

9

OSCILLATIONS DE ν - SOURCES ARTIFICIELLES

9.1 Introduction

① Neutrinos de réacteurs:

- Source pure de $\bar{\nu}_e$: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
 - ↳ Bonne énergie $\langle E \rangle \sim 3 \text{ MeV}$
 - ↳ Flux élevé $\Phi \sim 10^{20} \nu/s$

② Neutrinos d'accélérateurs:

- Interaction de p sur cible de nucléons produit des π^\pm et K^\pm .
 - ↳ $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$
 - ↳ $K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu / \bar{\nu}_\mu (+ \pi^0)$
- Par focalisation (séparation des mésons $+$ et $-$) on obtient un faisceau pur de ν_μ ou de $\bar{\nu}_\mu$
- Spectre d'énergie ajustable.
- Grande tolérance au bruit de fond (flux élevé, $E \nearrow \Rightarrow \sigma \nearrow$, courte durée d'injection, ...)

9.2 Détections d'oscillations de ν auprès des réacteurs

- Idéalement, en présence d'une source fixe de ν , on voudrait pouvoir déplacer le détecteur pour faire varier L autour de L_{osc} .
 - ↳ Pas possible \Rightarrow on fait varier l'énergie
- On peut vérifier les expériences d'oscillations des ν solaires sans hypothèse astrophysique.

① Principe: la source:

- Énergie insuffisante pour $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$ ou $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
 - ↳ Expérience de disparition seulement.
- Les $\bar{\nu}_e$ sont émis par les produits de fission: 1 fission = 6 $\bar{\nu}_e$
 - ↳ Si on connaît le combustible nucléaire, le taux de fission et le taux de production des $\bar{\nu}_e$, on calcule le $\Phi_{\bar{\nu}_e}$ précisément.

① Principe: la détection par "Inverse Beta Decay"

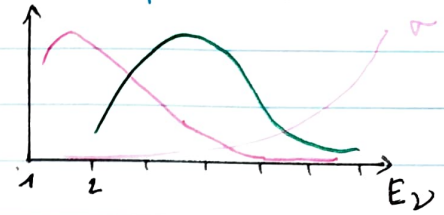
→ On détecte les $\bar{\nu}_e$ ($E \sim \text{MeV}$) par une réaction $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

Même si le Φ est grand,

$\Phi \sim 1/L^2$. De plus,

$\sigma \ll 1 \rightarrow$ pas bcp d'évts.

spectre ν du réacteur
 $\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n)$
spectre d'interaction des ν



→ Après l'IBD, $e^+ + e^- = \gamma + \gamma$ avec $E_\gamma \gg 0,5 \text{ MeV}$

→ Après qq diffusion, $n + X \rightarrow X' + \gamma + \gamma$

⇒ Double signal espacé de $\sim 28 \mu\text{s}$.

↳ Énergie seuil: $E_{\text{thr}} = \frac{(m_e + m_n)^2 - m_p^2}{2 \cdot m_p} \cdot c^2 \approx (m_e + m_n - m_p) c^2 \approx 1,8 \text{ MeV}$

② Principe: le détecteur:

→ Réservoirs de grande dimension, remplis de liquide scintillant, dopé pour $\sigma \pi$.

→ Blindage (contre rayon cosmique, radioactivité naturelle et n du réacteur)

→ PMT pour détecter le double signal

③ Expérience de Chooz

→ 2 réacteurs, 1 puis 2 détecteurs ("far" et "near")

→ far détecteur: bouclier de roche et veto sur les μ cosmiques.

→ Situé à $L = 1000 \text{ m}$

Or, pour des $E_{\bar{\nu}_e} = 1 \text{ MeV}$, on a:

$L_{\text{osc}}^{\text{court}} = 2,47 \cdot \frac{E}{\Delta m_{31}^2} \approx 1000 \text{ m}$ (À petit $L \sim L_{\text{osc}}^{\text{court}}$ les oscillations dominantes sont $\bar{\nu}_\mu \leftrightarrow \bar{\nu}_e$)

$L_{\text{osc}}^{\text{long}} = 2,47 \cdot \frac{E}{\Delta m_{21}^2} \approx 30 \text{ km}$ (Si $L \sim L_{\text{osc}}^{\text{long}}$, principalement $\bar{\nu}_{\mu, \tau} \leftrightarrow \bar{\nu}_e$)

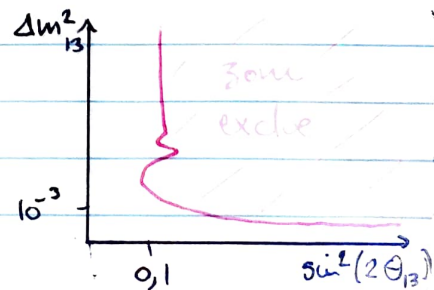
↳ Trop près de la source pour observer une disparition des $\bar{\nu}_e$.

↳ Limite supérieure sur $\sin^2(2\theta_{13})$ en fait de Δm_{31}^2 car

$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(1,27 \cdot \Delta m_{31}^2 \cdot L/E)$$

→ Résultats:

Pas de déficit de $\bar{\nu}_e \Rightarrow$ zone d'exclusion



⊙ Expérience KamLAND:

→ Détecteur à grande distance des sources (observation des oscillations des $\bar{\nu}_e$, mesure de Δm_{21}^2 et de $\sin^2(2\theta_{12})$ dans d'autres conditions que les ν solaires).

↳ À proximité de 7 centrales à ± 175 km.

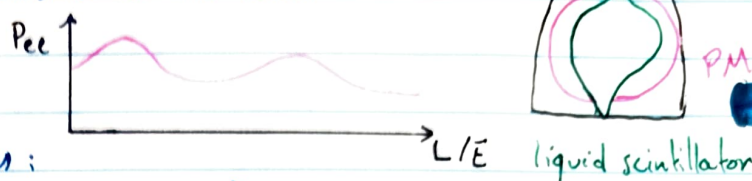
→ Résultats:

→ Déficit observé, 2 bosses:

$$P_{ee} \sim \sin^2(2\theta_{12}) \cdot \sin^2(\alpha \Delta m_{21}^2 L/E)$$

→ Meilleur fit → précisions de Δm_{21}^2 et $\tan^2 \theta_{12}$

→ Belle confirmation des observations avec les ν_e solaires.



⊙ Mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$:

→ Si $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$ (strictement), alors aucune chance de mettre à évidence la violation CP dans le domaine leptonique: tout les termes de la matrice V en $e^{i\delta}$ sont multipliés par $\sin^2(2\theta_{13})$.

→ La violation CP observée dans le domaine des quarks n'est pas suffisante pour expliquer l'asymétrie matière-antimatière.

→ On a: $V_{e3} = \sin(\theta_{13}) e^{i\delta}$. On peut accéder à $\sin^2(2\theta_{13})$ en étudiant les oscillations des $\bar{\nu}_e$ produit par les réacteurs.

↳ On se place dans un domaine de L/E approprié pour observer Δm_{31}^2

$$L/E \sim \lambda_{osc} (1,27 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} / \pi/e)^{-1} \simeq 500 \text{ m/MeV}$$

Puisque $\langle E \rangle \sim 3 \text{ MeV}$, $\langle L \rangle \sim 1500 \text{ m} \rightarrow L_{osc}^{courte}$

$$\text{et } P_{ee} = 1 - \sin^4(2\theta_{13}) \sin^2(1,27 \Delta m_{31}^2 L/E)$$

↳ On place le détecteur à la 1^{re} oscillation

① Mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à Daya Bay :

détecteurs réacteurs



→ 6 réacteurs, 2(x2) détecteurs proches et 1(x4) détecteurs éloignés. Mesure du flux initial ^{1600 m} et final

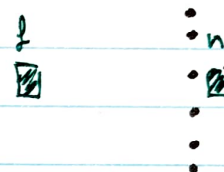
→ Comparaison des taux de $\bar{\nu}_e$ mesuré dans les détecteur far et near :

$$R = \frac{\Phi_{\text{mesuré}}^{\text{far}}}{\Phi_{\text{attendu}}^{\text{far}}} = \frac{\Phi_{\text{mesuré}}^{\text{far}}}{\alpha \Phi_{\text{mesuré}}^{\text{near1}} + \beta \Phi_{\text{mesuré}}^{\text{near2}}} \quad \text{En 2006, on trouve: } R = 0,944$$

→ On trouve $\theta_{13} = 8^\circ$ (très grand!) où $P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ee}^2 L}{4E\nu}\right) + \dots$

$$\Delta m_{ee}^2 \simeq \Delta m_{13}^2 \simeq \Delta m_{23}^2$$

② Mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à RENO! (Corée du Sud)



→ Même principe, résultat moins précis que Daya Bay.

③ Mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ à Double Chooz :

→ Résultat moins précis, mais en accord avec les autres mesures.

→ Final: $\sin^2(2\theta_{13}) = 0,102 \pm 0,012 \neq 0$

3.3 Détection d'oscillations de ν auprès des accélérateurs

→ On monte en énergie: MeV \rightarrow GeV. on étudie les ν_μ et $\bar{\nu}_\mu$.

④ Exemple: CERN \rightarrow Gran Sasso :

On a $p \rightarrow \pi/K \rightarrow \mu + \nu_\mu$:

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

$\rightarrow e^\pm + \nu_e / \bar{\nu}_e$ et $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e / \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu / \nu_\mu$

\rightarrow faisceau de ν_μ avec contamination ($\bar{\nu}_\mu \sim 5\%$, $\nu_e + \bar{\nu}_e \sim 1\%$)

→ Puisque $E_\nu \gg \text{GeV}$, pour être sensible à $\Delta m_{12}^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$, il faut $L \sim 500 \text{ km}$

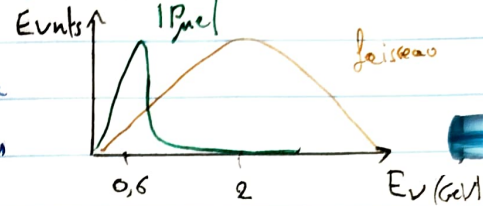
→ Expériences type Long Base Line: K2K et T2K (Kamioka) $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$
Minos (Fermilab) et Opera (CERN \rightarrow Gran Sasso): 730 km $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

⑥ T2K:

- Faisceau de ν_μ : observation d'apparition de ν_e
 ↳ Signal faible \Rightarrow ajuster L/E au mieux et être au max de l'amplitude de $P_{\mu e}$. On trouve:

L/E $\approx 500 \text{ km/GeV}$ } $E_{\text{opt}} \approx 0,6 \text{ GeV}$ faible p/r au faisceau
 $L = 300 \text{ km}$

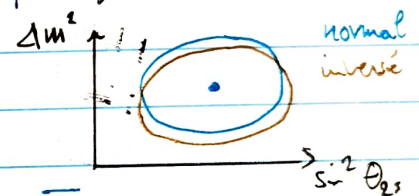
- Pour diminuer l'énergie des ν_μ , on incline le faisceau de qq degrés, on délocalise les π trop énergétiques (technique Off-axis)



- Détecteur supplémentaire proche de la source de ν_μ pour mesurer le flux de ν_μ et donc du flux, et leur énergies + direction

- Résultats: 28 interactions de ν_e : preuve que $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

↳ Valeur de Δm^2 en fct de $\sin^2 \theta_{23}$, et de la hiérarchisation des masses



- Observation également de la disparition des $\bar{\nu}_\mu$

- Derniers résultats: tjs compatible avec l'ordre des masses "normal" ou "inverse".

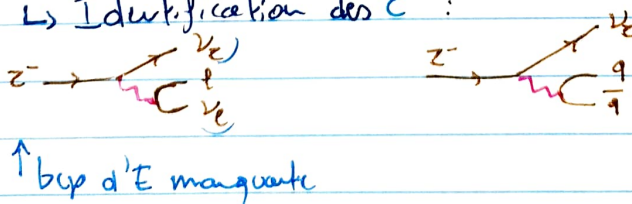
⑥ Opéra:

- But: ① Confirmer les oscillations $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$

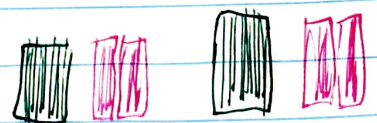
② Observer $\nu_e + X \rightarrow e^- + X'$ dans un faisceau de ν_μ

↳ Mais: $\sigma \ll 1$ et temps de vie du $\tau^- \ll 1$

↳ Identification des τ^- :



- Détecteur: émulsion + trajectographe
 spectromètre à muons
 ↳ Détecteur hybride.



→ Cible: 10^5 briques forment un mur, instrumentée par le trajectographe.

↳ 10 interactions ν_e identifiées

→ Les détecteurs électroniques sélectionnent la brique où un ν a agit. L'analyse de l'émulsion montre le vertex primaire et de désintégration.



9.4 Conclusions

→ Confirmation des observations faites avec les ν solaires et atmosphériques auprès des réacteurs et accélérateurs.

→ Augmentation de la précision de la mesure des paramètres d'oscillation:

→ Δm_{12}^2 et $\sin^2(2\theta_{12})$ pour les ν réacteurs

→ Δm_{23}^2 et $\sin^2(2\theta_{23})$ pour les ν des accélérateurs.

→ Mesure significativement non nulle de $\sin^2(2\theta_{13})$

→ espoir de mise en évidence de la violation CP dans le secteur leptonique.

→ Apparition des ν_e à partir du ν_μ (Opera, 50')