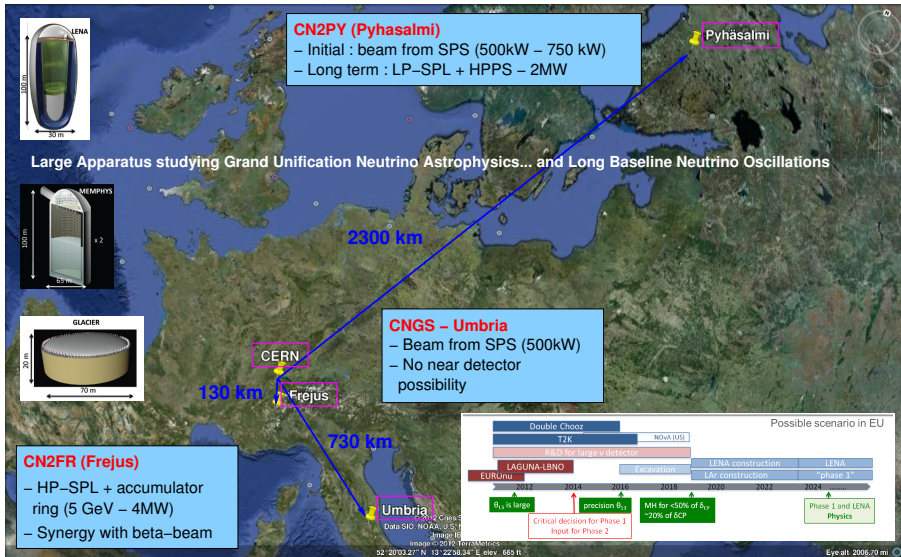
©2010 Google

Eye alt 155.27 mi

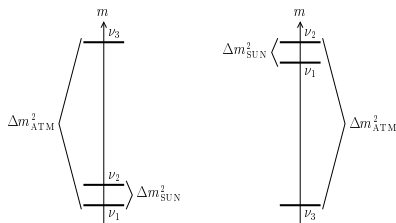
Le projet Américain Long-Baseline Neutrino Experiment (LBNE)



Le projet européen LAGUNA / EuroNu / LAGUNA-LBNO



- Le mélange leptonique reflète-t-il une symétrie sous-jacente? e.g. $\sin^2 2\theta_{23} = 1$?
 \Rightarrow mesures de précision (expériences long baseline)
- Quelle est la hiérarchie de masse?



\Rightarrow distinguée par effet de matière (expériences long baseline)

- La symétrie CP est-elle violée dans le secteur des leptons? i.e. a-t-on $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$ dans le vide
 condition nécessaire pour la leptogénèse
 \Rightarrow expériences long baseline car dû à terme d'oscillation sous-dominant