

Cours de physique des particules
(MA1 ou MA2)
Année académique 2023-24
PHYSF-416 (5ECTS)

CHAPITRE 9 : LES OSCILLATIONS DES NEUTRINOS : Sources artificielles

Chapitre IX: Oscillations de neutrinos - Sources artificielles

- **IX.1. Introduction**
- **IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs**
- **IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs**
- **IX.4. Conclusions**

IX.1. Introduction

Neutrinos de réacteurs

Un réacteur de fission nucléaire est une source pure de $\bar{\nu}_e$:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad \text{Basse énergie} \quad E < 10 \text{ MeV}$$

$$\langle E \rangle \approx 3 \text{ MeV}$$

Flux élevé: Un réacteur de $3GW_{therm}$ produit $7 \times 10^{20} \bar{\nu}_e \text{ s}^{-1}$

Neutrinos d'accélérateurs

Les interactions des protons du faisceau primaire sur une cible de nucléons produisent des π et des K

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu / \bar{\nu}_\mu (+\pi^0)$$

En focalisant les mesons positifs (négatifs) et défocalisant les négatifs (positifs) on obtient un faisceau de ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) avec q.q. % de contamination de $\bar{\nu}_\mu$ (ν_μ) et 1% de ν_e ($\bar{\nu}_e$).

Le spectre d'énergie est ajustable, dans une certaine mesure (1 - 25 GeV)

IX.1. Introduction

Deux caractéristiques de (presque) toutes les expériences d'oscillations de ν

- Cibles massives: dizaines de tonnes ou de kilotonnes, pour compenser la faible section efficace d'interaction des neutrinos.
- Souterraines pour protéger le détecteur des muons cosmiques – Une épaisseur de 1400 m de roches réduit le flux de μ de $100/\text{m}^2/\text{s}$ à $20/\text{m}^2/\text{jour}$
- Les expériences auprès des accélérateurs tolèrent un bruit de fond cosmique plus important vu que:
 - Flux plus élevé: 10^{10} par éjection
 - Haute énergie et donc section efficace plus élevée
 - Durée d'éjection courte (millisecondes à dizaines de microsecondes)
 - Faisceau horizontal (bruit de fond plus faible)

Chapitre IX: Oscillations de neutrinos - Sources artificielles

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

Le test idéal des oscillations de ν serait d'avoir une source de ν fixe, intense et bien connue comme un réacteur nucléaire ou un accélérateur, et de pouvoir déplacer le détecteur pour faire varier L autour de la longueur d'oscillation L_{osc} .

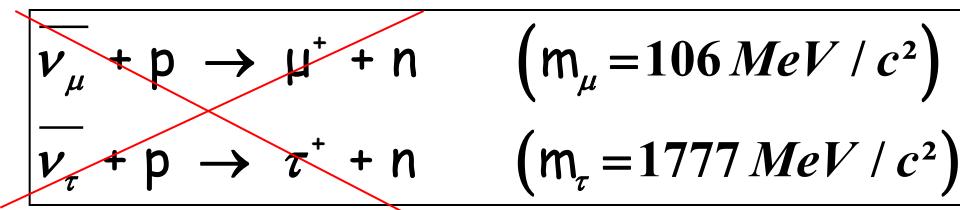
Toutefois, il est totalement irréaliste de déplacer de tels détecteurs et il faut utiliser les variations d'énergie E de la source. Dans le cas des réacteurs, la distribution d'énergie est fixe, ce qui implique de pouvoir mesurer l'énergie.

Les réacteurs nucléaires, sources de $\bar{\nu}_e$, permettent de vérifier les conclusions des expériences d'oscillations avec des ν solaires, des ν_e , en l'absence de toute hypothèse astrophysique.

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ Principe : la source

Comme pour les ν_e solaires, l'énergie des antineutrinos incidents (de l'ordre du MeV) est insuffisante pour permettre les réactions :

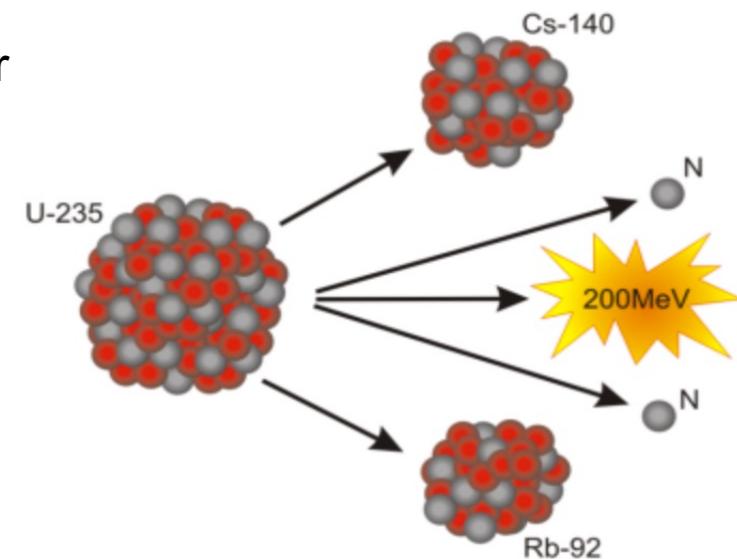


Dès lors, il s'agit aussi d'**expériences de “disparition”**; on observe éventuellement la disparition des $\bar{\nu}_e$ mais on n'observe pas l'apparition des $\bar{\nu}_\mu$ ou des $\bar{\nu}_\tau$

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

Le principe des dispositifs expérimentaux de ces expériences d'oscillations est très semblable à celui utilisé par Reines et Cowan (1956) pour la découverte du neutrino.

Les antineutrinos électroniques émis par un réacteur ne sont pas issus directement de la réaction en chaîne de fission, mais de la décroissance radioactive des deux fragments de fission : les fragments de fission sont encore en excès de neutrons, et sont donc très instables. Seule la désintégration beta- peut leur permettre de rejoindre la stabilité, en général par 3 désintégrations par fragment.



Pour un réacteur produisant **3.3 GW**

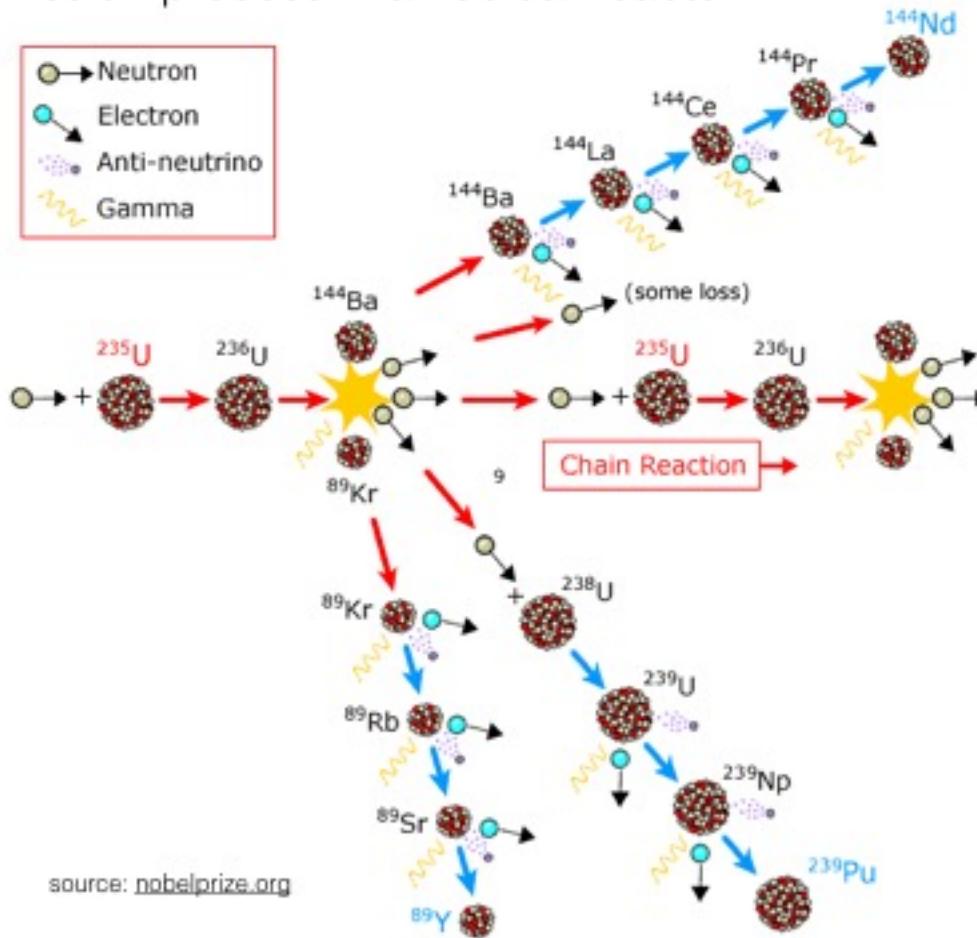
$$\text{Le taux de fission } \approx \frac{3.3 \text{ GW}}{200 \text{ MeV}} \approx 10^{20} \text{ s}^{-1} \Rightarrow 6 \cdot 10^{20} \bar{\nu}_e \text{ s}^{-1}$$

Reaction β^- :

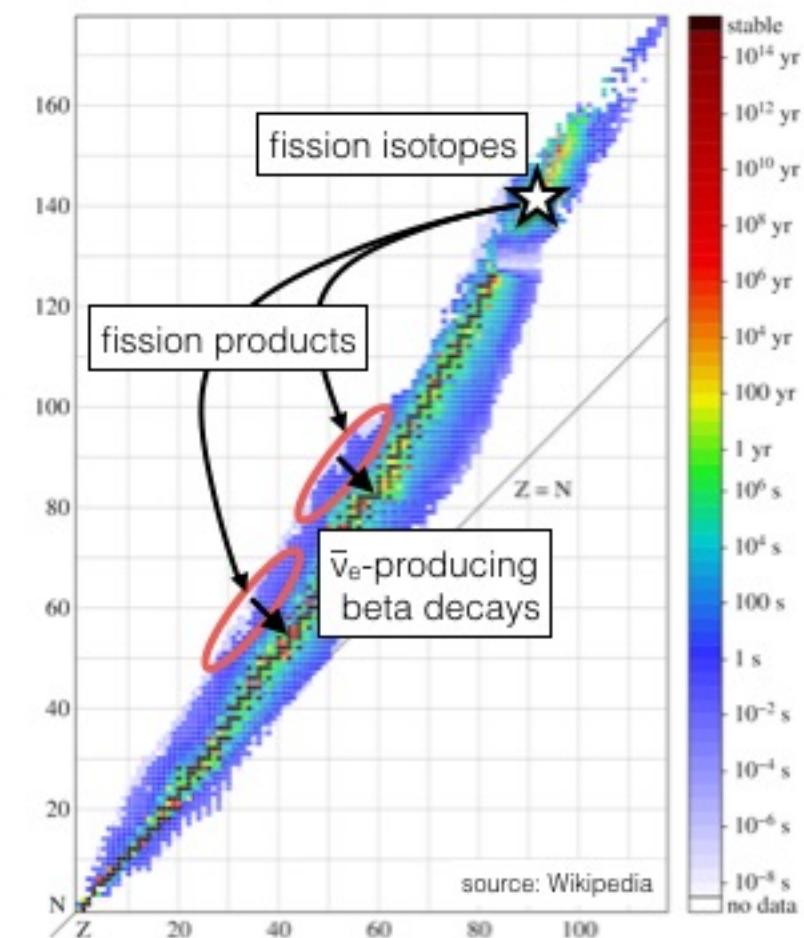
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

fission process in a nuclear reactor



source: nobelprize.org



■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{241}Pu
E fission (MeV) [59]	$201,7 \pm 0,6$	$205,0 \pm 0,9$	$210,0 \pm 0,9$	$212,4 \pm 1,0$
$E_{\bar{\nu}_e}$ moyenne (MeV)	1,46	1,56	1,32	1,44
nombre de $\bar{\nu}_e$ / fission	5,58	6,69	5,09	5,89
$\bar{\nu}_e$ / fission, $E_{\bar{\nu}_e} > 1,8$ MeV [60]	$1,92 \pm 0,02$	$2,38 \pm 0,02$	$1,45 \pm 0,02$	$1,83 \pm 0,02$

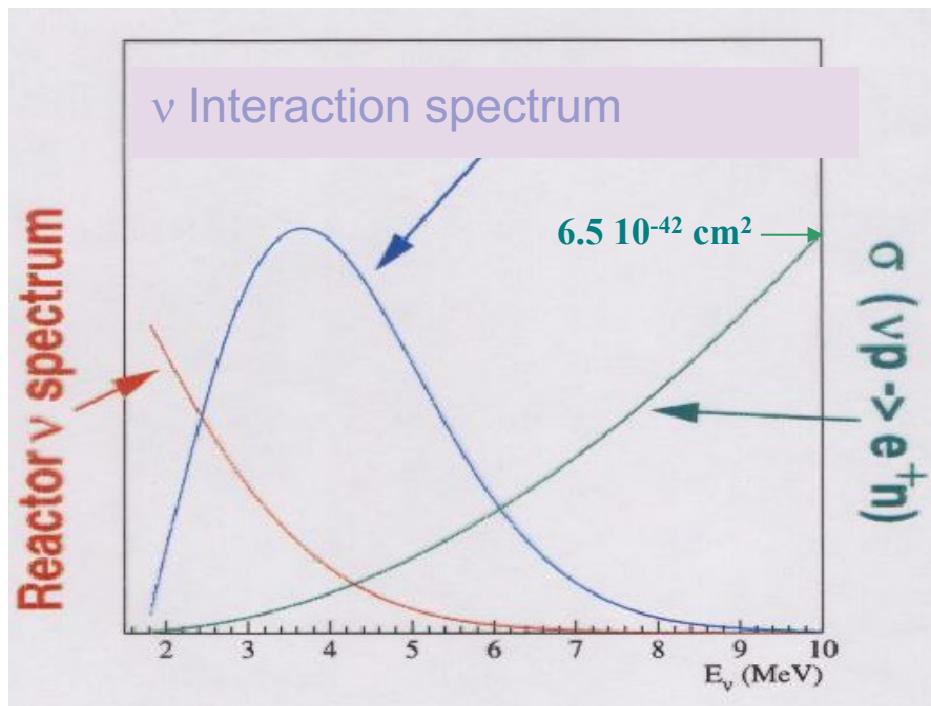
TABLE 2.1 – Influence des 4 principaux isotopes sur le spectre neutrino de réacteur.

En connaissant la composition du combustible nucléaire, le taux de fission, calculé à partir de la puissance thermique délivrée, et le taux de production de $\bar{\nu}_e$ dans les désintégrations β , mesurés pour les différents isotopes à partir du spectre des électrons, on peut calculer le **flux de $\bar{\nu}_e$** avec une précision de 1 ou 2%.

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

■ Principe : la détection : par “Inverse Beta Decay” (IBD)

Même technique que pour l'expérience de Reines et Cowan (1956)



Les $\bar{\nu}_e$ ont typiquement q.q. MeV.

Ils sont détectés via la réaction:



Même si le flux est important, il est en $1/L^2$,

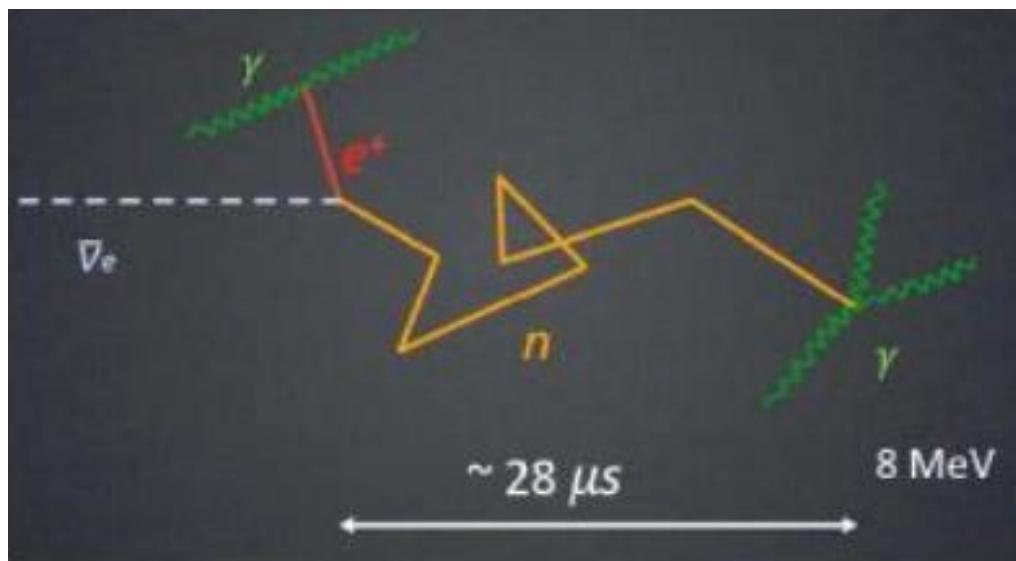
L = distance réacteur - détecteur

+ σ est petit \Rightarrow taux d'évts faible

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ Principe : le détecteur

détection par “Inverse beta decay” : IBD :



$$E_{\bar{\nu}_e}^{\text{seuil}} = 1.8 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{thr}} = \frac{(m_e + m_n)^2 - m_p^2}{2 \cdot m_p} \cdot c^2 \approx (m_e + m_n - m_p) \cdot c^2 = 1.806 \text{ MeV}$$

$$\begin{aligned} m_e &= 0.511 \text{ MeV} \\ m_p &= 938.272 \text{ MeV} \\ m_n &= 939.565 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$E_{\text{vis}} = 511 \text{ keV} + 511 \text{ keV} + (E_{\bar{\nu}_e} - 1806 \text{ keV}) = E_{\bar{\nu}_e} - 784 \text{ keV}$$

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ Principe : le détecteur

Réservoir de grandes dimensions rempli d'un liquide scintillant dopé avec un matériau ayant une section efficace d'interaction avec les neutrons élevée.

Blindage pour protéger des rayons cosmiques, de la radioactivité naturelle et des neutrons du réacteur.

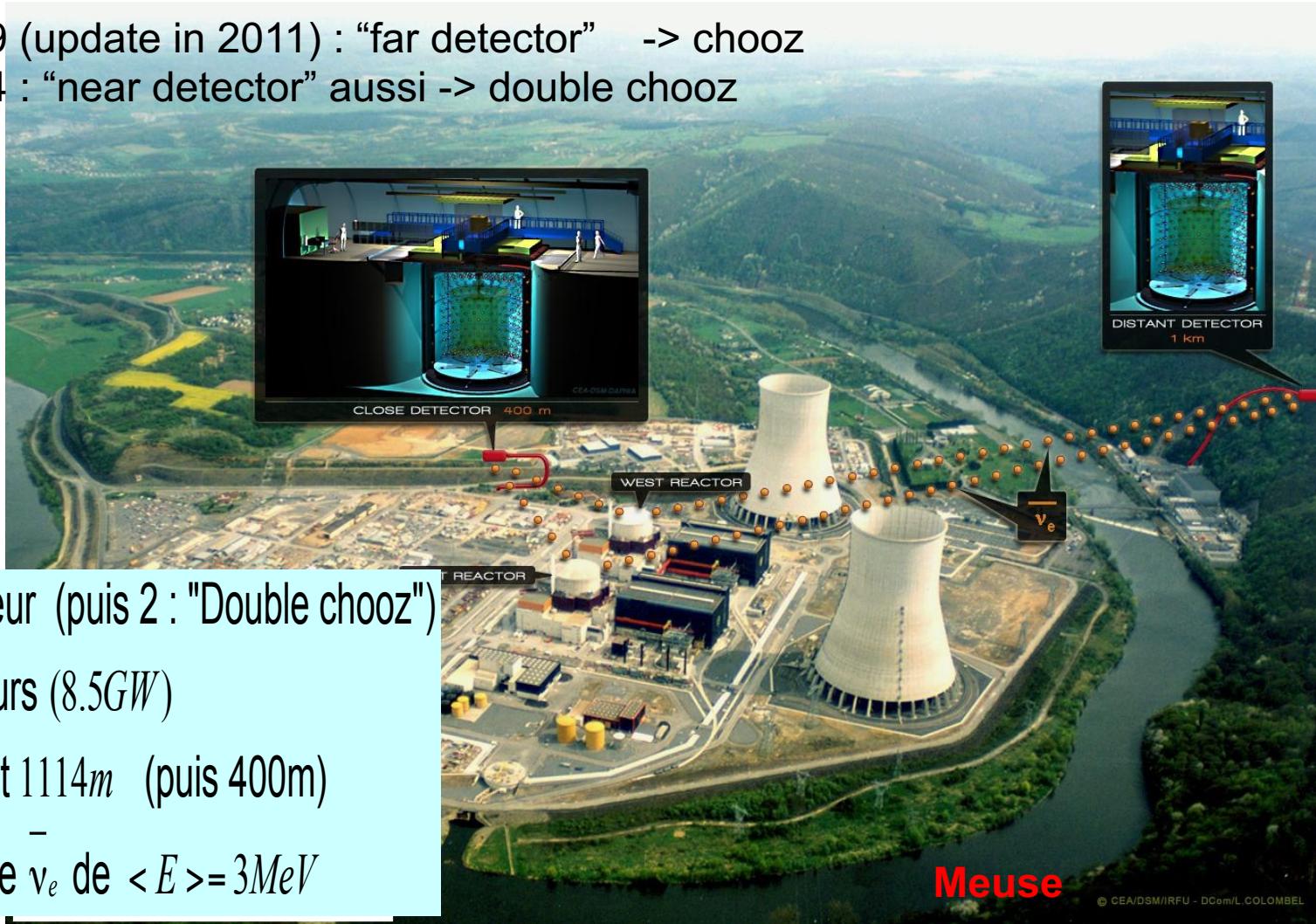
PMT pour détecter les photons émis lors de l'annihilation des e^+ et lors des captures des neutrons (reconstruction de l'énergie du $\bar{\nu}$ incident).

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ L'expérience de Chooz (Ardennes - France):

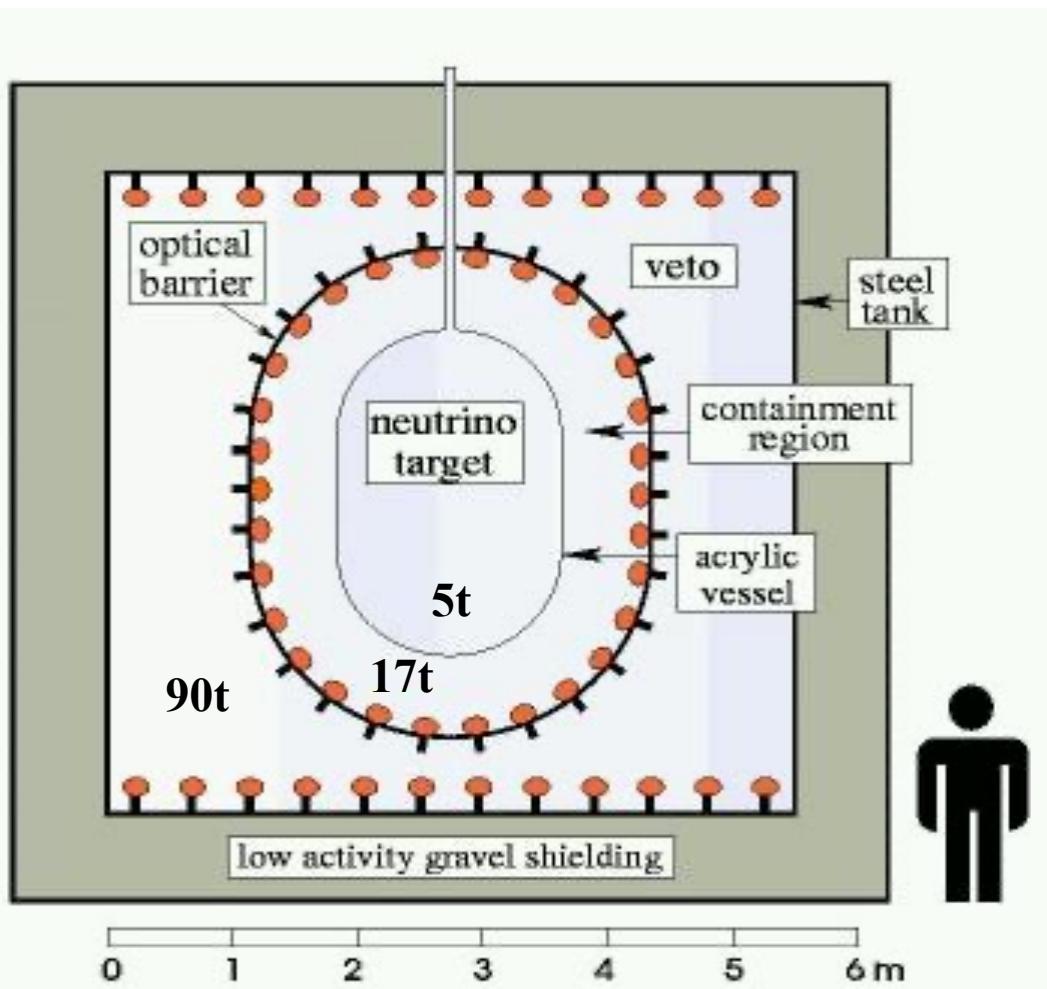
1999 (update in 2011) : "far detector" -> chooz

2014 : "near detector" aussi -> double chooz



■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ L'expérience de Chooz:



- bouclier de roches: (far detector)
équivalent à 300 m d'eau
- 0.4 muons cosmiques $m^{-2}s^{-1}$
- veto sur les muons cosmiques

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ L'expérience de Chooz:

Pour les oscillations d'une source pure de $\bar{\nu}_e$ de 1 MeV :

Les 2 longueurs d'oscillations à considérer sont:

$$L_{osc}^{court} [m] = 2.47 \frac{E [MeV]}{\Delta m_{31}^2 [eV^2]} \approx \frac{2.47}{2.5 \cdot 10^{-3}} \approx 1000 \text{ m}$$

Chooz

A petit $L \sim L_{osc}^{court}$ ce sont les oscillations $\bar{\nu}_\mu \leftrightarrow \bar{\nu}_\tau$

qui dominent.

$$L_{osc}^{long} [m] = 2.47 \frac{E [MeV]}{\Delta m_{21}^2 [eV^2]} \approx \frac{2.47}{7.5 \cdot 10^{-5}} \approx 30000 \text{ m}$$

A grand $L \sim L_{osc}^{long}$ ce sont les oscillations $\bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau \leftrightarrow \bar{\nu}_e$

qui dominent.

(voir analyse ν atmosphériques)

A chooz, on est trop près de la source pour espérer observer une disparition significative des $\bar{\nu}_e$

Toutefois, la dépendance des probabilités de non oscillations des $\bar{\nu}_e$ en $\sin^2(2\theta_{13})$:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (1.27 \Delta m_{31}^2 L / E)$$

(voir slide 41 chap. VIII) permet de mettre une limite supérieure sur ce paramètre, en fonction de Δm_{31}^2

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ L'expérience de Chooz:

Les résultats de CHOOZ sont en accord avec ceux des expériences de ν atmosphériques:

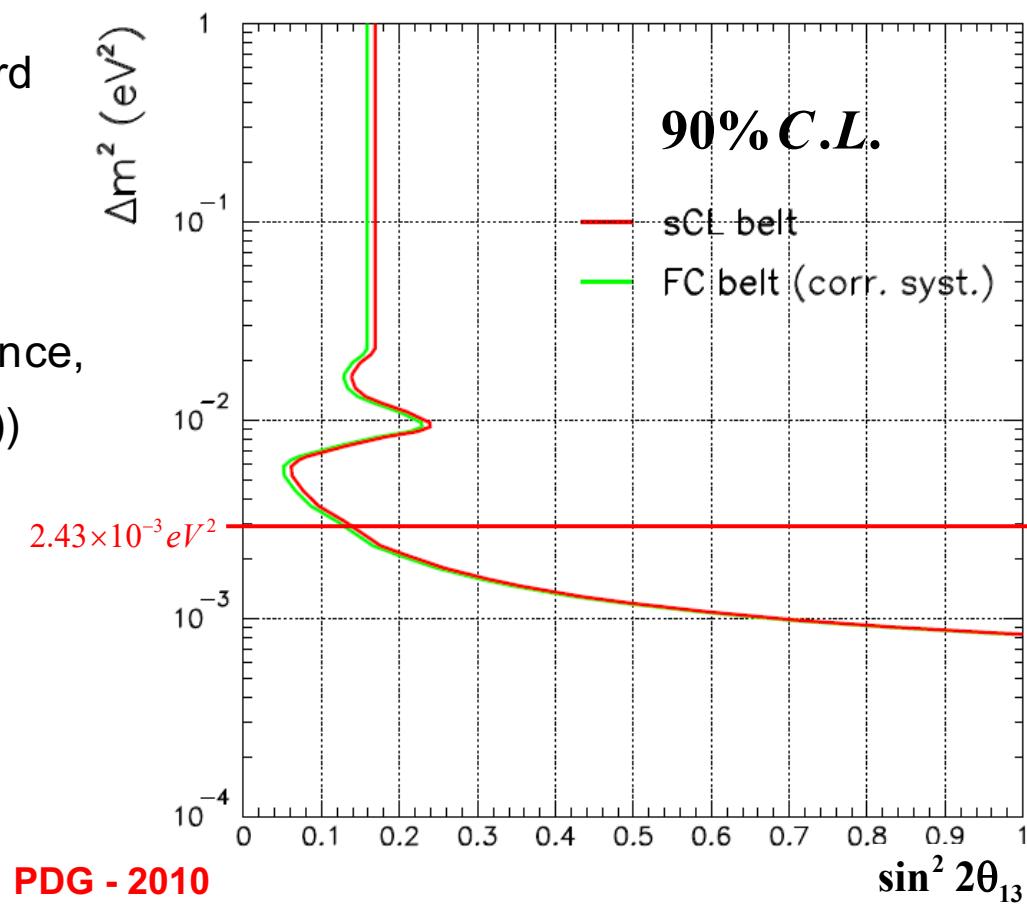
Pas de déficit de $\bar{\nu}_e$.

Ils rejettent à 90% de niveau de confiance, tous les points du plan (Δm^2 , $\sin^2(2\theta_{13})$) du coin supérieur droit délimité par le contour rouge.

pour $\Delta m_{31}^2 = 2.43 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

$\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ à 90% C.L.

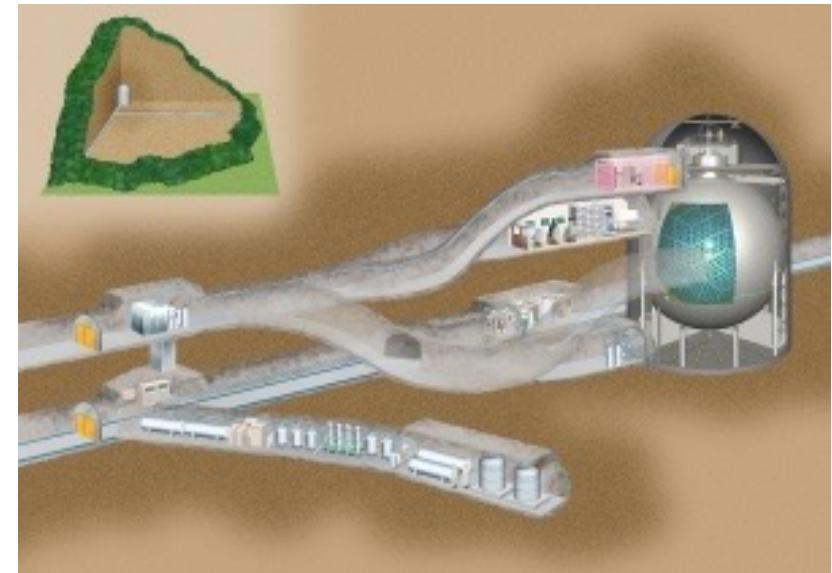
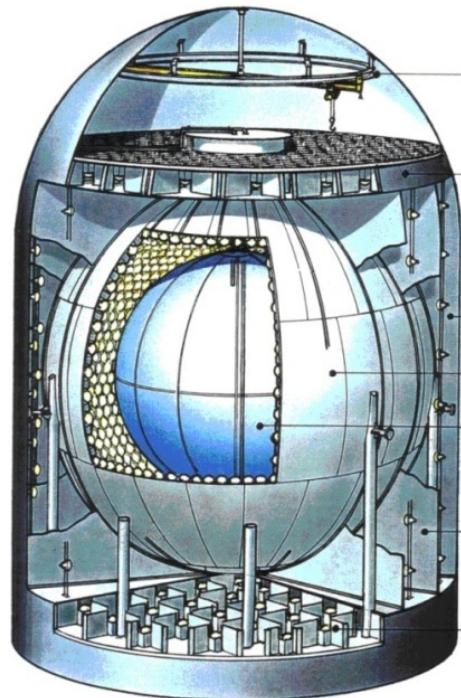
($\theta_{13} < 11.4^\circ$)



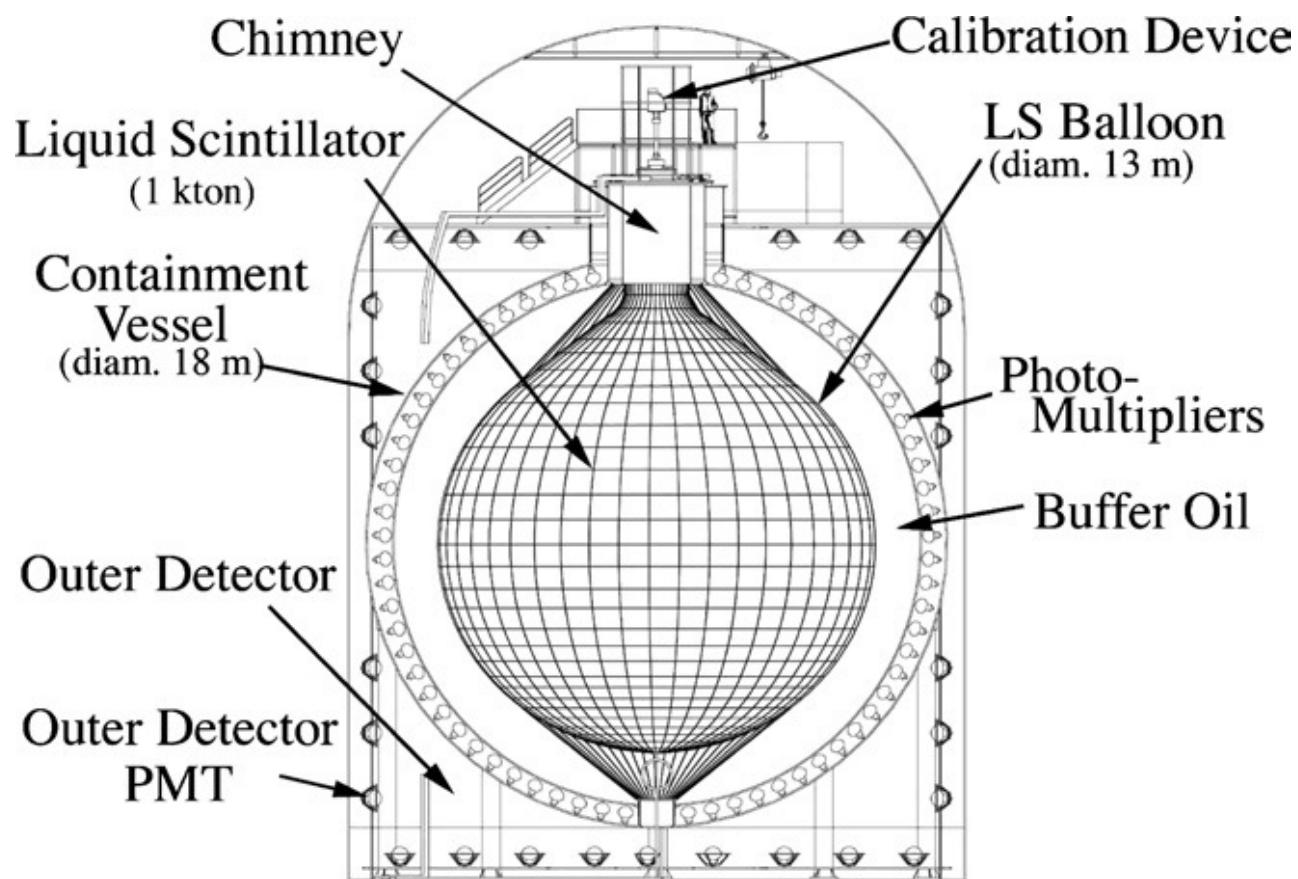
■ IX.2. Les expériences de détection d' oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ L' expérience KamLAND

Ce détecteur est installé dans la mine de Kamioaka, au Japon à bcp plus grande distance des sources, pour pouvoir observer les oscillations de $\bar{\nu}_e$ et mesurer Δm^2_{21} et $\sin^2(2\theta_{12})$ dans d'autres conditions qu' avec les ν_e solaires

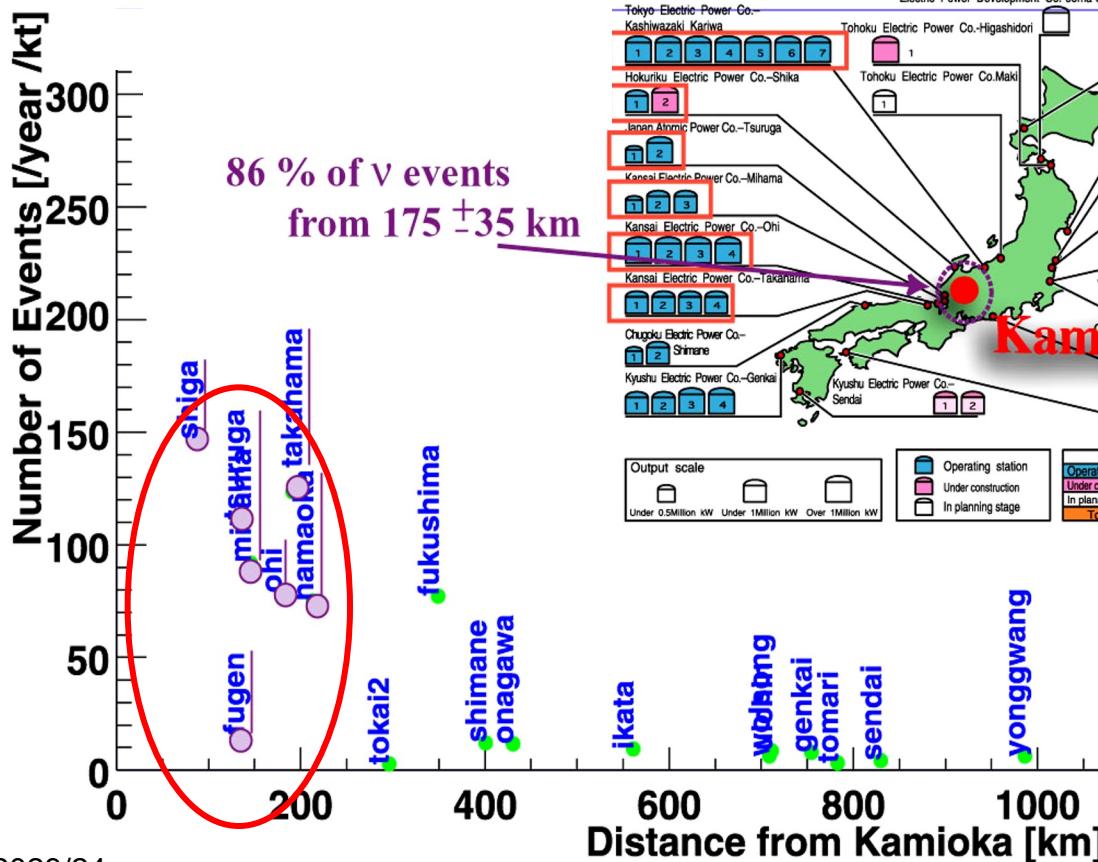


- IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs
 - L'expérience KamLAND



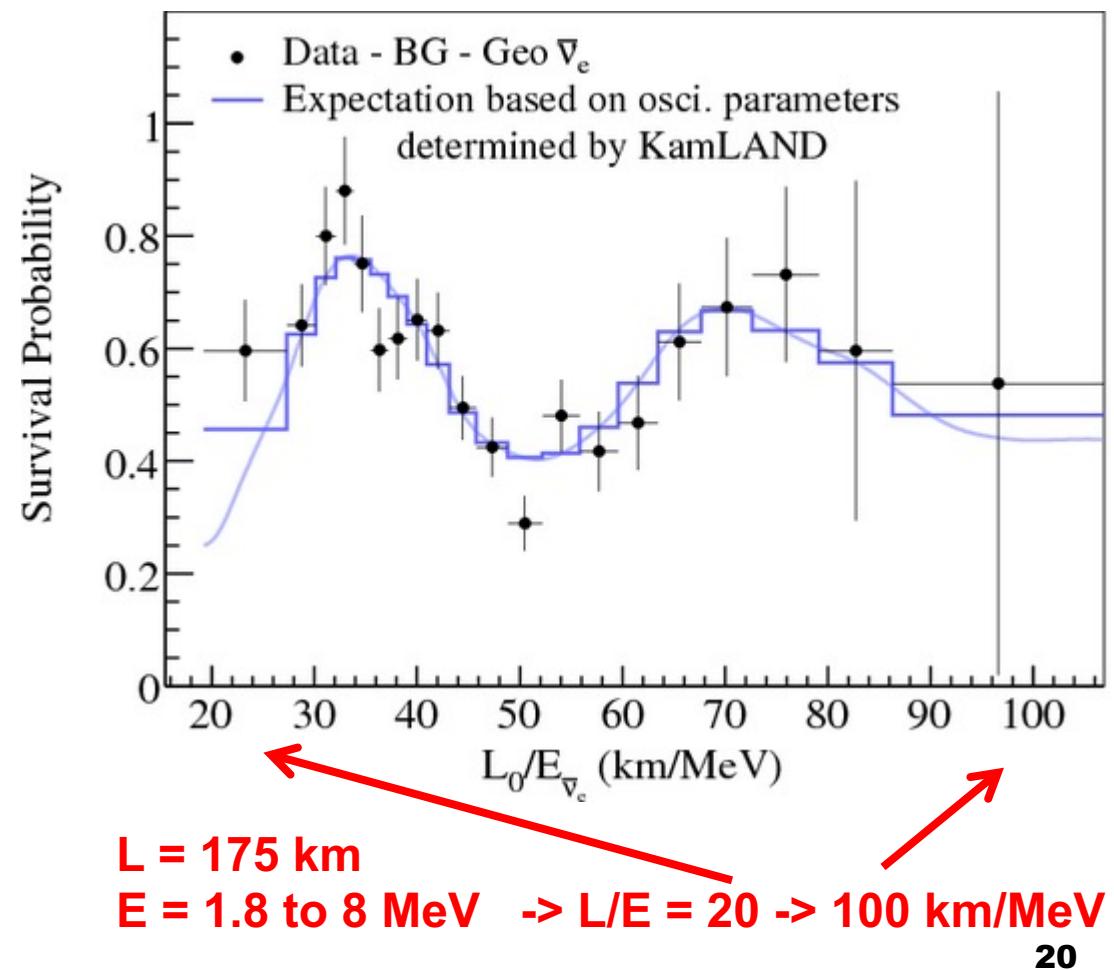
■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

- L'expérience KamLAND



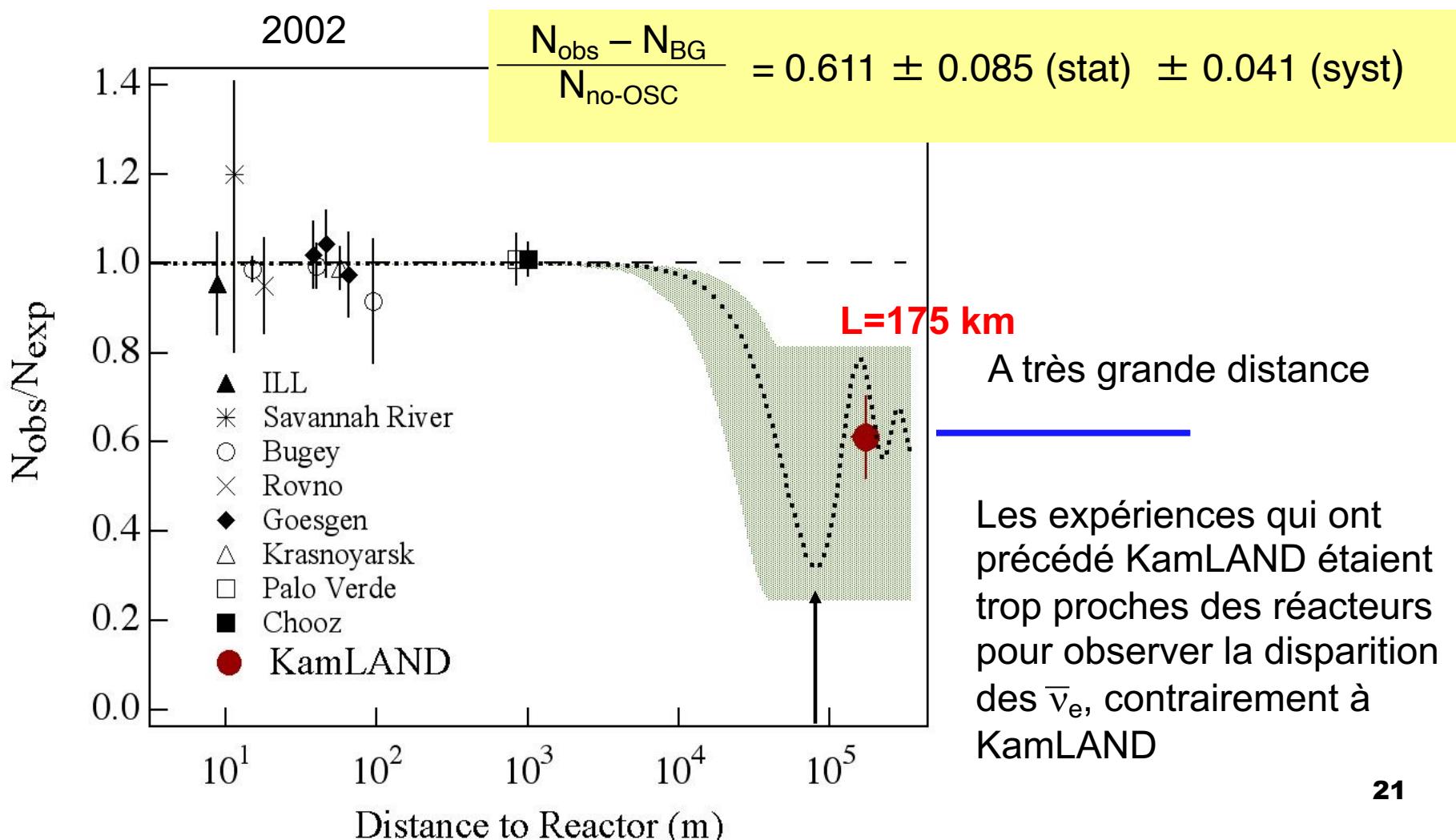
- IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs
 - L'expérience KamLAND

2179 \pm 89 interactions
 de $\bar{\nu}_e$ attendues, venant
 des réacteurs
 + 276 \pm 23 bruits de fond
 1609 observés
 \Rightarrow déficit



■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

- L'expérience KamLAND



■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ Conclusions:

Meilleur ajustement KamLAND seul:

$$\Delta m_{21}^2 = 7.58^{+0.14 \text{ +0.15}}_{-0.13 \text{ -0.15}} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.56^{+0.10 \text{ +0.10}}_{-0.07 \text{ -0.06}}$$

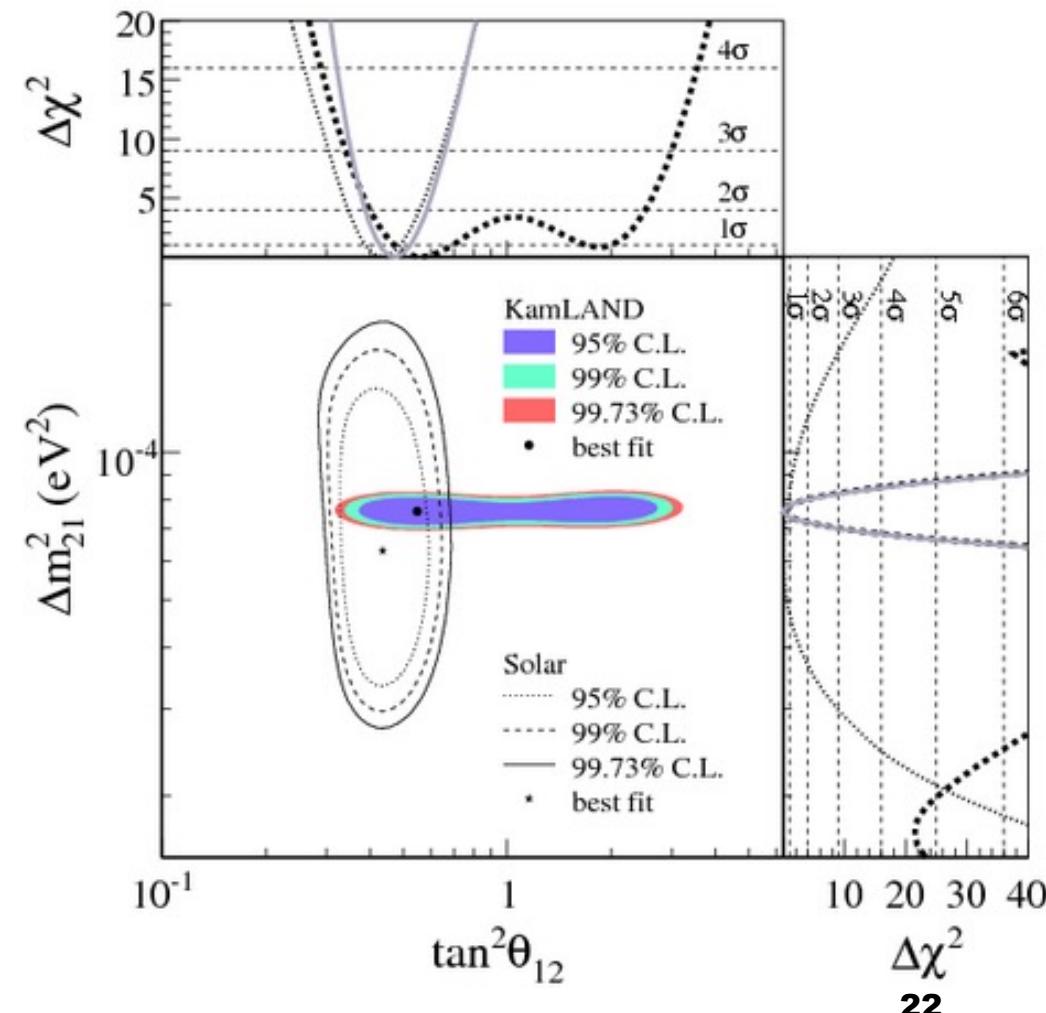
arXiv:hep-ex/0801.4589
2008

KamLAND $\bar{\nu}_e + \nu_e$ solaires:

$$\Delta m_{21}^2 = 7.50^{+0.19}_{-0.20} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.452^{+0.035 *}_{-0.033}$$

* L'influence des effets de matière prise en compte pour le soleil, permet de déterminer θ_{12} dans le 1^{er} quadrant (→ tan au lieu de sin)



■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ Conclusions:

Les résultats de KamLAND sont en accord avec les résultats des ν solaires.

Belle confirmation des observations avec les ν_e solaires

- avec des $\bar{\nu}_e$
- résultats indépendants des effets de matière
- plus précis pour Δm^2_{12}
- pour θ_{12} , l'absence d'effets de matière ne permet pas de lever l'ambiguïté d'octant.

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$:

Jusqu'en 2011, les observations de toutes les expériences d'oscillations de neutrinos sont compatibles avec $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$. Pendant 15 ans la limite supérieure la plus contraignante a été fournie par l'expérience de Chooz (2003).

Il est crucial de savoir si $\sin^2(2\theta_{13})$ est rigoureusement nul ou pas car dans le premier cas, il n'y a aucun espoir de mettre en évidence des effets de violation de CP dans le domaine leptique en étudiant des oscillations de neutrinos, quelle que soit la précision de l'expérience. En effet, dans la matrice U, tous les termes en $e^{i\delta}$, susceptibles de produire une violation de CP, sont multipliés par $\sin(\theta_{13})$.

- **IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs**
 - **La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$:**

La violation de CP observée dans le secteur des quarks ne suffit pas pour expliquer l'asymétrie matière – antimatière dans l'univers. Une violation de CP dans le secteur leptonique constituerait une explication plausible.

C'est pourquoi ces dernières années plusieurs expériences d'oscillations de neutrinos ont été réalisées auprès d'accélérateurs et auprès de réacteurs, avec pour but principal de mesurer $\sin^2(2\theta_{13})$.

■ IX.1. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$:

Ayant $U_{e3} = \sin(\theta_{13}) e^{i\delta}$, il est possible d'accéder à $\sin^2(2\theta_{13})$ en étudiant les oscillations des $\bar{\nu}_e$ produits par les réacteurs. Pour cela, il faut se placer dans un domaine de valeurs de L/E approprié pour observer le terme d'oscillation en $\Delta^2 m_{31}$, soit :

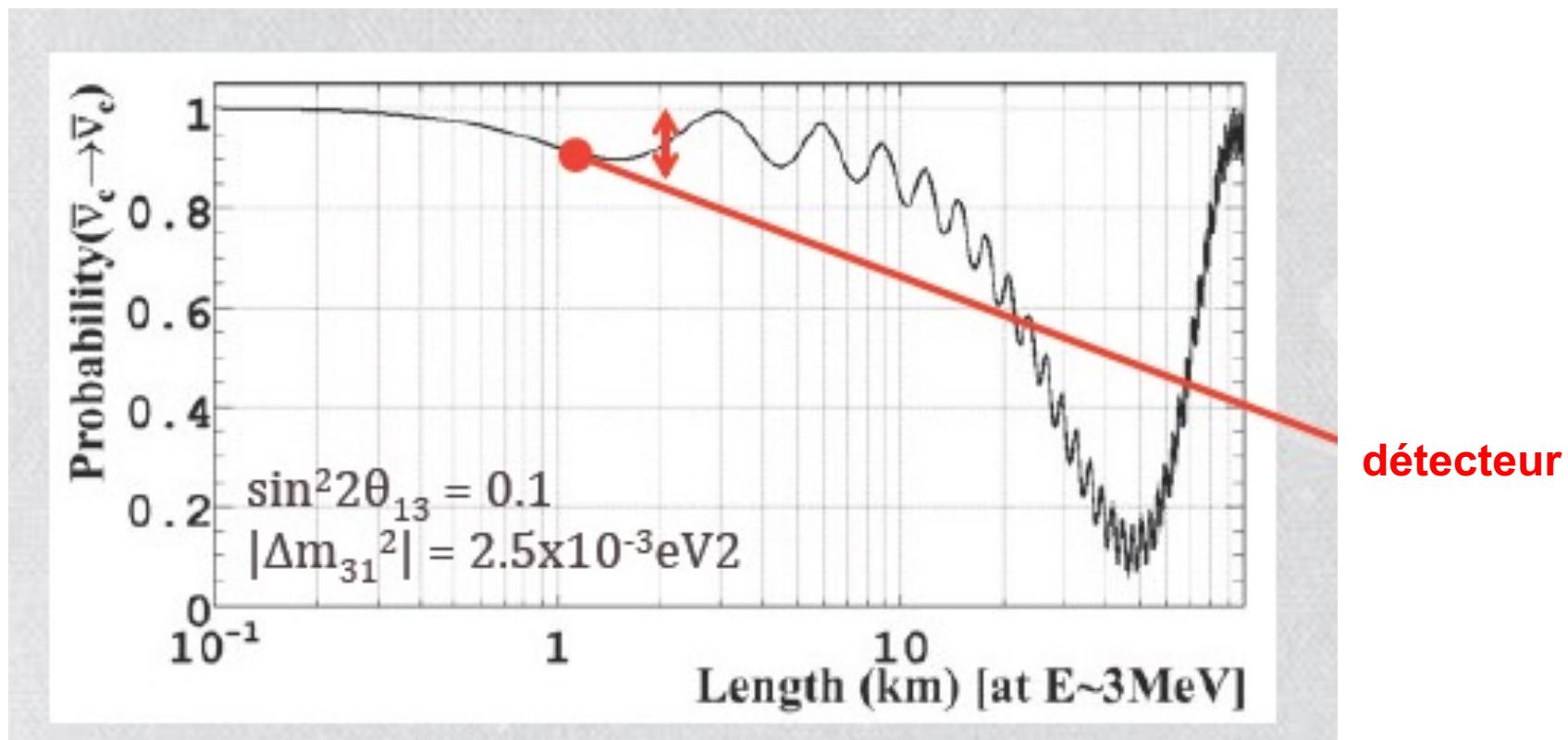
$$L/E \sim \lambda_{\text{osc}} (1.27 \times 2.5 \times 10^{-3} / \pi/2)^{-1} = 495 \text{ m/MeV}$$

$$E \sim 3 \text{ MeV en moyenne} \rightarrow L \sim 1500 \text{ m}$$

A cette distance, nous avons vu que nous sommes dans le domaine des oscillations courtes et que:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (1.27 \Delta m_{31}^2 L / E)$$

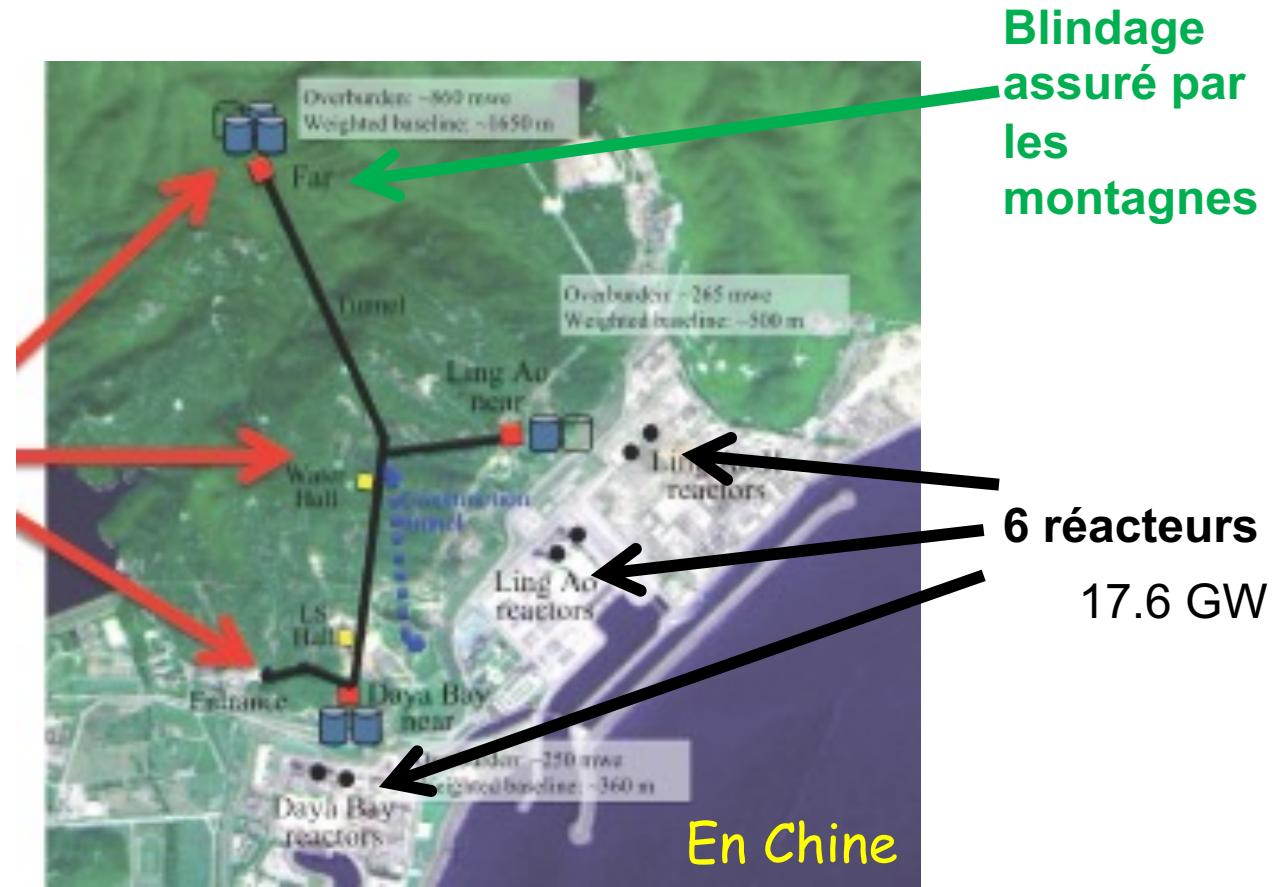
- IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs
 - La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$



IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à Daya Bay

1 x 4 détecteur éloignés (~1600 m)
2 x 2 détecteurs proches (~500 m)
pour mesurer les flux et diminuer les effets systématiques sur la détermination du flux initial.



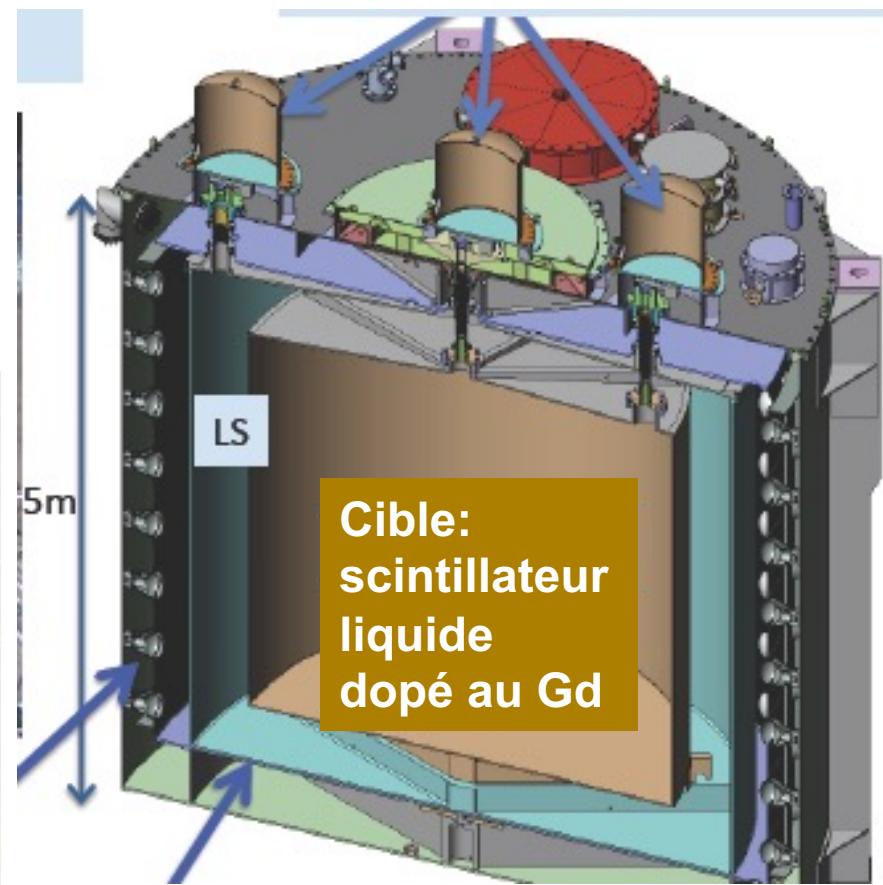
IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

- La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à Daya Bay

Les détecteurs.

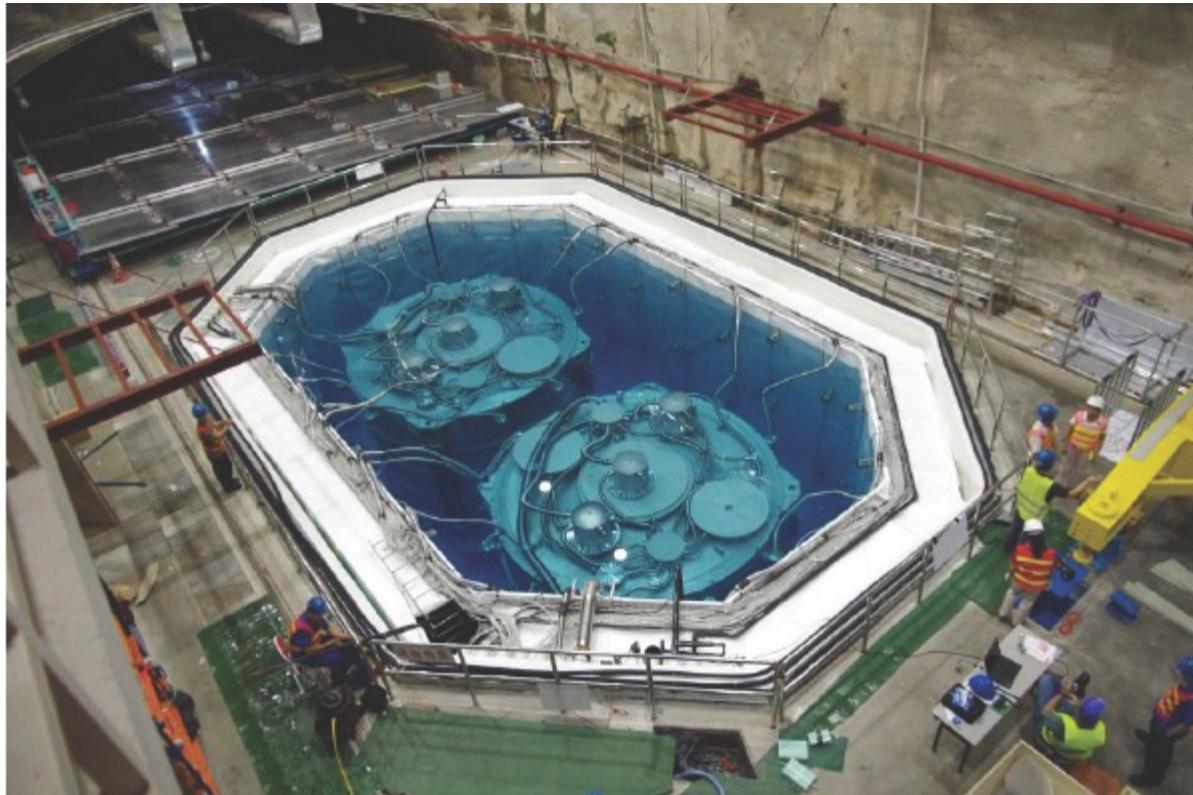


La cuve avec les PM



IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à Daya Bay



2 détecteurs identiques côté à côté → comparaison → étude des effets systématiques et diminution de leur influence sur le résultat.

IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à Daya Bay

Comparaison des taux de $\bar{\nu}_e$ mesurés dans les détecteurs éloignés (far) et proches (near):

$$R = \frac{\Phi_{\text{mesuré}}^{\text{far}}}{\Phi_{\text{attendu}}^{\text{far}}} = \frac{\Phi_{\text{mesuré}}^{\text{far}}}{\alpha\Phi_{\text{mesuré}}^{\text{near1}} + \beta\Phi_{\text{mesuré}}^{\text{near2}}}$$

où α et β sont des poids qui tiennent compte de la fraction de $\bar{\nu}_e$ observés dans les détecteurs proches qui devraient atteindre les détecteurs éloignés, en l'absence d'oscillations. Premiers résultats avec seulement 6 détecteurs, en 2012:

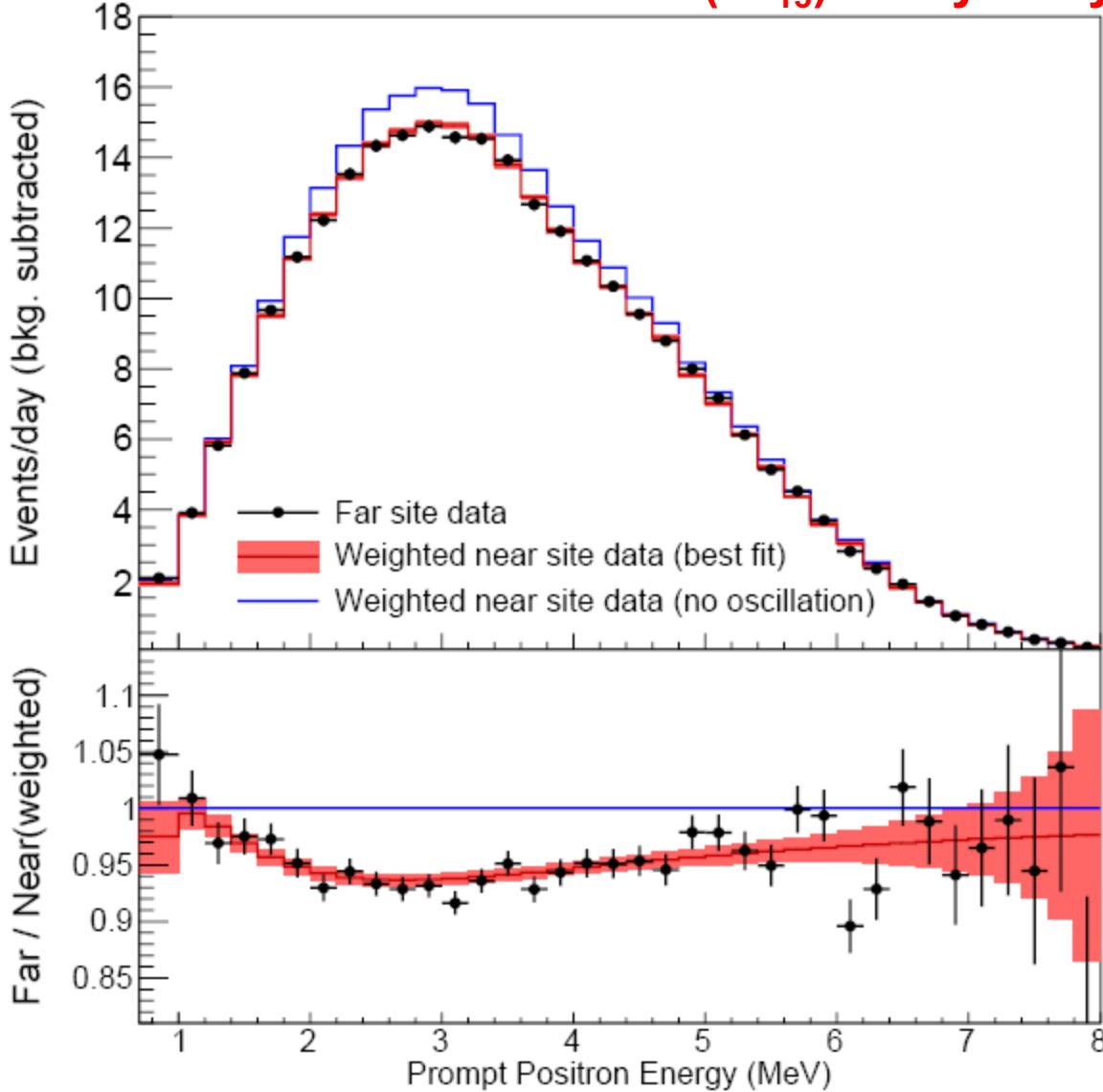
$$R = 0.944 \pm 0.007(\text{stat}) \pm 0.003(\text{syst}) \quad \text{arXiv:1210.6327 (2012)}$$

Clair déficit de $\bar{\nu}_e$ dans les détecteurs éloignés.

31

IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à Daya Bay



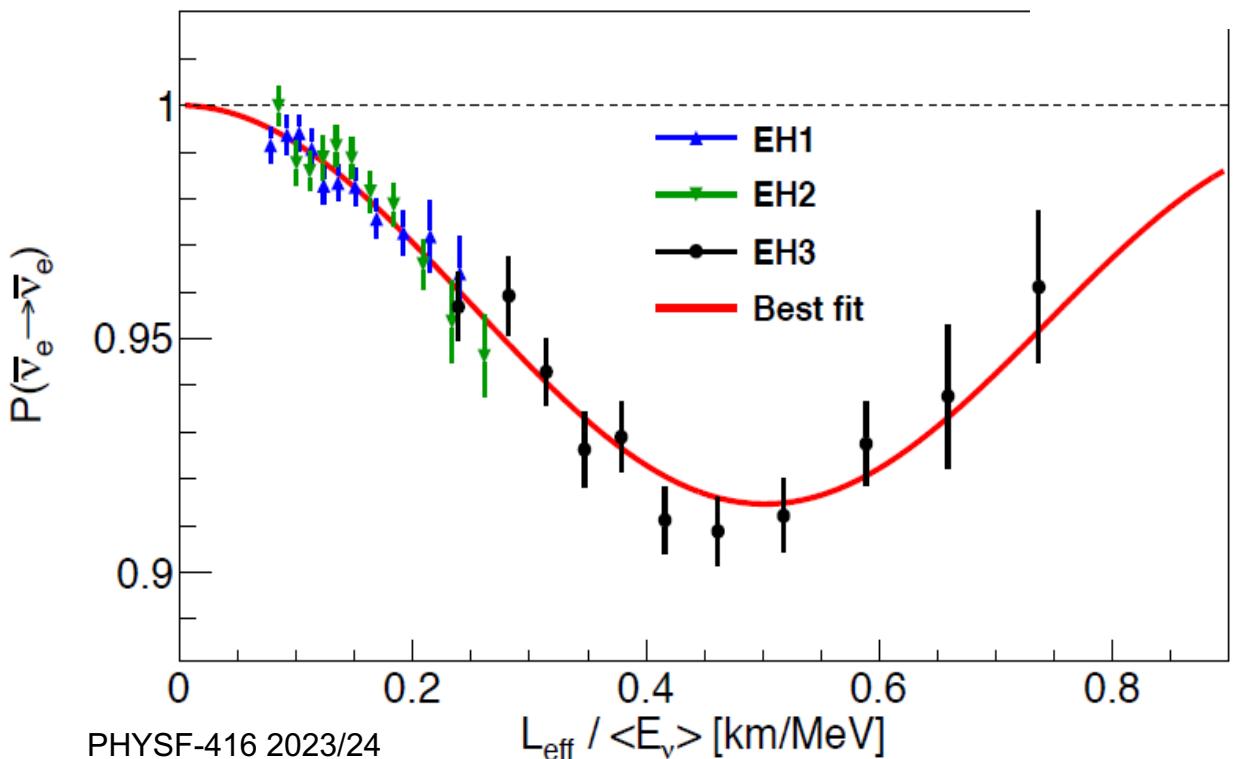
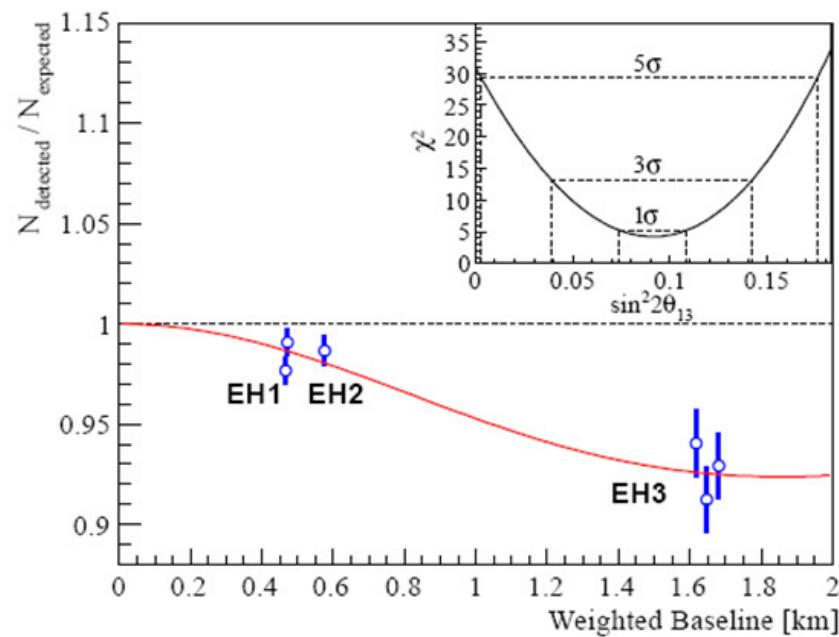
[arXiv:1501.04991v1](https://arxiv.org/abs/1501.04991v1) (2015)

De l'ordre de 600 événements.

La figure ci-contre permet d'observer la dépendance en E de la probabilité de disparition des $\bar{\nu}_e$

La courbe rouge correspond au meilleur fit pour $\sin^2(2\theta_{13})$

- La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$
- à Daya Bay



IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

- La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à Daya Bay

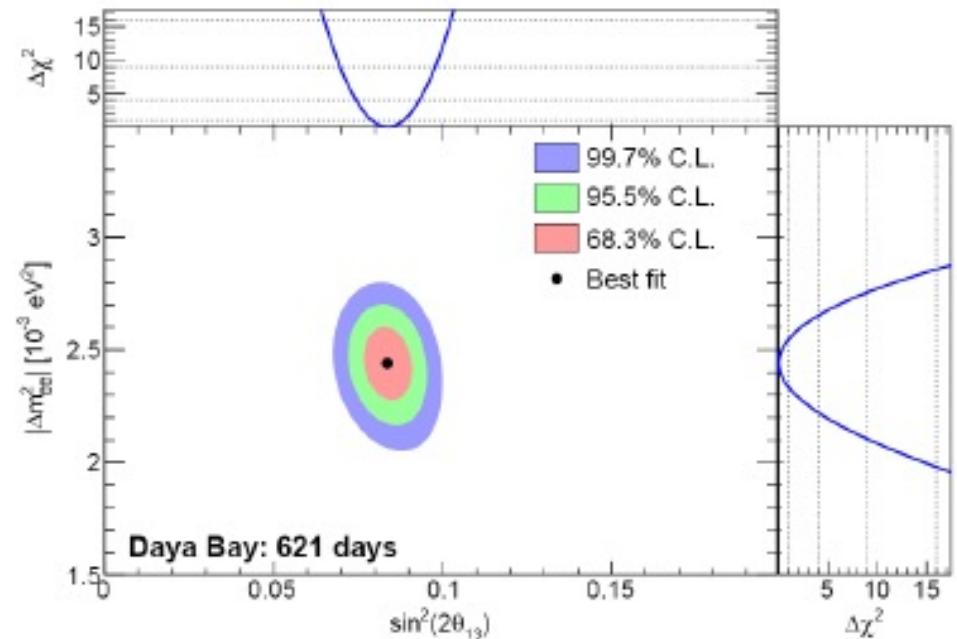
Les résultats de l'ajustement sur les données conduisent aux estimations de $\sin^2 2\theta_{13}$ et Δm^2_{13} si contre.

[arXiv:1501.04991v1](https://arxiv.org/abs/1501.04991v1) (2015)

$$\theta_{13} = (8.42 \pm 0.26)^\circ$$

$$\Delta m^2_{ee} = \cos^2 \theta_{12} \Delta m^2_{31} + \sin^2 \theta_{12} \Delta m^2_{32}$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m^2_{ee} L}{4E_\nu} + \mathcal{O}(\alpha^2)$$



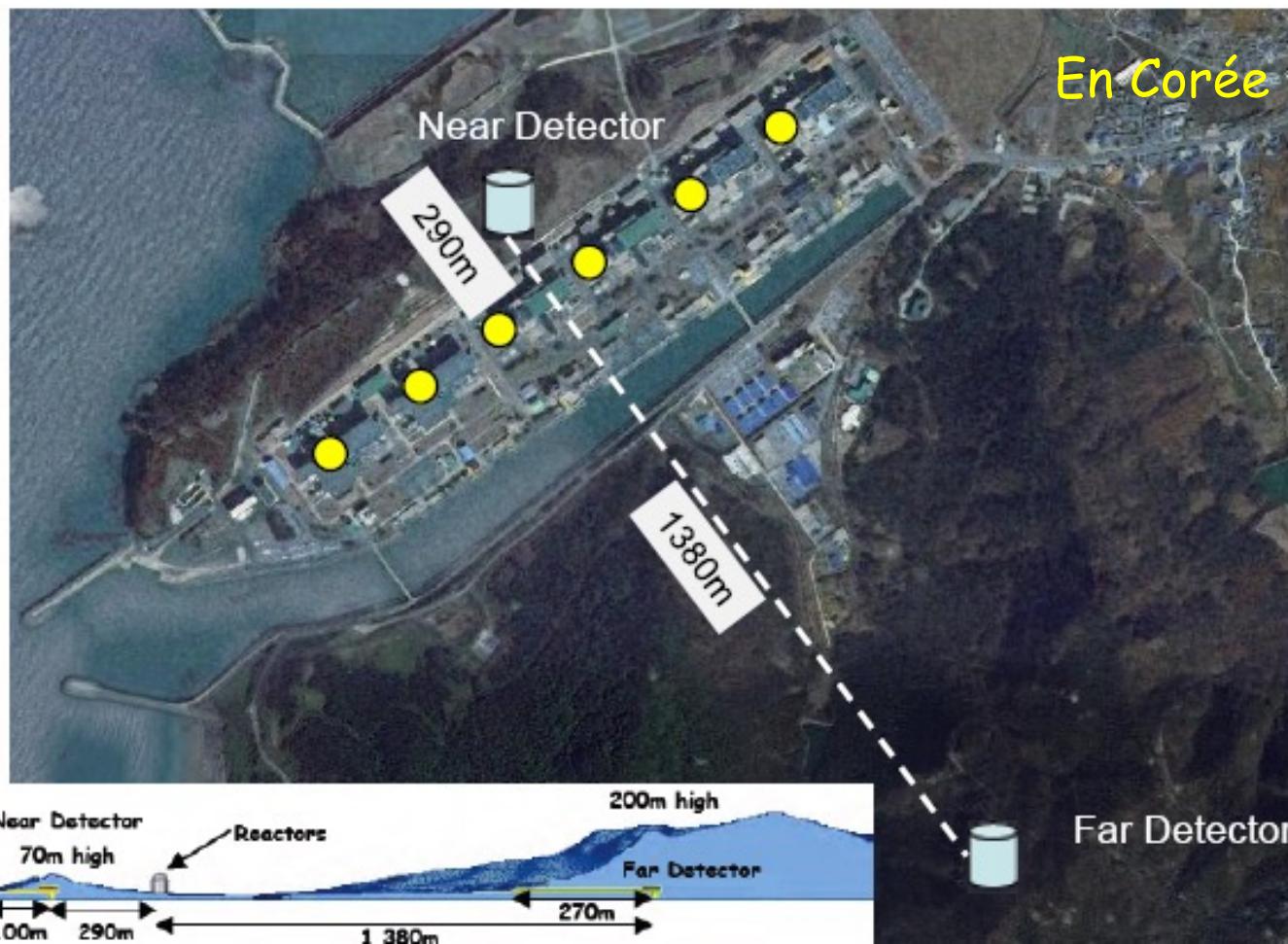
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.084^{+0.005}_{-0.005}$$

$$|\Delta m^2_{ee}| = 2.44^{+0.10}_{-0.11} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\chi^2/NDF = 134.7/146$$

IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à RENO



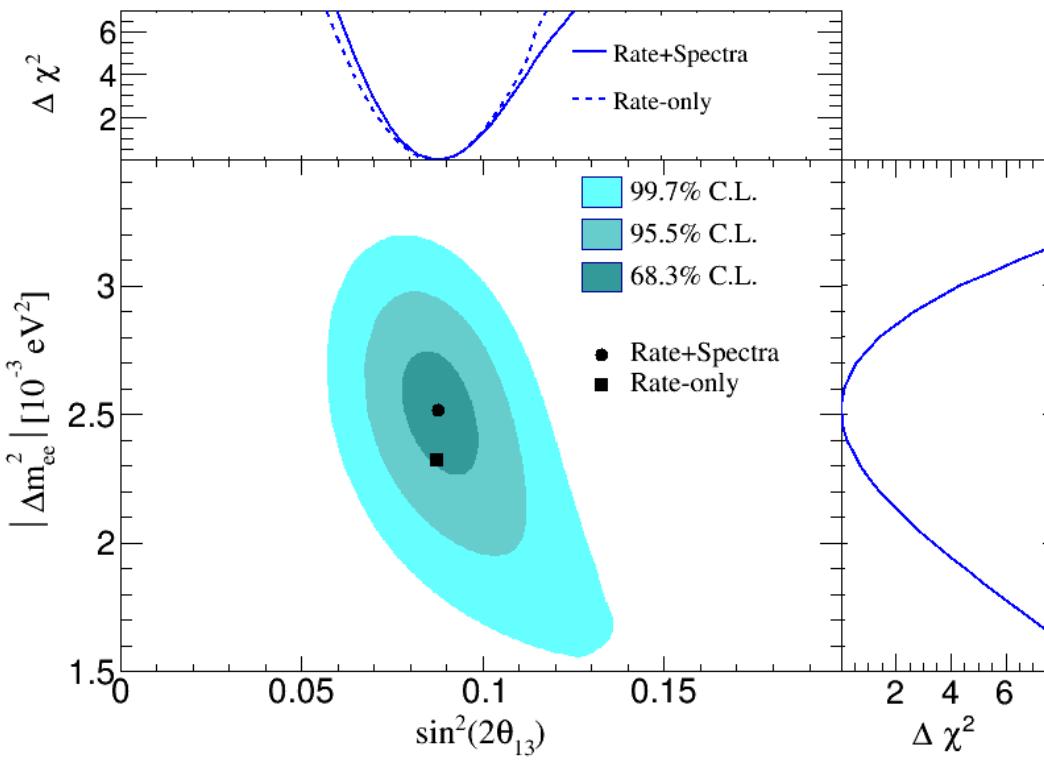
Même principe
(résultat moins
précis)

16.81 GW

IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à RENO

$$\Delta m_{ee} = [2.52 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.17(\text{syst})] \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$
$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0.088 \pm 0.008(\text{stat}) \pm 0.007(\text{syst})$$



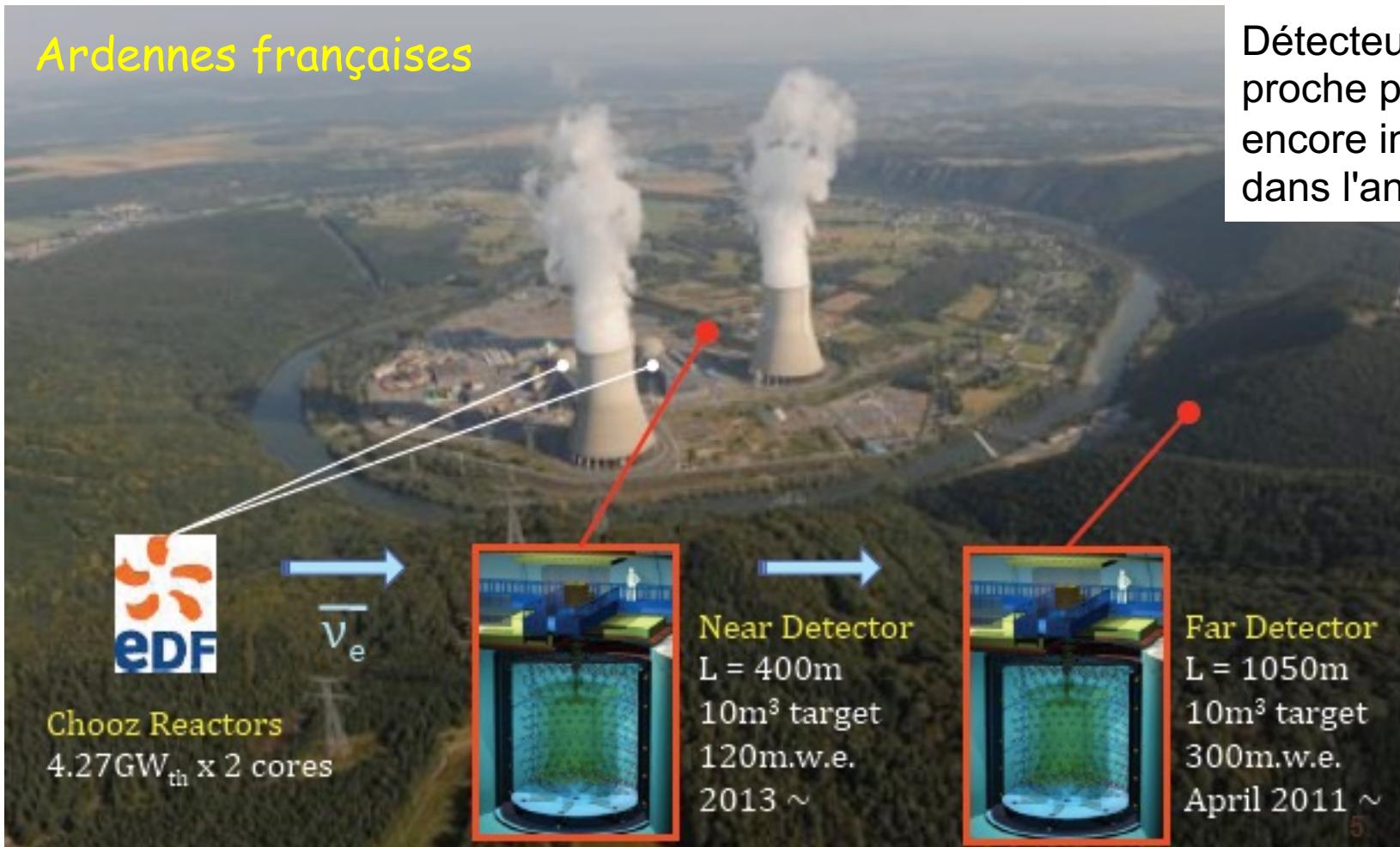
$$\theta_{13} = (8.63 \pm 0.57)^\circ$$

Neutrino 2015

Le résultat de Daya Bay
reste le plus précis

IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à Double CHOOZ



IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des réacteurs

□ La mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à Double CHOOZ

Leur résultat est actuellement le moins précis:

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0.090 +0.032/-0.029 \quad \text{Neutrino 2015}$$

mais en accord avec les autres mesures.

Nouveau résultat avec les données du détecteur proche, opérationnel depuis fin 2014:

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0.119 \pm 0.016 \quad \text{CERN seminar 2016}$$

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0.102 \pm 0.012 \quad \text{Neutrino 2020 (avec l'ensemble des données des deux détecteurs)}$$

Double Chooz

Nature Physics (2020) TnC
 PRELIMINARY Nu2020 TnC

Daya Bay

PRL 121 241805 (2018) n-Gd
 PRD 93 072011 (2016) n-H

RENO

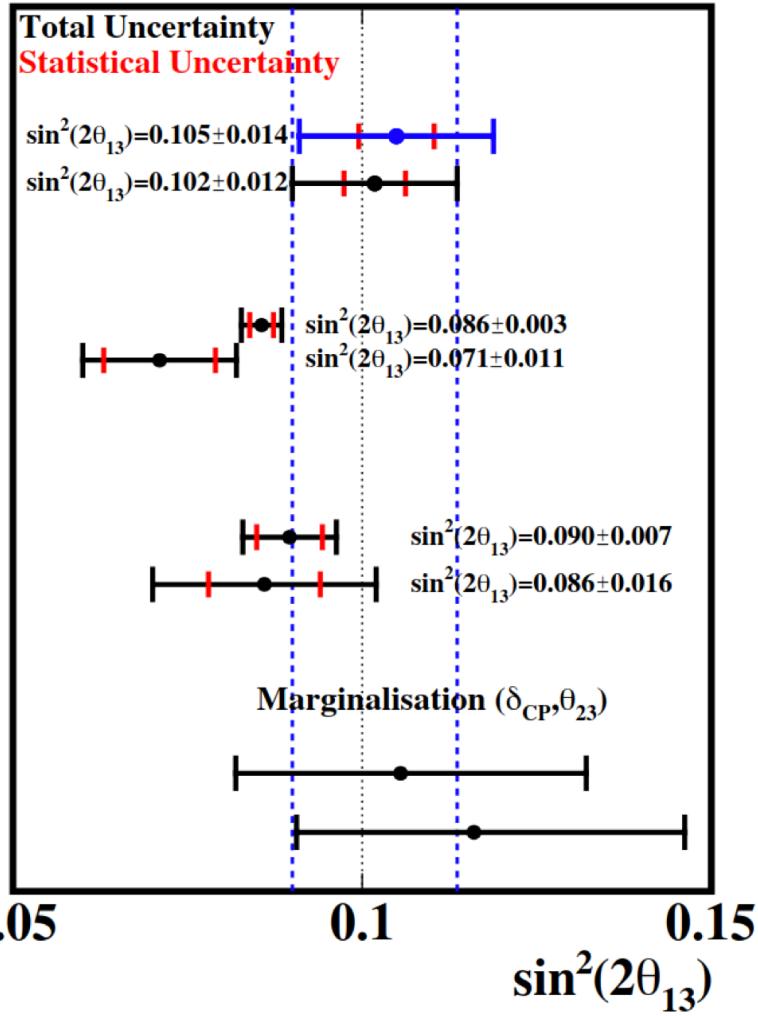
PRL 121 201801 (2018) n-Gd
 JHEP 04 029 (2020) n-H

T2K

PRD 96, 092006 (2017)

$$\Delta m_{32}^2 > 0$$

$$\Delta m_{32}^2 < 0$$



On peut conclure que $\sin^2(2\theta_{13})$ n'est pas nul.

La connaissance de sa valeur est utilisée pour mettre au point de nouvelles expériences conçues pour mettre en évidence et mesurer la phase complexe δ .

Chapitre IX: Oscillations de neutrinos - Sources artificielles

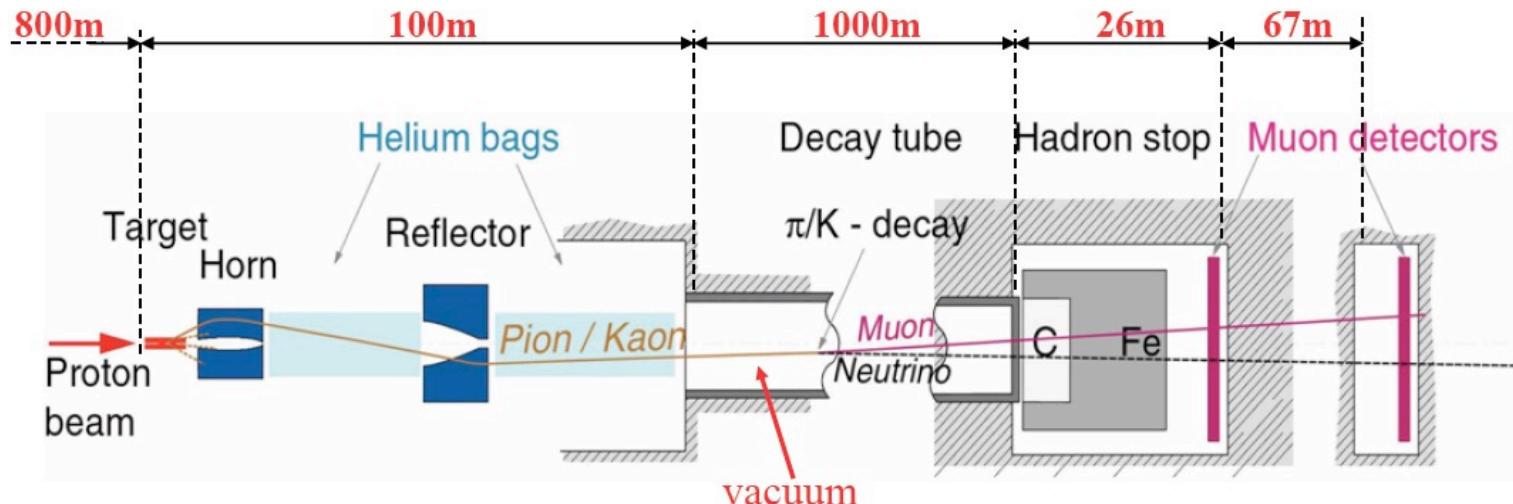
■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

Les expériences auprès des réacteurs ont permis de vérifier les résultats obtenus avec les ν_e solaires (avec des $\bar{\nu}_e$), en l'absence de biais éventuels dus au modèle astronomique et aux corrections dues à la traversée d'une grande quantité de matière. En outre, en se plaçant dans un domaine de E/L adéquat, la précision sur Δm^2_{21} et $\sin^2(2\theta_{12})$ a été augmentée sensiblement. Mais le résultat le plus marquant est qu'il a été possible de mesurer $\sin^2(2\theta_{13})$ et de montrer qu'il est non nul.

Les expériences d'oscillations auprès des accélérateurs qui produisent des faisceaux de ν_μ ou de $\bar{\nu}_\mu$, ont permis de réaliser l'équivalent pour les résultats obtenus avec des ν atmosphériques.

■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

Exemple: le faisceau de ν_μ du CERN (dirigé vers le Gran Sasso, It.)



Production (rappel):

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu / \bar{\nu}_\mu \quad \sim 64\%$$

$$K^\pm \rightarrow \pi^0 + e^\pm + \bar{\nu}_e / \nu_e \quad \sim 5\%$$

$$K^\pm \rightarrow \pi^0 + \mu^\pm + \nu_\mu / \bar{\nu}_\mu \quad \sim 3\%$$

Contaminations d'un faisceau de ν_μ :

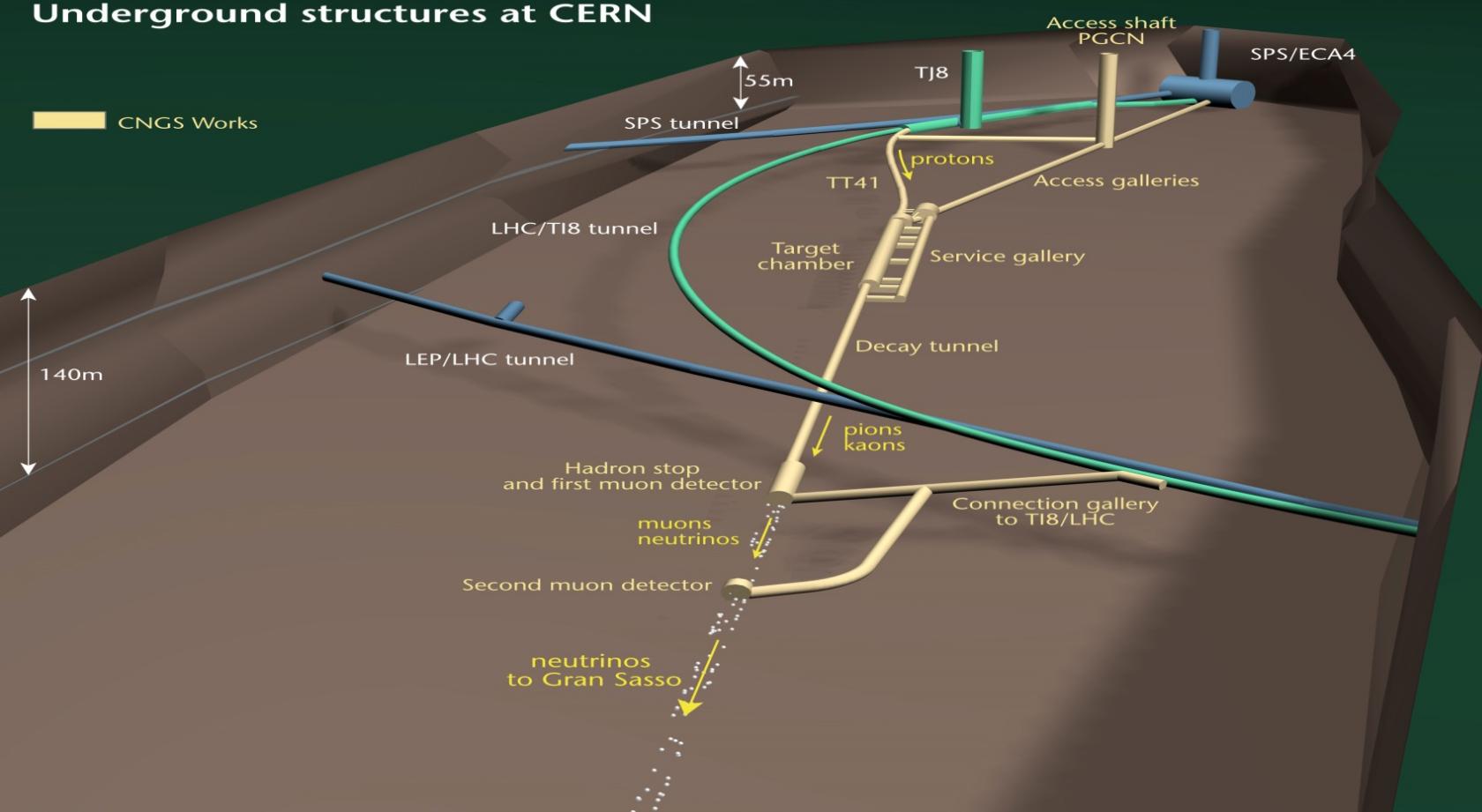
$$\bar{\nu}_\mu \sim 5\%$$

$$\nu_e + \bar{\nu}_e \sim 1\%$$

$$\begin{cases} \bar{\nu}_\mu \sim 5\% \\ \nu_e + \bar{\nu}_e \sim 1\% \\ \nu_\tau \text{ negligible} \end{cases}$$

■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

CERN NEUTRINOS TO GRAN SASSO
Underground structures at CERN



■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

Remarque importante :

L'énergie des ν produits par les accélérateurs est plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle des ν produits par les réacteurs:

$E \geq 1\text{GeV} \rightarrow$ Pour être sensible à $\Delta m_{32}^2 \approx 2 \cdot 10^{-3} eV^2$,

il faut une distance L de l'ordre de 500 km ! (voir slide 26)

4 expériences dites "Long Base Line", construites suivant ce schéma:

K2K (KEK TO Kamioka) - 1999 à 2004 - 250 km

T2K (TOKAI TO Kamioka) - depuis 2011 - 295 km

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

MINOS (FermiLab - mine Soudan) - depuis 2006 - 735 km

OPERA (CERN - Gran Sasso) - de 2008 à 2012- 730 km

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$

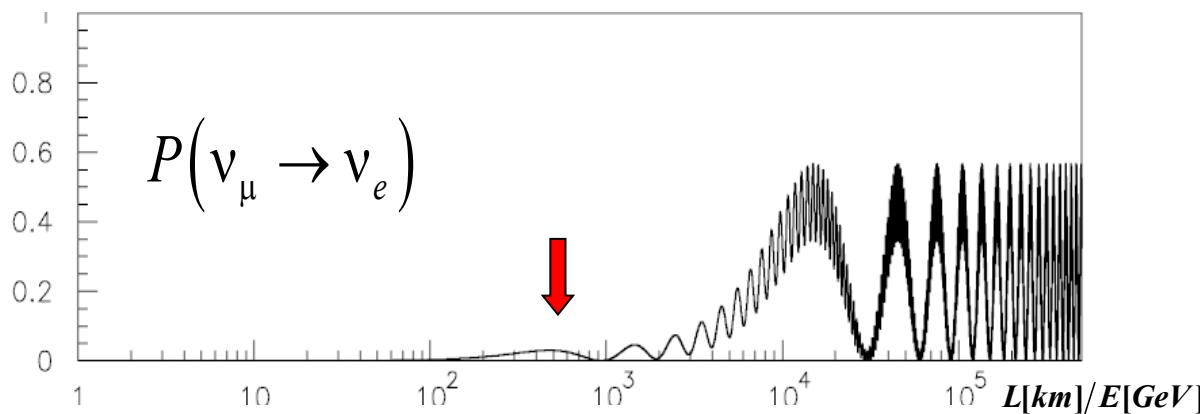
$$L_{\text{osc}}^{\text{long}} [\text{km}] = 2.47 \frac{E [\text{GeV}]}{\Delta m_{21}^2 [eV^2]} \approx \frac{2.47}{7.5 \cdot 10^{-5}} \approx 3 \cdot 10^4 \text{ km}$$

$$L_{\text{osc}}^{\text{court}} [\text{km}] = 2.47 \frac{E [\text{GeV}]}{\Delta m_{31}^2 [eV^2]} \approx \frac{2.47}{2.5 \cdot 10^{-3}} \approx 10^3 \text{ km}$$

IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

T2K:

A partir d'un faisceau de ν_μ , cette expérience a été la première à observer non plus des disparitions mais l'apparition de ν_e :

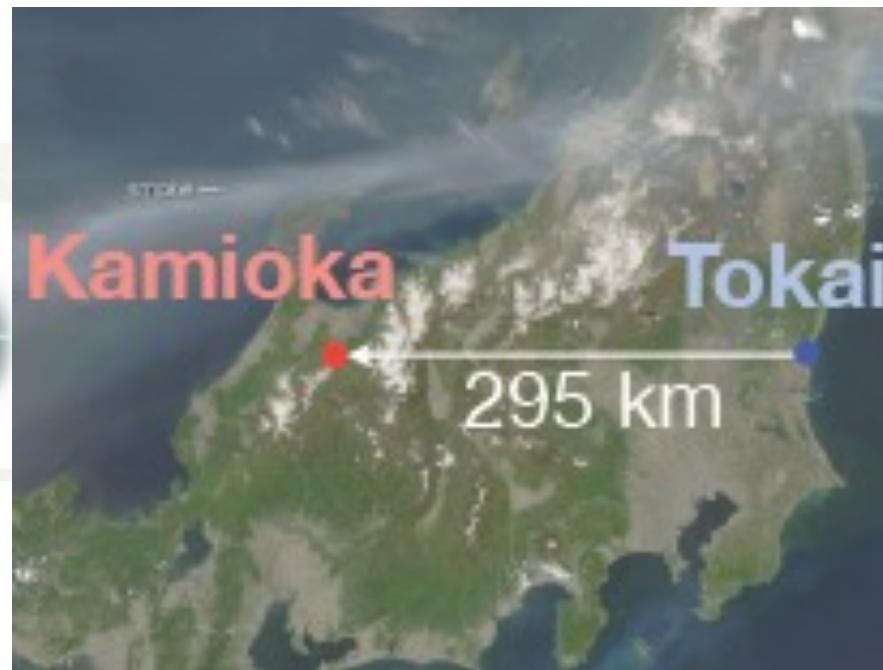
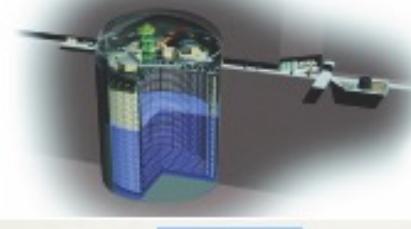


Vu la faiblesse du signal, il est primordial de se placer au maximum d'amplitude et d'ajuster L/E au mieux.

■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

□ T2K:

Super-K@Kamioka



J-PARC Accelerator@Tokai

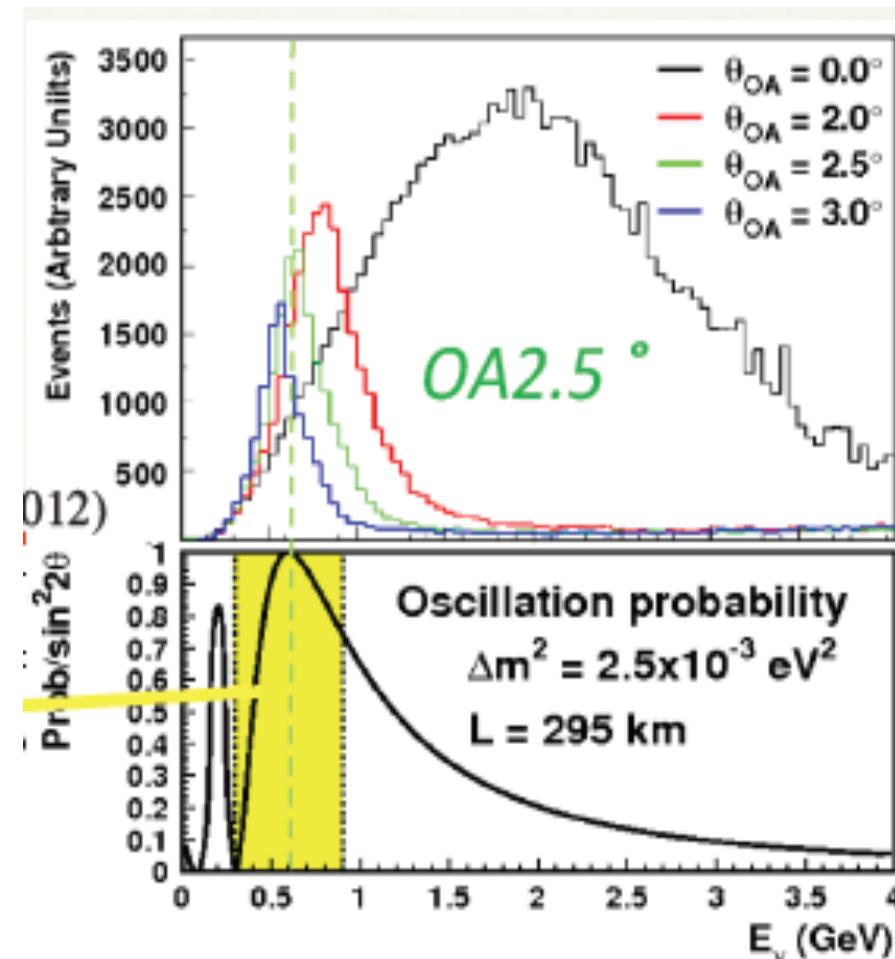


$$\left. \begin{array}{l} L/E \sim 495 \text{ km/GeV} \\ L = 295 \text{ km} \end{array} \right\} \Rightarrow E_{\text{optimum}} \approx 0.6 \text{ GeV}$$

IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

□ T2K:

Le spectre d'énergie des ν_μ de l'accélérateur a une probabilité maximum à 2 GeV (histo en noir). En inclinant le faisceau d'un angle de θ_{OA} , les pions les plus énergétiques sont défocalisés et le maximum peut être ajusté à la valeur qui rend la probabilité d'oscillations maximum et qui limite le spectre à la zone d'intérêt (nouvelle technique) .



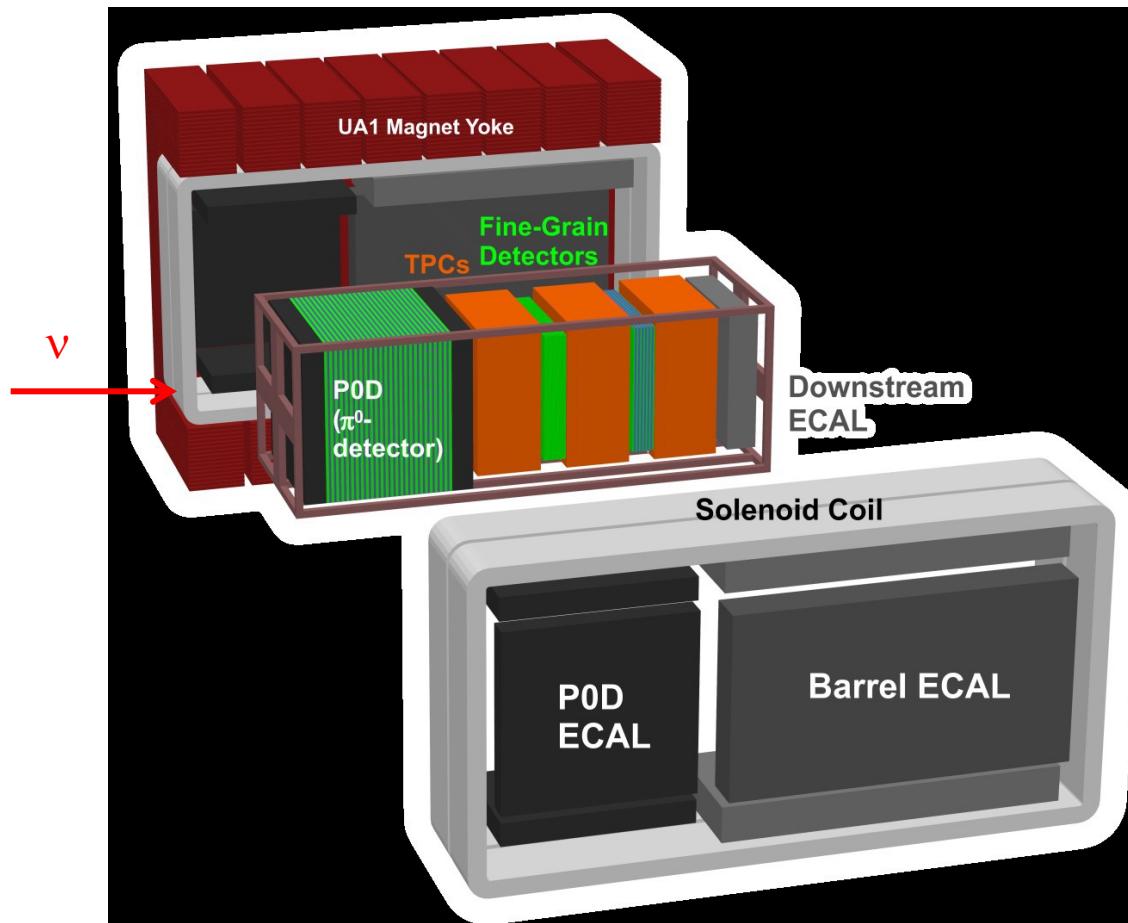
OA: Off Axis

■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

□ T2K:

En plus du détecteur situé à 295 km, Super-K, décrit précédemment, il y a un détecteur placé à 280 m de la production des ν_μ , ND280, chargé de mesurer le flux de ν_μ et de ν_e du faisceau, ainsi que leur spectre d'énergie et leur direction.

Fine-grain detector = scintillator trackers
Primary neutrino target



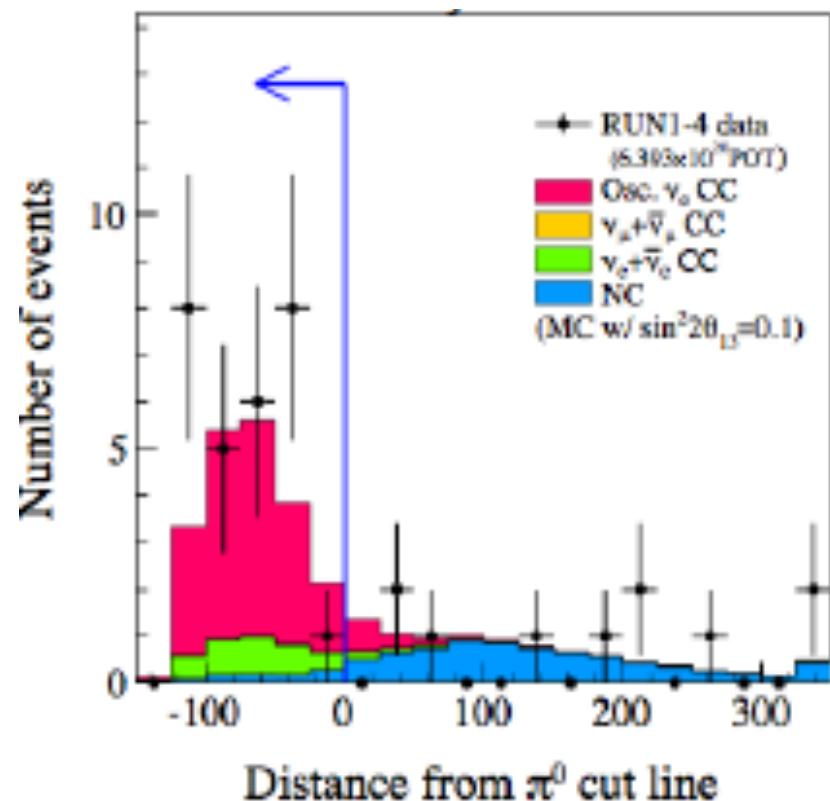
■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

□ T2K:

Après soustraction des bruits de fond (4.6 ± 0.5), ils observent 28 interactions de ν_e , ce qui constitue une évidence d'oscillations:

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

Phys. Rev. Lett. 112, 061802,
February 2014



■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

□ T2K

Ils en tirent une valeur pour $\sin^2(2\theta_{13})$. Toutefois comme

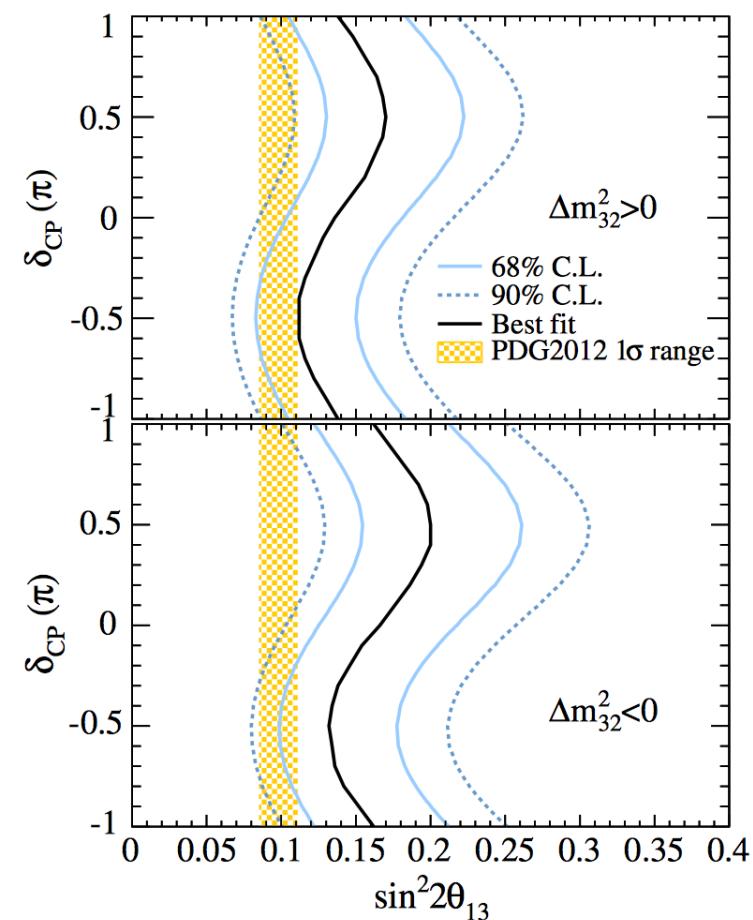
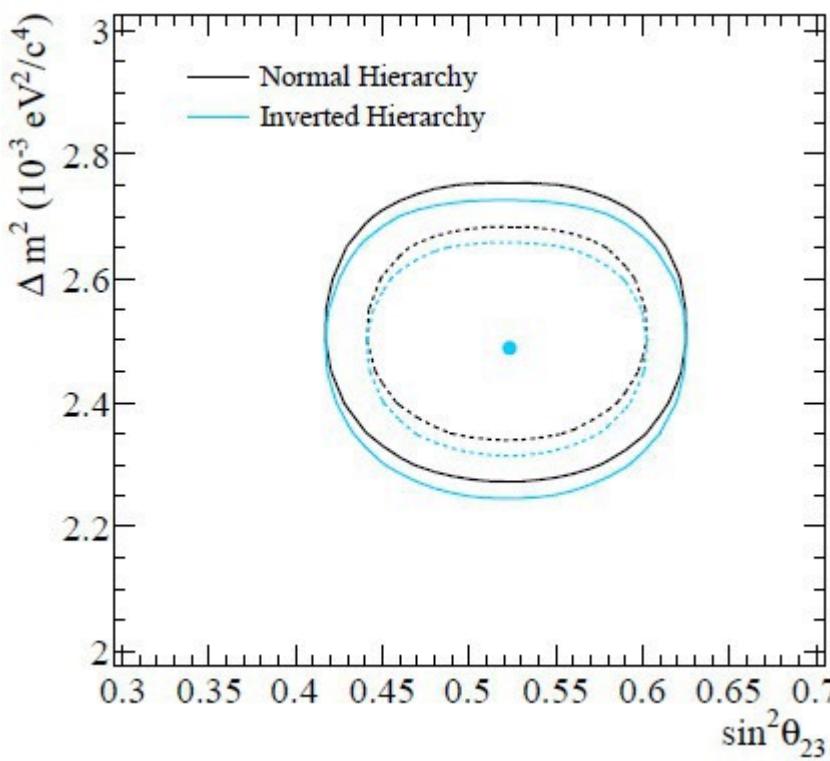
$$\begin{aligned} P_{\mu e} &= 4 \left| U_{e3} \right|^2 \left| U_{\mu 3} \right|^2 \sin^2 1.27 \frac{\Delta m_{31}^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]} \\ &= 4 \sin^2(\theta_{13}) \cos^2(\theta_{13}) \cos^2(\theta_{23}) \sin^2 1.27 \frac{\Delta m_{31}^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]} \\ &= \sin^2(2\theta_{13}) \cos^2(\theta_{23}) \sin^2 1.27 \frac{\Delta m_{31}^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]} \end{aligned}$$

la valeur déterminée, dépend de celles de Δm_{31}^2 , de θ_{23} et de l'hypothèse faite, $\delta = 0$.

■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

□ T2K

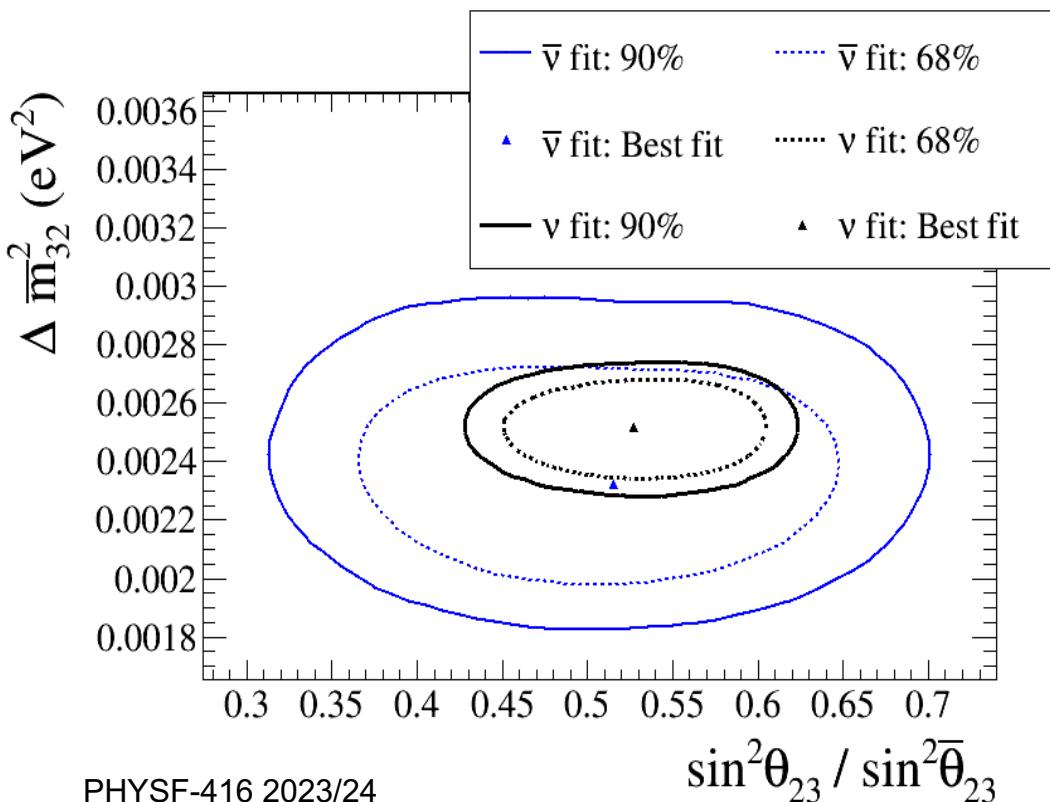
En utilisant simultanément les spectres d'énergie des ν_μ et des ν_e , ils obtiennent:



IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

T2K:

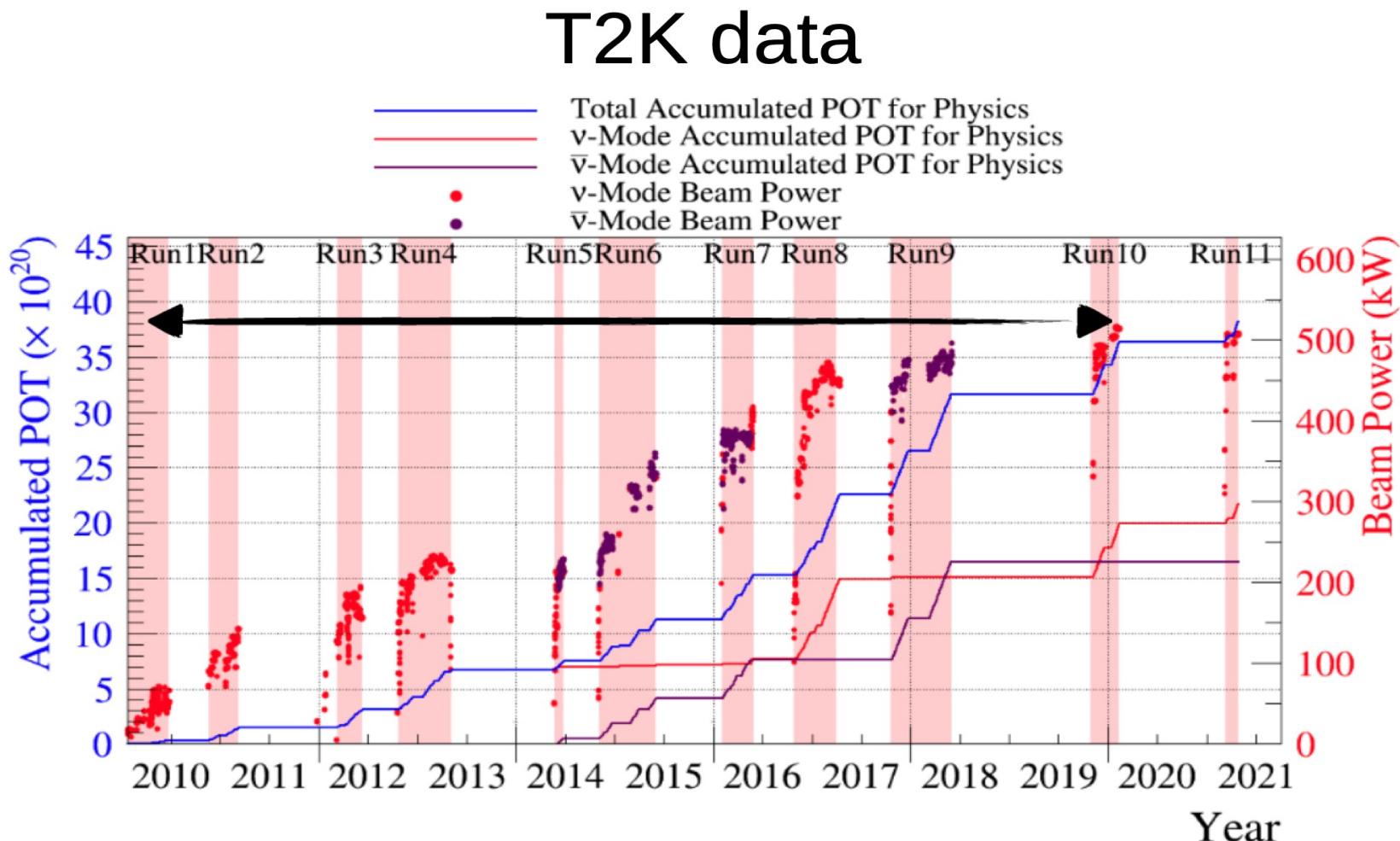
Ils sont les premiers à observer la disparition des $\bar{\nu}_\mu$ et à calculer les paramètres correspondants:



La précision obtenue est encore bien moindre que pour les ν mais les valeurs pour les $\bar{\nu}$ et les ν sont en accord.

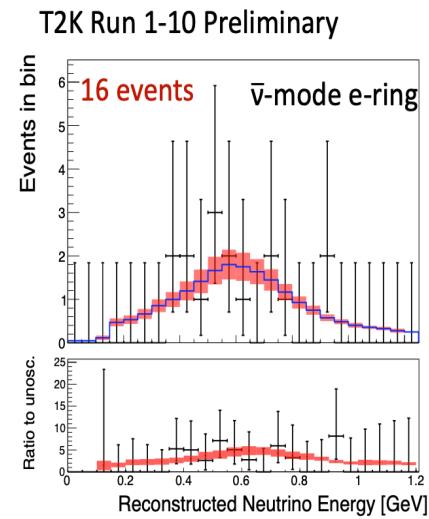
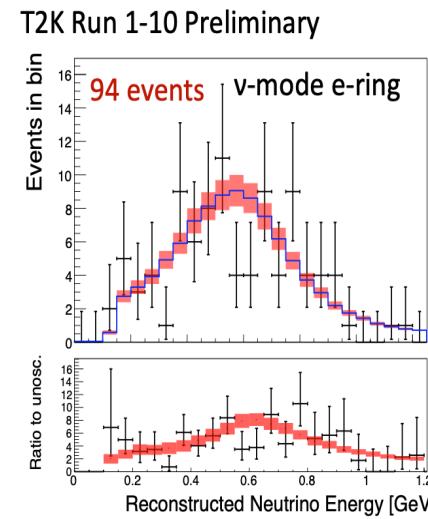
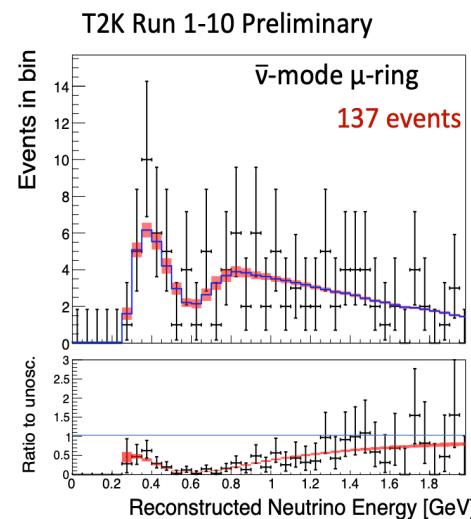
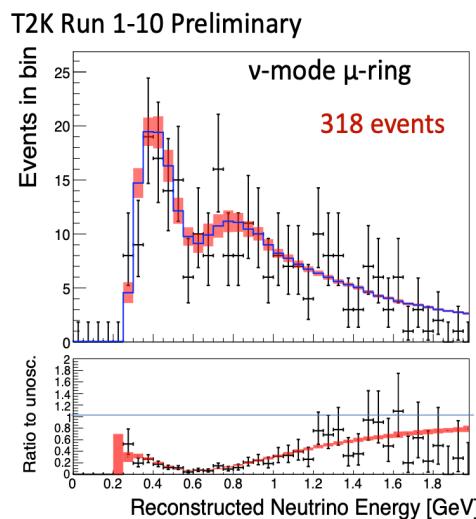
IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

Derniers résultats de T2K (run1 à run10)



IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

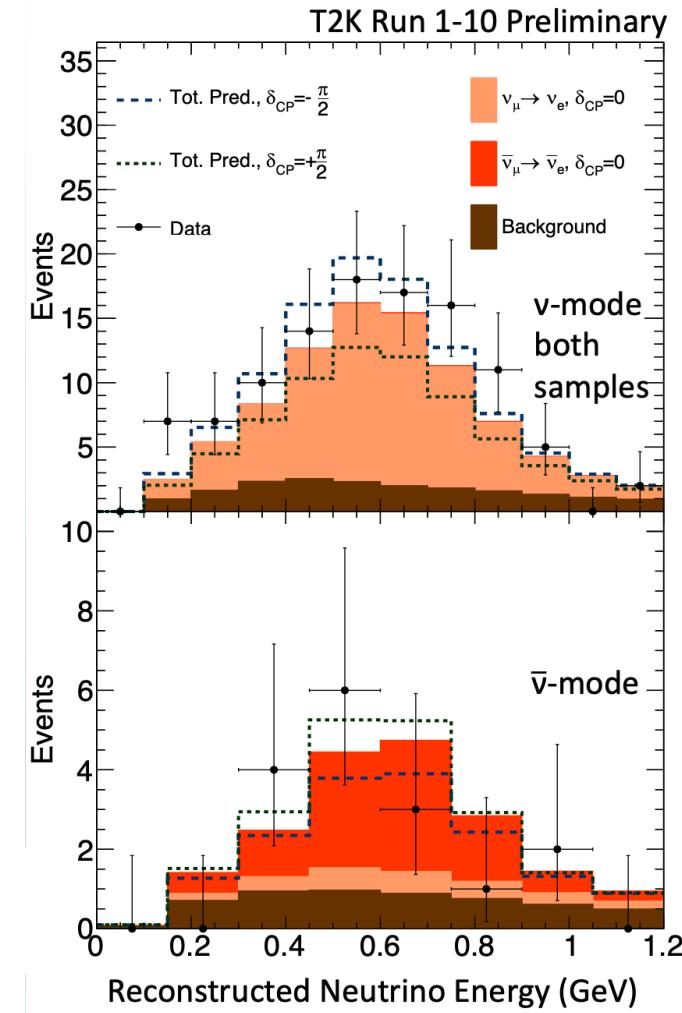
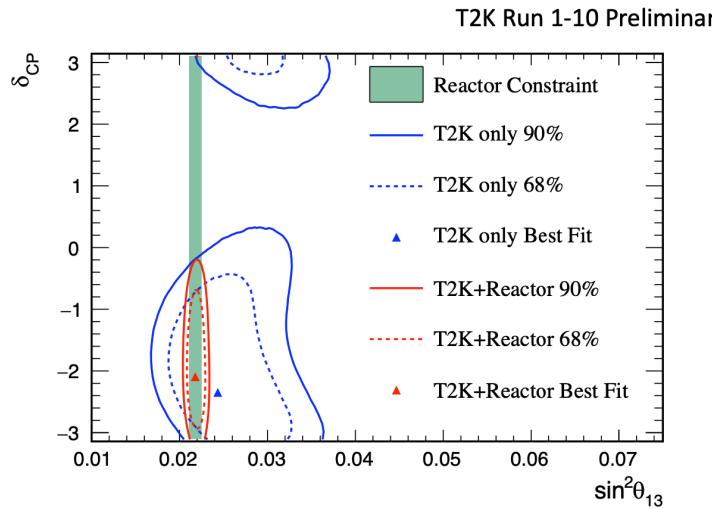
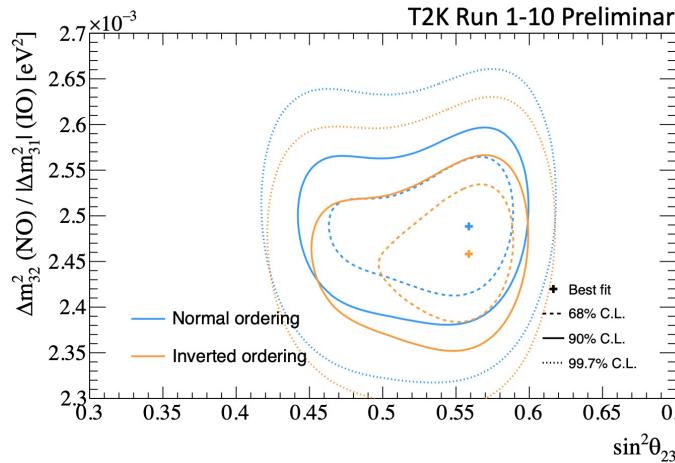
Derniers résultats de T2K (conference Neutrino 2020)



Bande rouge : erreur systématique sur le flux
(3% pour les neutrinos et 4% pour les antineutrinos)

IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

Neutrino 2020



IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

T2K future and beyond

- T2K phase II → 2023-2026
 - neutrino beam upgrade
 - ND280 near detector upgrade
 - Super-Kamiokande + Gd
- Hyper-Kamiokande → 2027-
 - upgraded beamline and near detectors of T2K-II
 - Hyper-Kamiokande (HyperK, HK) far detector
 - (Intermediate Water Cherenkov Detector, IWCD)

■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

□ OPERA:

Principale motivation:

- presque toutes les évidences d'oscillations reposent sur la disparition de la saveur émise par la source.
- SNO observe implicitement l'apparition, en mesurant le flux solaire total

$$(\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau)$$

- à l'époque, aucune expérience n'avait encore observé l'apparition de ν_β dans un faisceau de ν_α via $\nu_\beta + N \rightarrow l_\beta^- + X$ où ν_β est identifié grâce à l'identification du lepton chargé l_β^- .

But:

Confirmer les oscillations $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ (Super-K, K2K, MINOS, CHOOZ).

Observer $\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X$ dans un faisceau de ν_μ pur.

■ IX.2. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

□ OPERA:



Identification des τ^-

$$\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X \quad \tau^- \rightarrow \begin{cases} e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e \\ \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu \\ h^-(\pi^0) \nu_\tau \\ \pi^- \pi^- \pi^+ (\pi^0) \nu_\tau \end{cases}$$

Deux difficultés

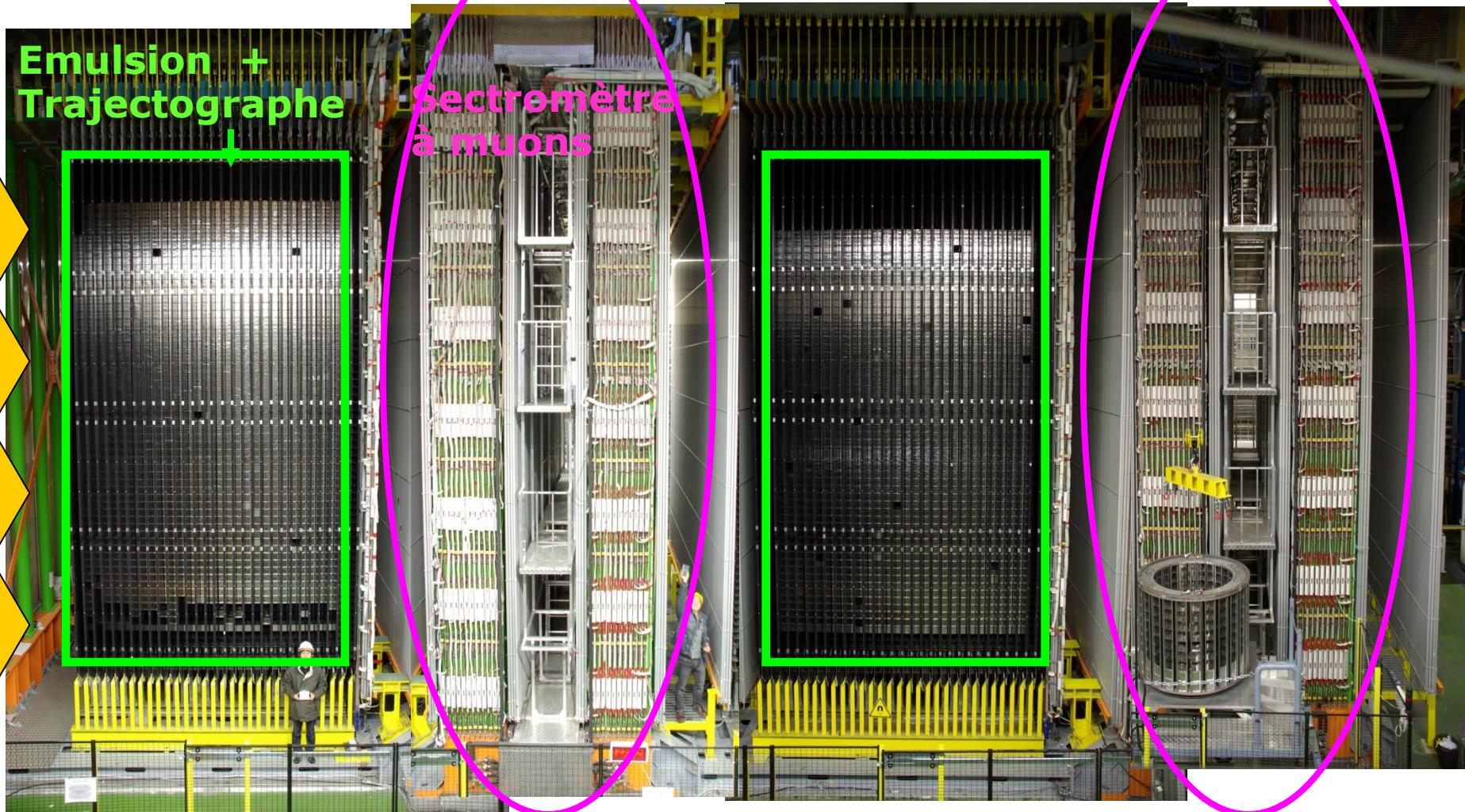
- σ_ν très petite \Rightarrow 10 – 20 interactions de ν_μ par jour et par kton de cible
- Temps de vie du τ^- très petit : $c\tau_\tau = 87 \mu m$
 \Rightarrow parcours moyen des $\tau^- \approx 0.5 - 1 mm$

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)

L'expérience commence à prendre des données en 2008 jusqu'en 2012

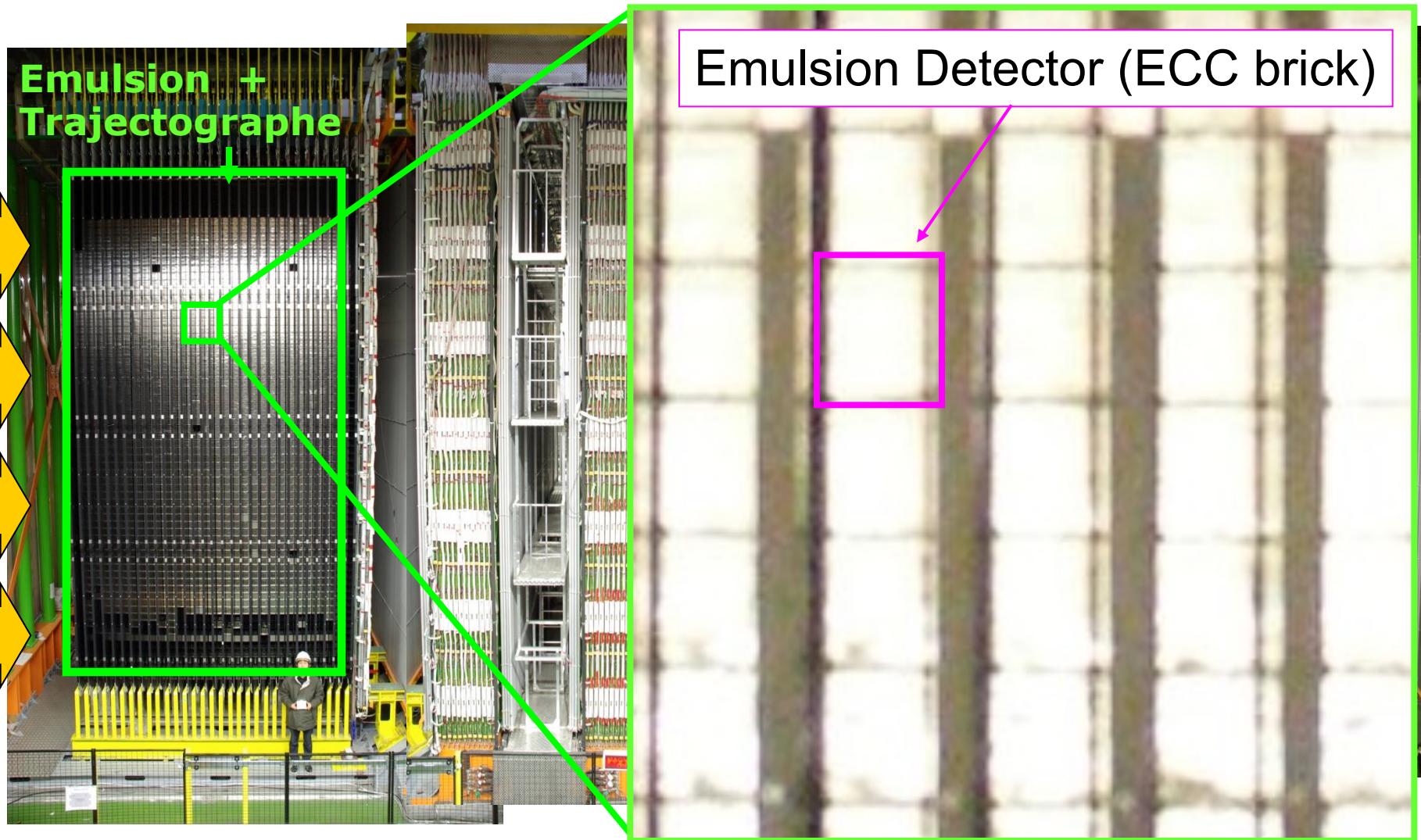
Le détecteur OPERA

@ Gran Sasso(1400m sous terre)



Le détecteur OPERA

@ Gran Sasso(1400m sous terre)

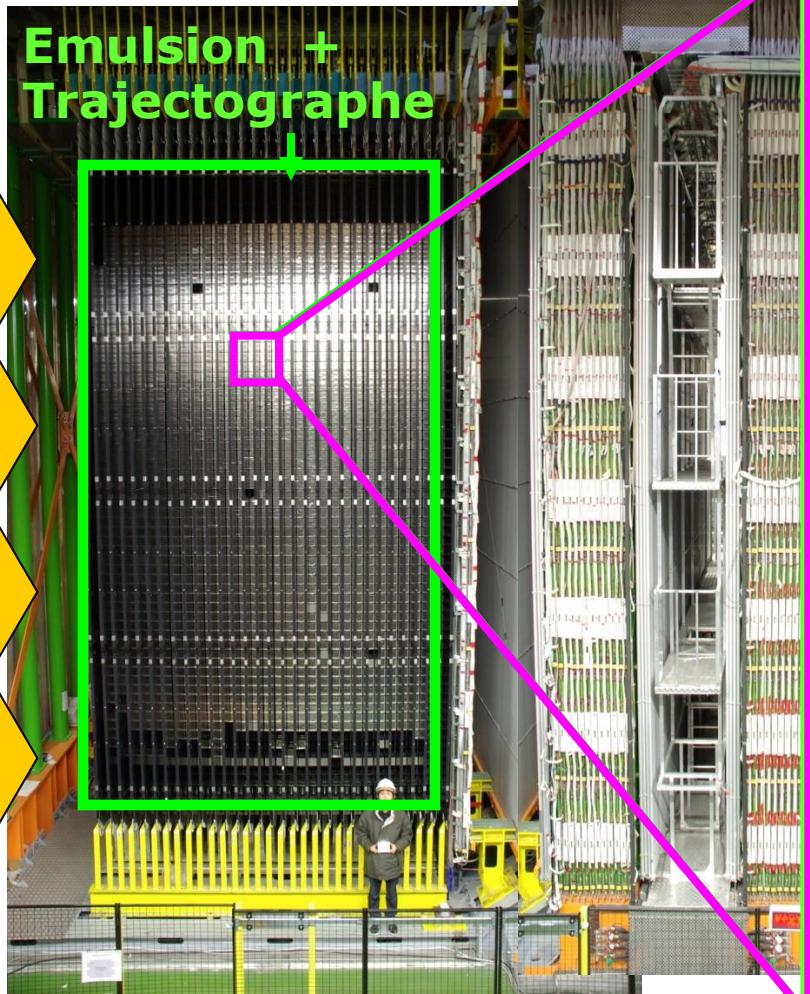


1.25 kton = 150 000 ECC briques

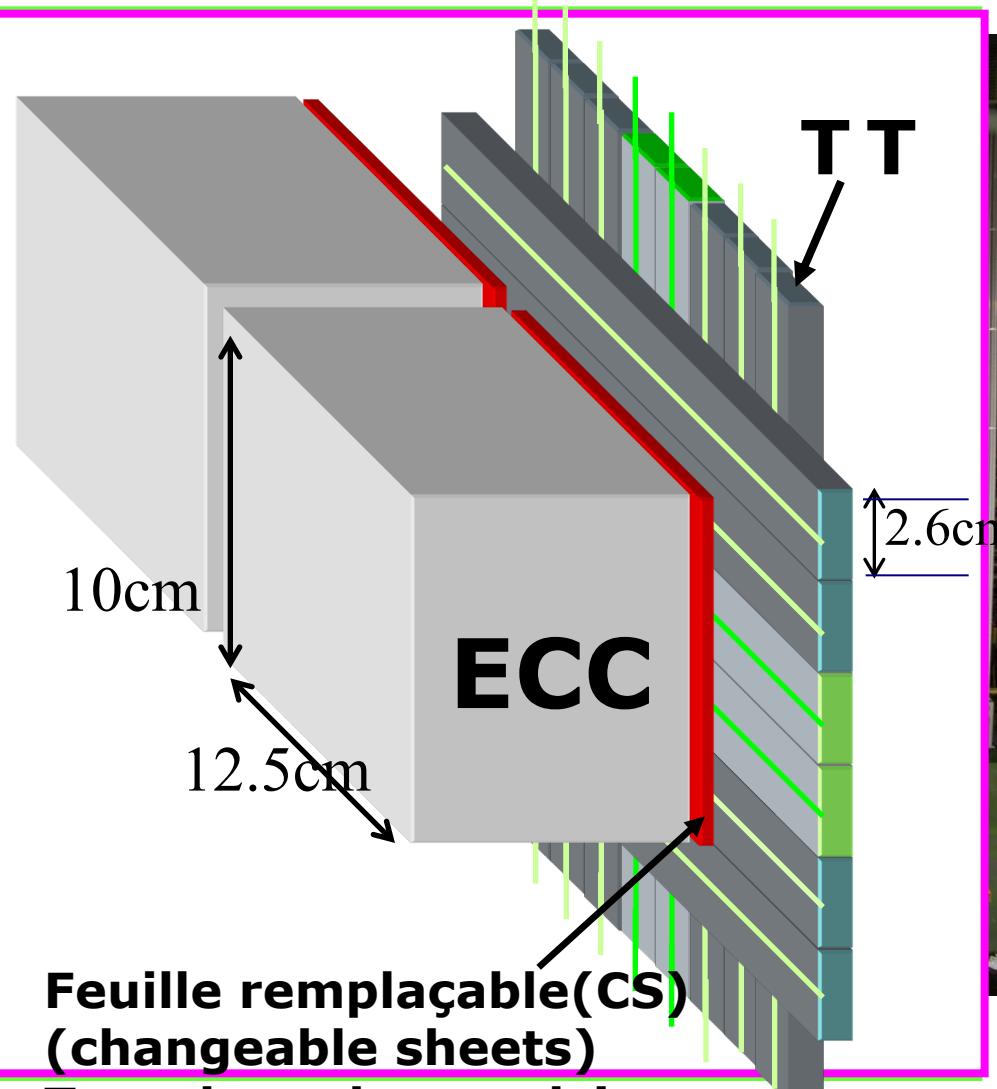
TT = target tracker
ECC = emulsion cloud chamber
(old name)

Le détecteur OPERA

@ Gran Sasso(1400m sous terre)



1.25 kton \approx 150 000 ECC briques



Feuille remplaçable(CS)
(changeable sheets)
To reduce the emulsion
scanning load

■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

□ OPERA:

Cible: 150000 briques assemblées en murs instrumenté par le trajectographe.

Chaque brique: $\left\{ \begin{array}{l} 56 \text{ plaques de Pb de } 1-mm \\ \text{ intercalées avec} \\ 57 \text{ films d'émulsion nucléaire avec une resolution} \\ \Delta_x \approx 0.3\mu\text{m} \quad \Delta\theta \approx 1\text{mrad} \end{array} \right.$

Nombres d'événements attendus

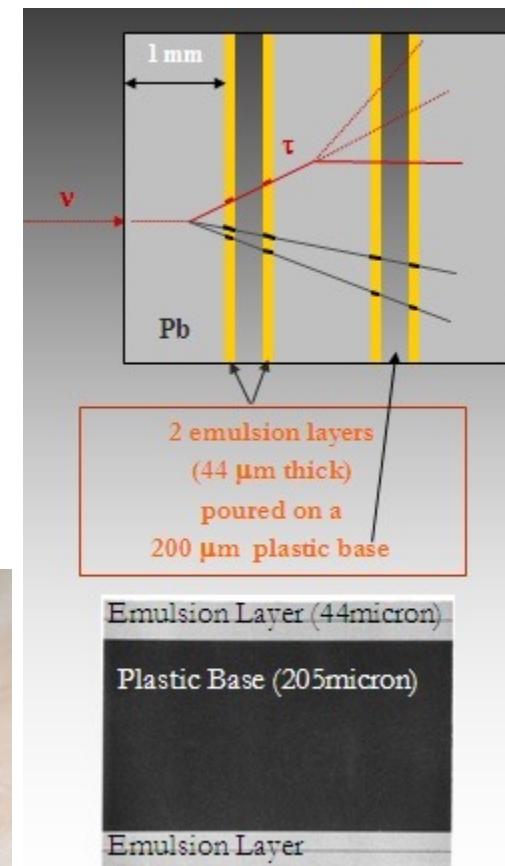
en 5 ans :

23600 interactions ν_μ

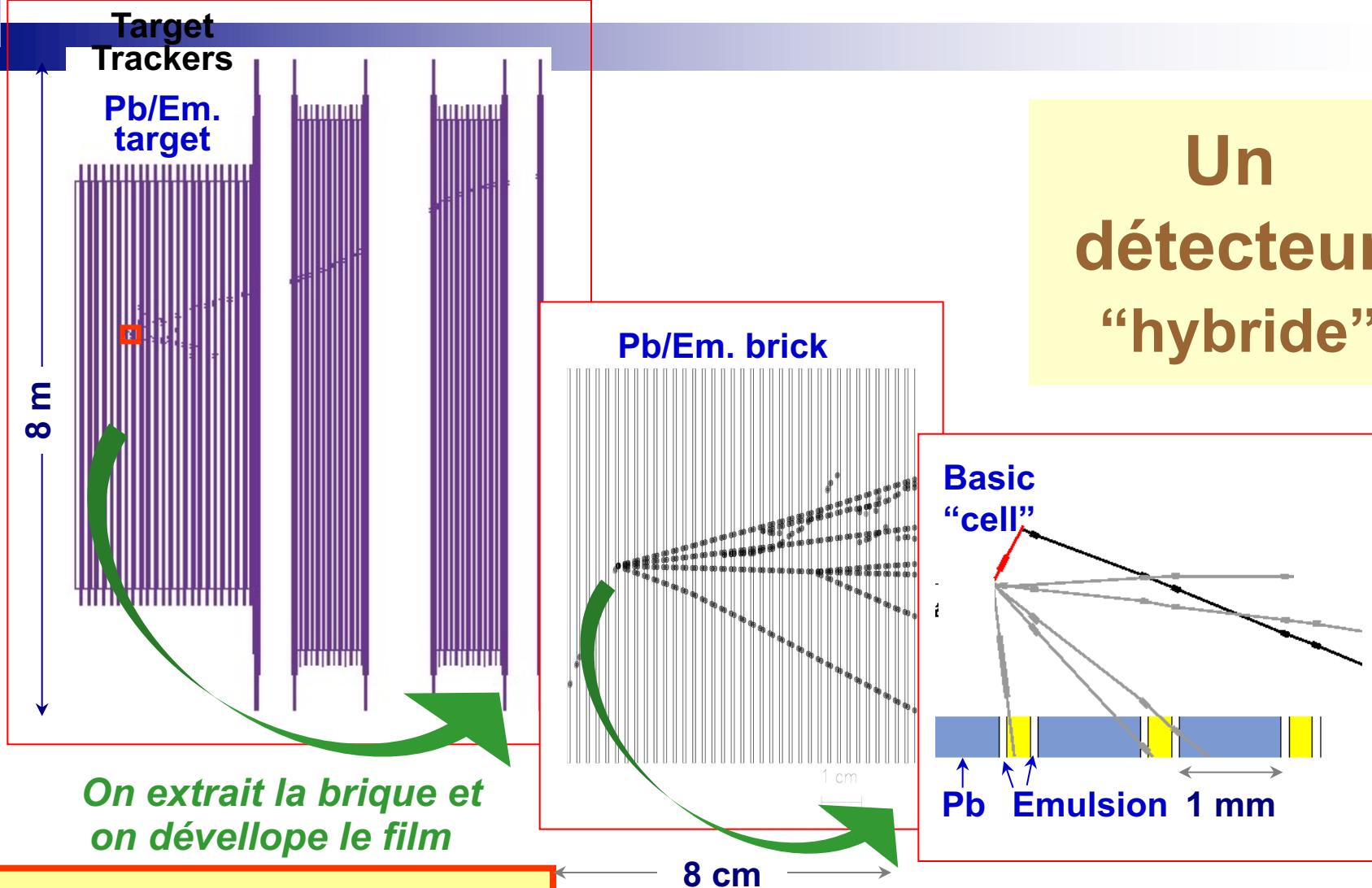
115 interactions ν_τ ($\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} eV^2$)

10 interactions ν_τ identifiées

<1 événement de bruit de fond



Un détecteur “hybride”



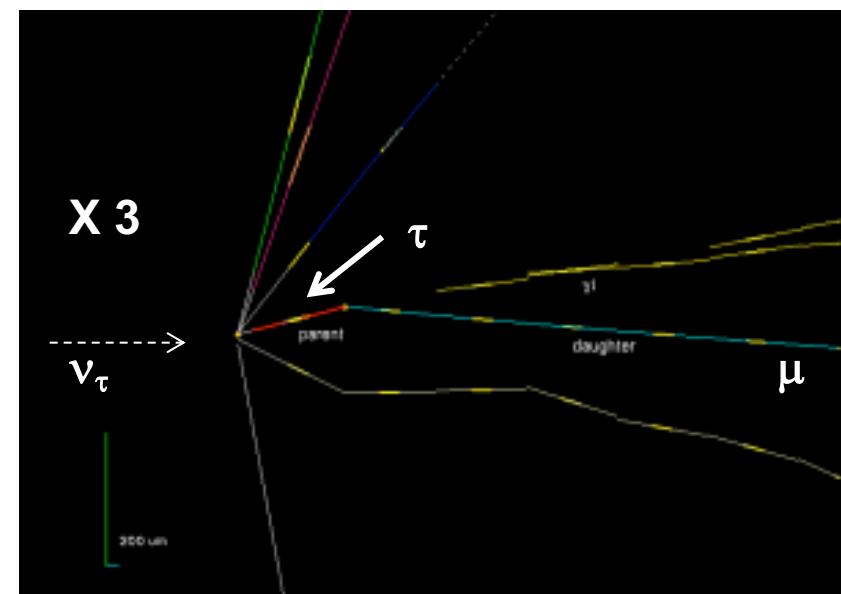
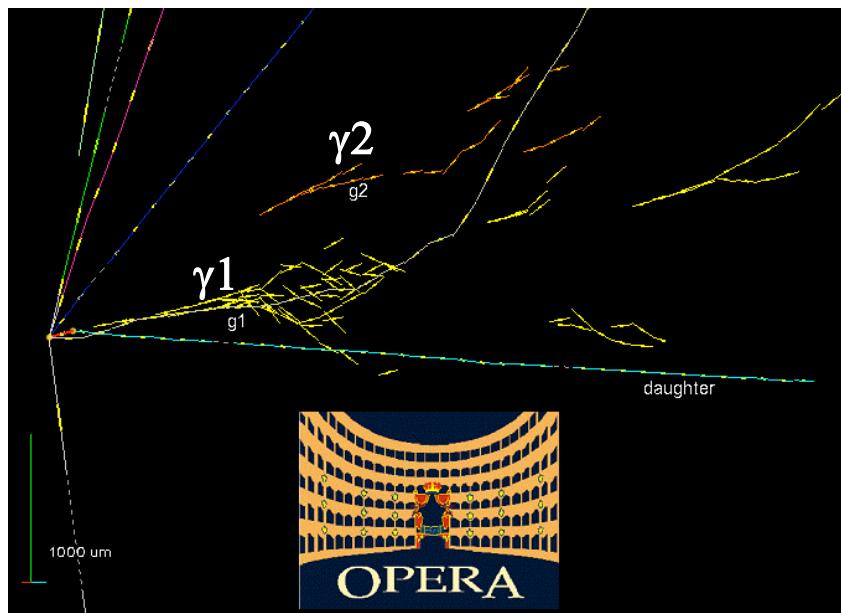
DéTECTEURS
éLECTRONIQUES
→ selection de la brique
ou un ν a interagi

ReCHERCHE DANS
l'émulsion
→ vertex primaire et de
désintégration

■ IX.3. Les expériences de détection d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs

□ OPERA:

Cinq candidats ν_τ dont voici le premier observé en 2010 :



Bruit de fond attendu : 0.25 ± 0.05 événements - Significance : $> 5 \sigma$

4 événements attendus < 10 (dans le proposal) car : variation Δm , moins de POT (p on target), mass detecteur plus petite que design (budget)

Chapitre IX: Oscillations de neutrinos - Sources artificielles

■ IX.4. Conclusions

- Confirmation des observations faites avec les ν solaires et les ν atmosphériques, respectivement avec les ν des réacteurs et ceux des accélérateurs, alors que les biais expérimentaux sont très différents.
- Augmentation de la précision de la mesure des paramètres d'oscillation,
 - Δm^2_{12} et $\sin^2(2\theta_{12})$ pour les ν des réacteurs
 - Δm^2_{23} et $\sin^2(2\theta_{23})$ pour les ν des accélérateurs
 - Mesure significativement non nulle de $\sin^2(2\theta_{13}) \rightarrow$ espoir de mettre en évidence la violation de CP dans le secteur leptonique
 - Démonstration de l'apparition des ν_τ à partir de ν_μ avec OPERA (signal petit mais à 5σ)