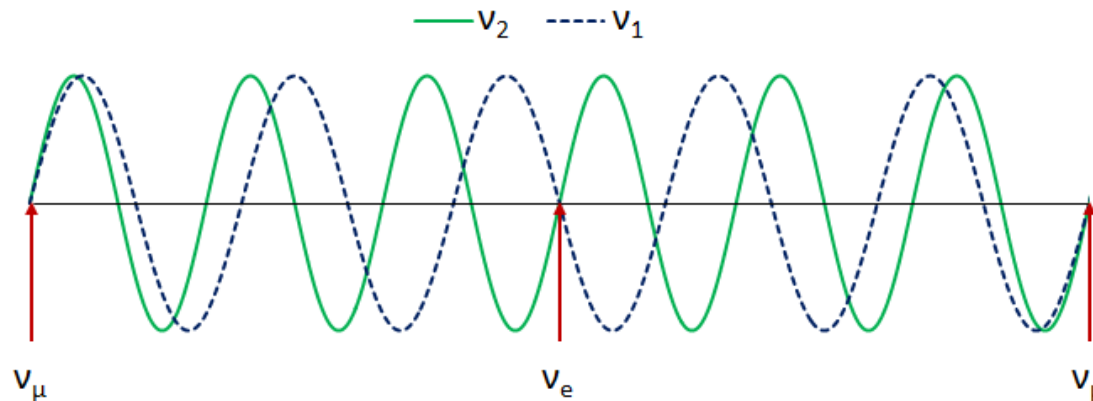


# Oscillation des neutrinos à courtes distances: la chasse aux neutrinos stériles s'accélère!

Matthieu Vivier,  
CEA-Saclay, IRFU/SPP



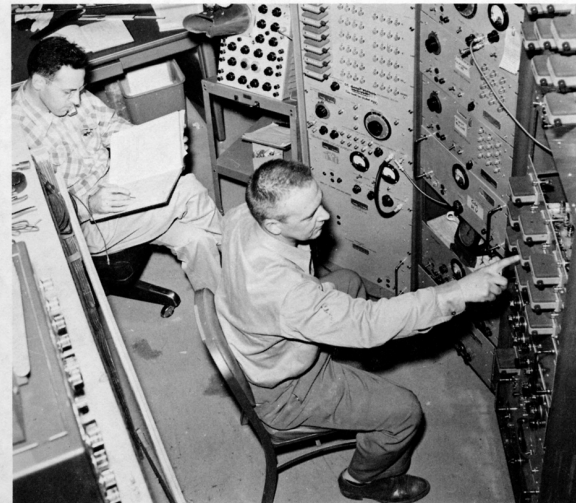
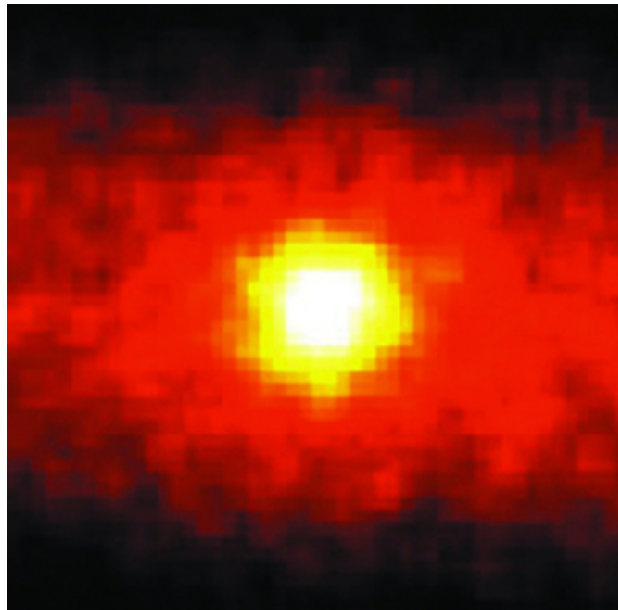


# Au menu aujourd'hui...

---

1. Petite introduction sur les neutrinos
  - Propriétés fondamentales
  - Oscillation des neutrinos
  
2. Anomalies dans le régime des courtes distances
  - Expériences sur réacteurs
  - Expériences sur accélérateurs
  - Expériences avec des sources radioactives intenses
  
3. Les futures expériences à courtes distances: ou comment débusquer un possible 4<sup>ème</sup> neutrino...

# Petite introduction sur les neutrinos



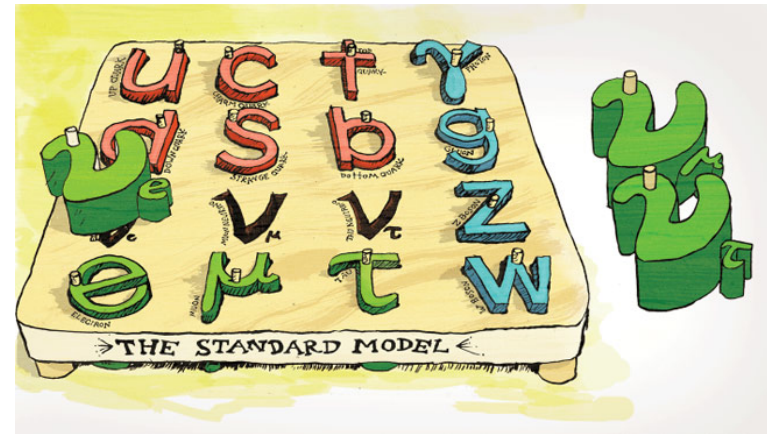
Frederick Reines (left) and Clyde L. Cowan, Jr. with the control equipment used in their first tentative observations of the neutrino at Hanford, Washington, in 1953. Their definitive detection of the (anti) neutrino was performed at Savannah River, Georgia, three years later. (Courtesy General Electric Co.)

# Le mystérieux neutrino... $\nu$

- Particule élémentaire du modèle standard prédite dans les années 30 pour expliquer les désintégrations nucléaires beta. Découverte en 1956 par Reines & Cowan.

## Ce qu'on sait du neutrino...

- Trois familles de neutrinos:
  - électronique
  - muonique
  - tauique
- Sensible uniquement à la force faible et la force gravitationnelle: probabilité d'interaction avec la matière extrêmement faible.
- **Peuvent osciller d'une famille à une autre:** les neutrinos sont des particules massives!
- On ne connaît que la différence des carrés de leurs masses.



$$\sum_i m_{\nu_i} \lesssim 0.5 \text{ eV (95\%C.L)}$$

$$m_{\bar{\nu}_e} \leq 2 \text{ eV (95\%C.L)}$$



# Le mystérieux neutrino... $\nu$

- Particule élémentaire du modèle standard prédite dans les années 30 pour expliquer les désintégrations nucléaires beta. Découverte en 1956 par Reines & Cowan.

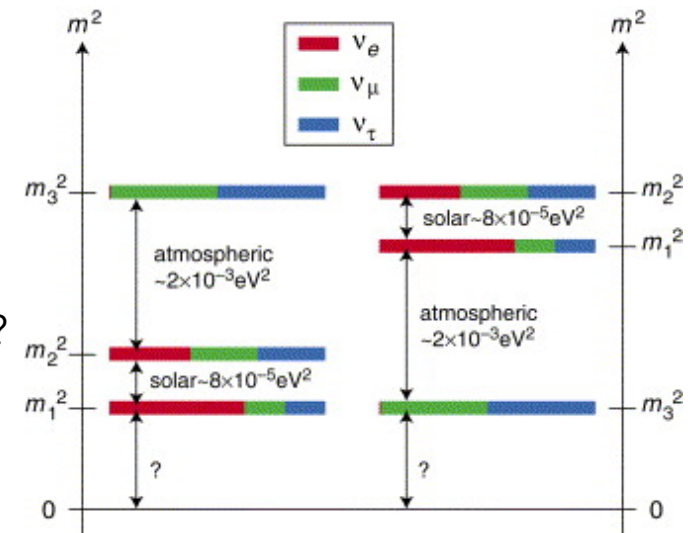
## Ce qu'on ne sait pas du neutrino...

- Masses absolues des neutrinos?
- Hiérarchie des états de masses?
- Le neutrino et l'anti-neutrino sont-ils des particules distinctes? Particules de Majorana?
- Est-ce que l'oscillation des neutrinos viole la symétrie CP?

$$|\nu_e(\vec{x}, t)\rangle \stackrel{CP}{\rightleftharpoons} |\bar{\nu}_e(-\vec{x}, t)\rangle$$

$$P_{|\nu_e(\vec{x}_1, t_1)\rangle \rightarrow |\nu_e(\vec{x}_2, t_2)\rangle} \stackrel{?}{=} P_{|\bar{\nu}_e(-\vec{x}_1, t_1)\rangle \rightarrow |\bar{\nu}_e(-\vec{x}_2, t_2)\rangle}$$

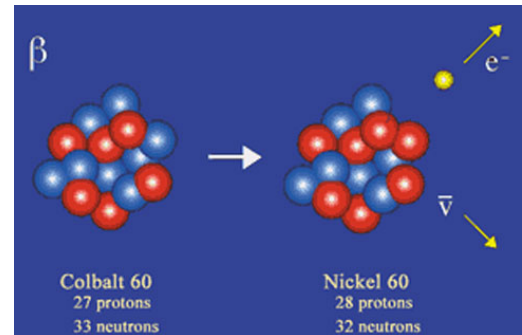
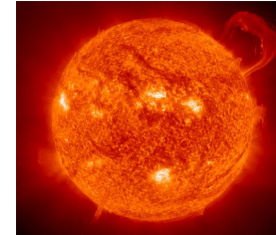
- Y a-t-il des neutrinos (stériles) supplémentaires?



# Sources de neutrinos

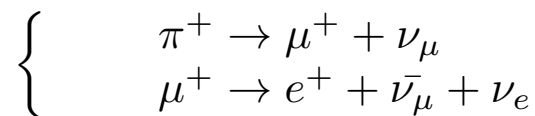
- Sources naturelles:

- Soleil:  $10^{14} \nu \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  sur Terre, énergie: quelques MeV
- Supernovae:  $10^{58} \nu$  émis ,  $10^{14-15}$  arrivent sur Terre pour une distance de quelques milliers d'années-lumière, énergie: 10-100 MeV
- $\nu$  issus de l'interaction du rayonnement cosmique sur l'atmosphère
- Noyaux radioactifs: désintégrations  $\beta$   
énergie:  $< 10 \text{ MeV}$



- Sources artificielles:

- Réacteurs nucléaires: désintégrations  $\beta$  des produits de fissions,  $10^{20} \nu \text{ s}^{-1} \text{ GW}^{-1}_{\text{th}}$ , énergie  $< 10 \text{ MeV}$
- Bombes nucléaires (bombes A)
- Faisceaux de neutrinos sur accélérateurs:  
collisions de protons sur une cible pour produire des pions chargés puis désintégration des pions  
énergie 0.1-10 GeV



# Oscillation des neutrinos

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \times \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \Leftrightarrow |\nu_e(t)\rangle = \sum_i U_{ei} |\nu_i(t)\rangle$$

- $U_{\text{PMNS}}$  (matrice de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata) relie les états propres de masse  $\nu_i$  aux états propres d'interaction  $\nu_\alpha$  ( $\alpha=e,\mu,\tau$ ).
- Les coefficients  $U_{\alpha i}$  sont connus (néanmoins pas de manière très précise...)
- Paramétrisation de la matrice  $U_{\text{PMNS}}$  dans le cas simple d'un scénario à deux neutrinos

$$U_{\text{PMNS}}^{2 \times 2} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad \theta \text{ angle de mélange}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}}^{2 \times 2} \times \begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_j \end{pmatrix} \Leftrightarrow P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sin^2(2\theta_{ij}) \times \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{ij}^2 [eV^2] L[m]}{E[MeV]}\right)$$

- Trois familles de neutrinos, trois angles de mélange, trois fréquences d'oscillation.

$$f_{\text{osc}}^{ij} = \frac{1.27 (m_j^2 - m_i^2)}{2\pi}$$

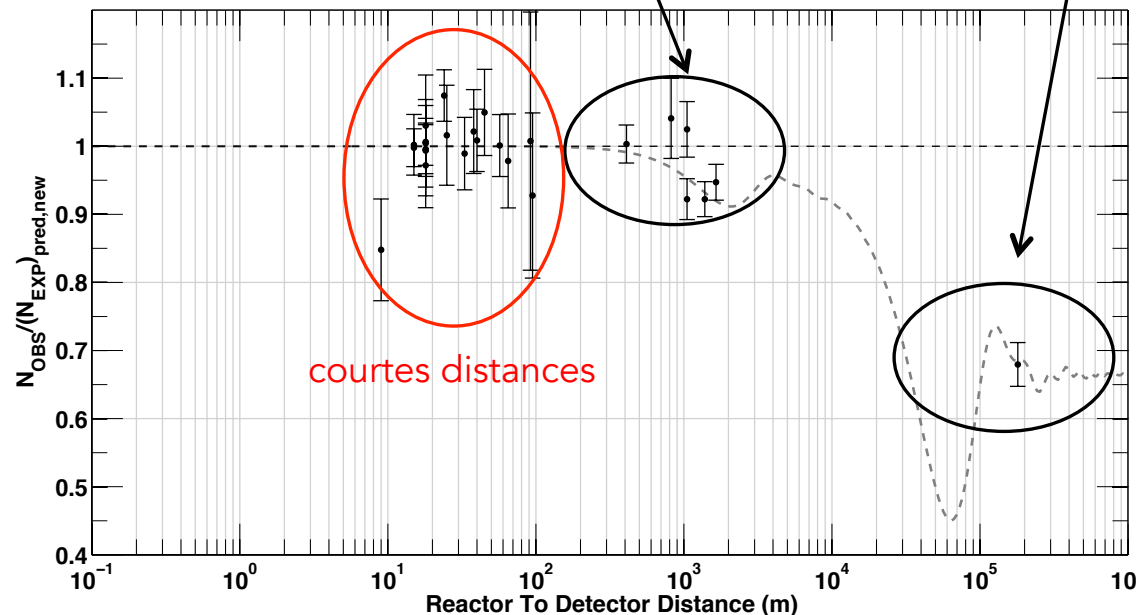
solaire	atmosphérique
$\Delta m_{12}^2$	$\Delta m_{23}^2$
$8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$	$2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

# Les différents régimes d'oscillation

- Supposons un neutrino d'énergie 1 MeV...

Régime	atmosphérique	solaire
$\Delta m^2$	$2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	$8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
L	$\approx 1 \text{ km}$	$\approx 30 \text{ km}$

$$L = \frac{\pi \times E}{1.27 \times \Delta m^2}$$



- Moyennes distances:
  - CHOOZ, SRP
  - Double Chooz, Daya Bay, RENO
- Longues distances:
  - Super K, Borexino, SNO
  - T2K, Minos

# Anomalies dans le régime des courtes distances

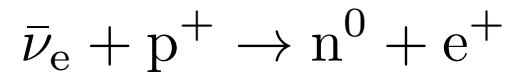
Mais où sont passés  
mes anti-neutrinos de  
réacteurs !!?



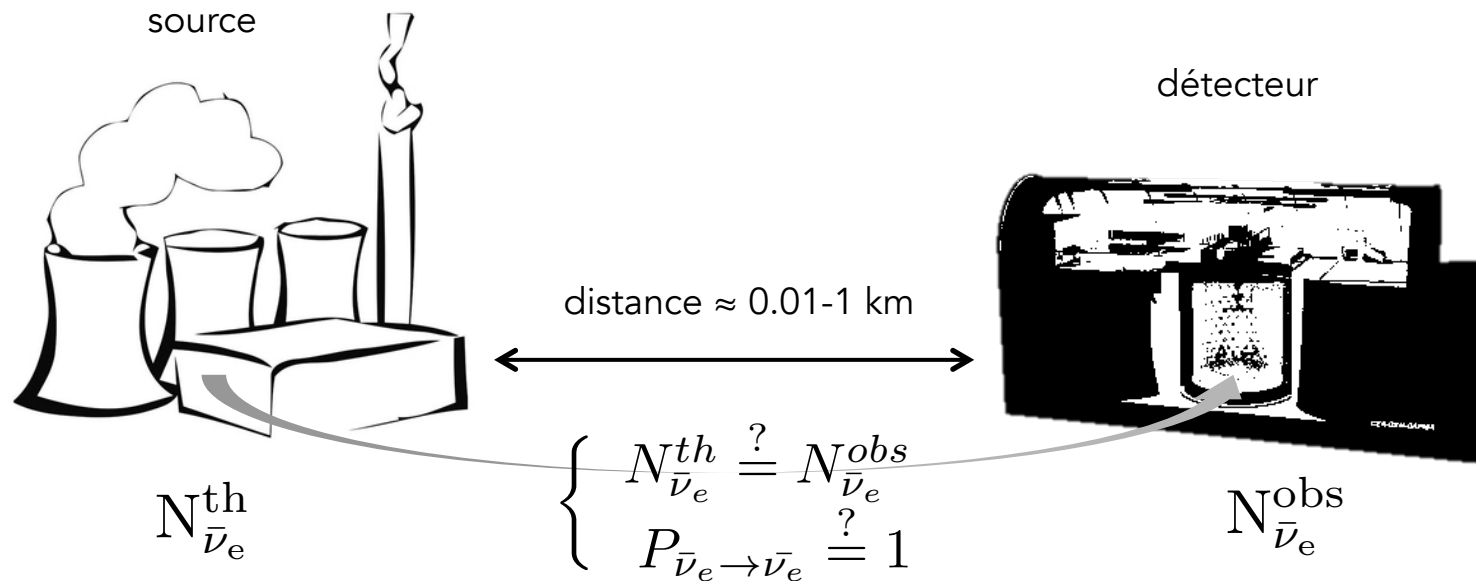
(Homer Simpson – Centrale de Springfield)

# L'anomalie des anti-neutrinos de réacteurs

- Les expériences placées à proximité d'un réacteur nucléaire sont des expériences de disparition.
- Détection des anti  $\nu_e$  au moyen de la désintégration  $\beta$  inverse (DBI):

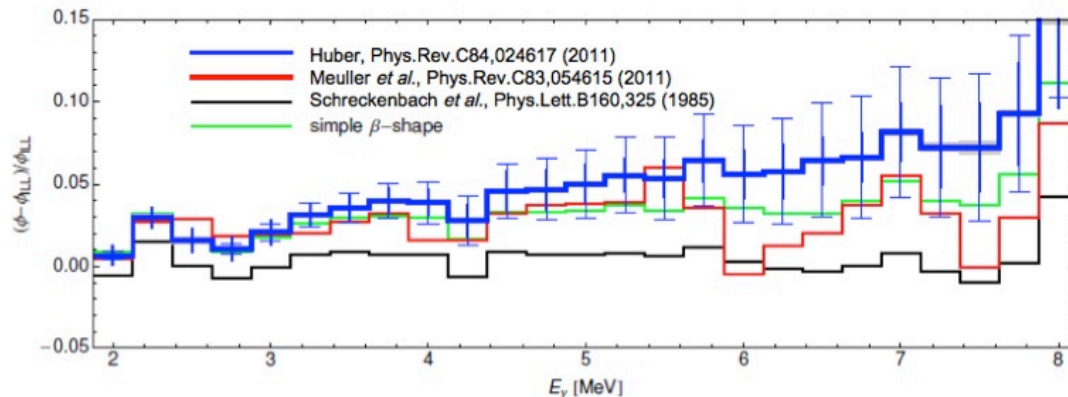


- Doivent savoir prédire le flux d'anti  $\nu_e$  pour comparer leurs données aux attentes et mesurer un éventuel déficit.



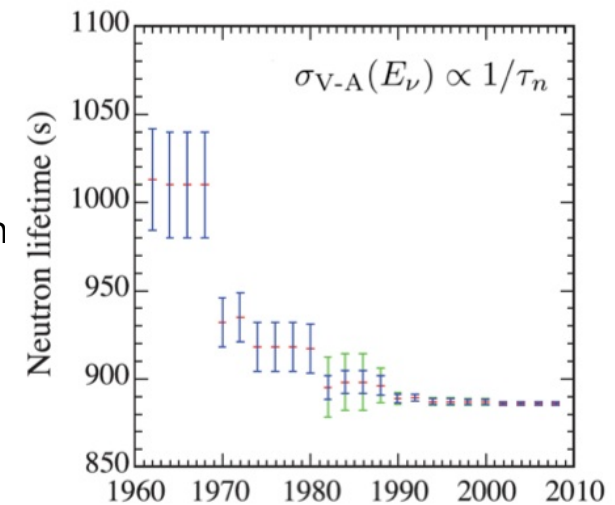
# L'anomalie des anti-neutrinos de réacteurs

- Ré-évaluation en 2011 de la prédiction des spectres neutrinos en utilisant les bases de données nucléaires:



- $\sigma_{\text{IBD}}$  dépend du temps de vie du neutron. Revue à la hausse à cause de la dernière mesure de  $\tau_n$ : +1%
- Prise en compte de l'accumulation des produits de fission à long temps de vie dans les prédictions: flux d'anti  $\nu_e$  augmenté de 1%

Augmentation du flux de neutrino de **3.5%** en moyenne, par rapport aux anciennes prédictions

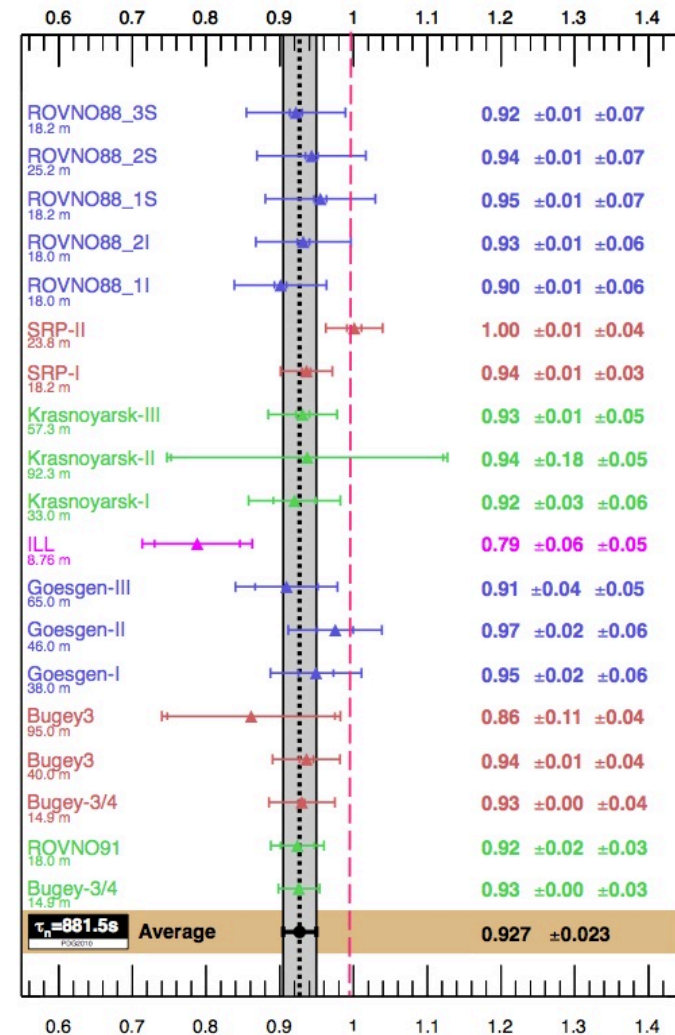




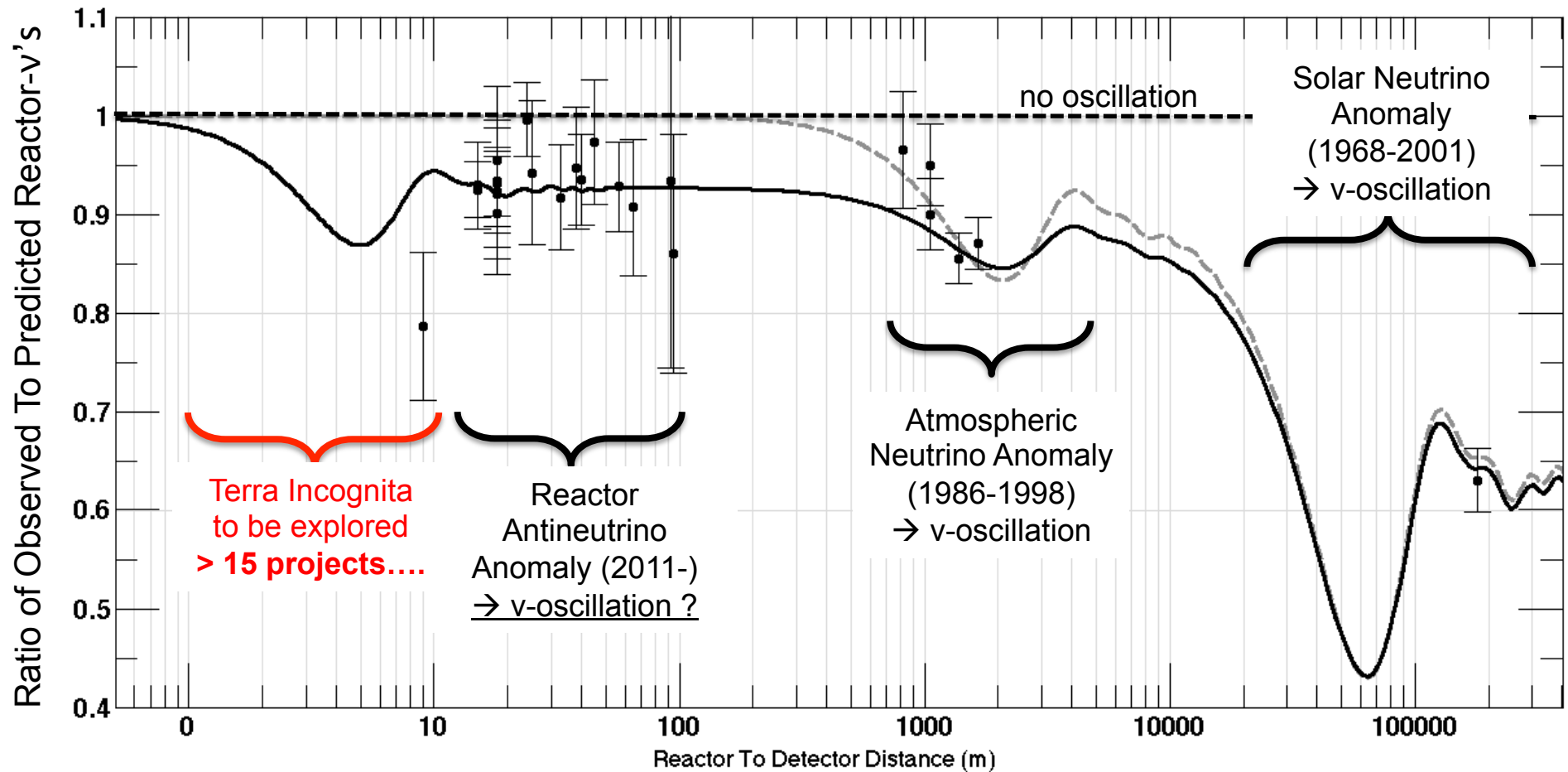
# L'anomalie des anti-neutrinos de réacteurs

- Ré-analyse des données de 19 expériences à courtes distances (< 100m ) pour ré-évaluer dans ce contexte les rapports  $N^{\text{obs}}/N^{\text{th}}$
- Nombre d'anti-neutrinos de réacteur détectés plus faible que prévu: déficit global de 7%
- Déviation à 99.7% C.L du nombre de neutrinos attendus ( $R = 0.934 \pm 0.023$ )
- Interprétation en termes d'oscillations à courtes distance:

$$\Delta m^2 > 0.1 \text{ eV}^2 (\gg \Delta m^2_{\text{atm}} \gg \Delta m^2_{\text{sol}}) \text{ \& } \sin^2(2\theta) \approx 0.1$$

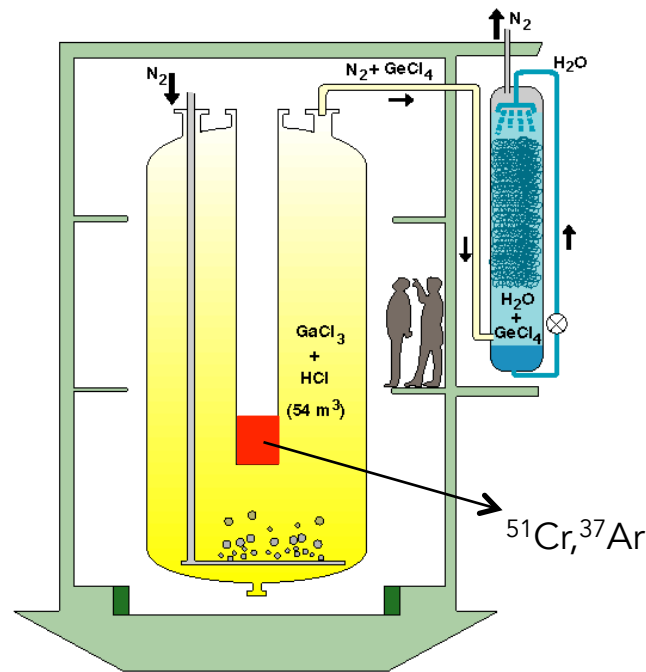


# L'anomalie des anti-neutrinos de réacteurs

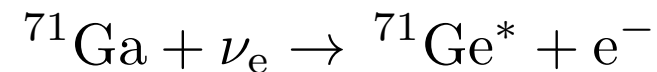


# L'anomalie du Gallium

- Concerne les expériences GALLEX et SAGE de détection des neutrinos solaires (visant à expliquer le problème des neutrinos solaires)



- Principe de détection basé sur la réaction:

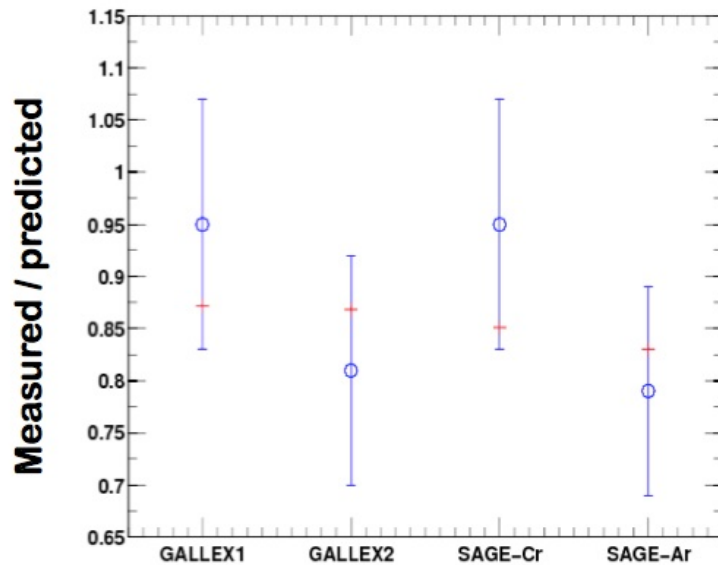


- Le comptage du nombre de noyaux radioactifs de Germanium permet de remonter au nombre de  $\nu_e$  ayant interagit dans le détecteur.
- Sources radioactives de  $^{51}\text{Cr}$  ( $E_\nu = 750 \text{ keV}$ ) et d' $^{37}\text{Ar}$  ( $E_\nu = 810 \text{ keV}$ ) d'activité bien connue placées au centre pour calibrer la réponse des détecteurs.

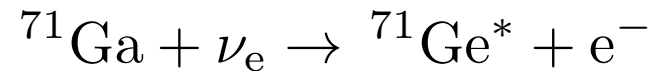
➔ Distances typiques de l'ordre du mètre, avec des neutrinos d'énergie de l'ordre du MeV  
L/E  $\approx$  1 m/MeV

# L'anomalie du Gallium

- Résultats des campagnes de calibration de Gallex et SAGE:



- Incertitudes sur la section efficace de la réaction:



- Mènent à des incertitudes sur la valeur des rapports:

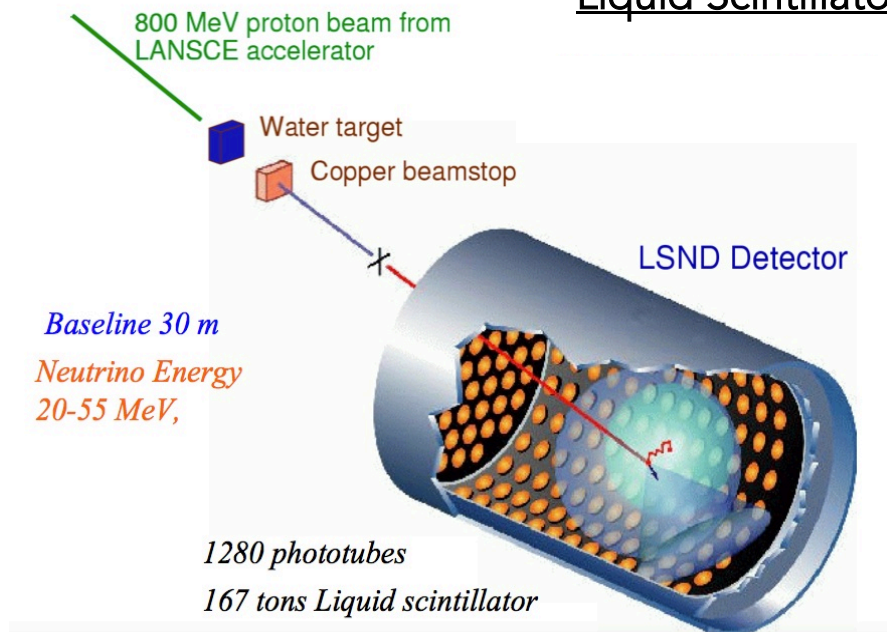
$$\begin{cases} R_{obs/pred} = 0.86 \pm 0.05 (\sigma_{Bahcall}) \\ R_{obs/pred} = 0.76 \pm 0.085 (\sigma_{Haxton}) \end{cases}$$

- Déviations à environ  $3\sigma$  (99% C.L) des prédictions par rapport aux mesures.
- Interprétation des données en terme d'oscillation des  $\nu_e$  donne:

$$\Delta m^2 \approx 1 \text{ eV}^2 (>> \Delta m^2_{atm} >> \Delta m^2_{sol}) \text{ \& sin}^2(2\theta) \approx 0.1$$

# L'anomalie de l'expérience LSND

## Liquid Scintillator Neutrino Detector @ Los Alamos (1993-1998)

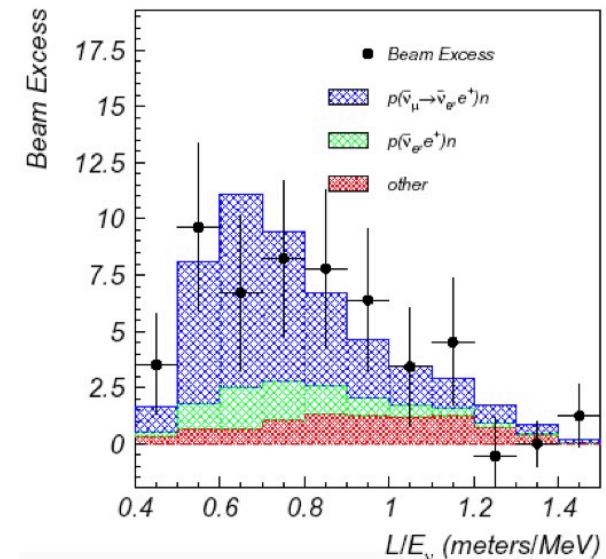


- Grand volume de liquide scintillant, entouré de photo-multiplicateurs
- Placé devant un faisceau d'anti  $\nu_\mu$ , recherchait des oscillations du type:

$$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$

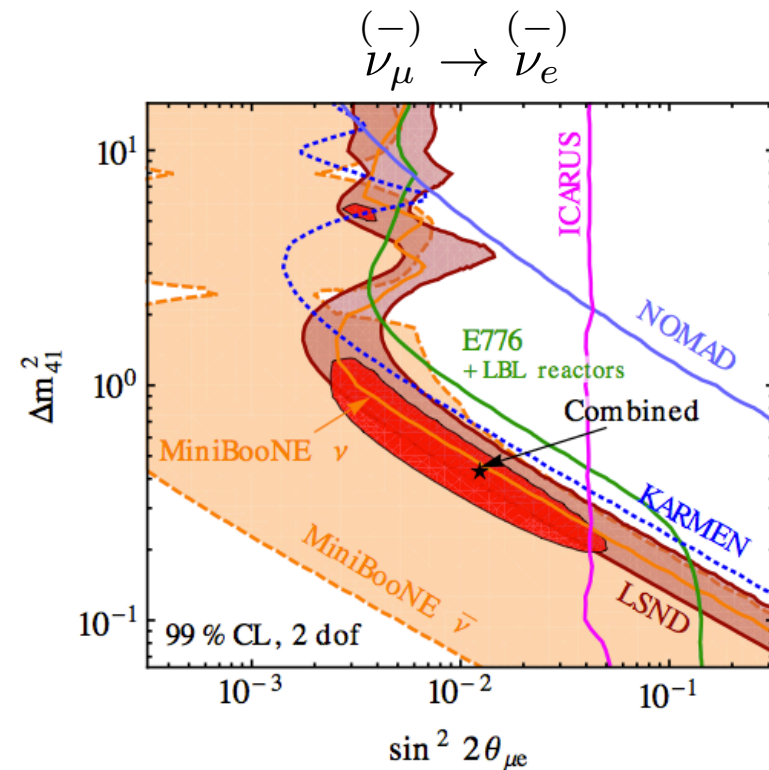
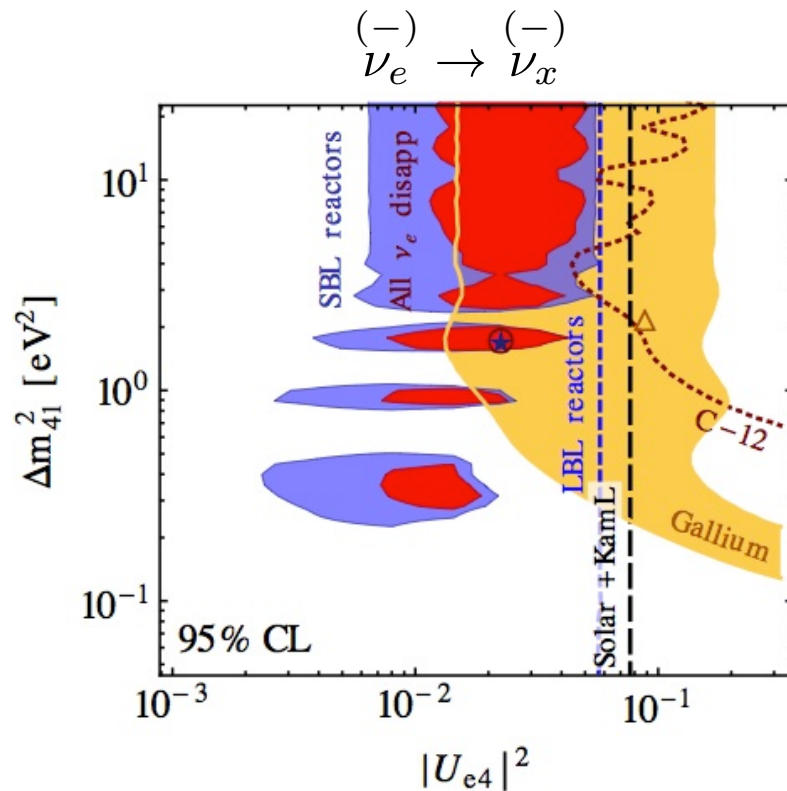
- Détection des anti  $\nu_e$  avec l'IBD.
- Distance 30 m, énergie des neutrinos 20-55 MeV,  $L/E \approx 1$  m/MeV

- Excès d'anti  $\nu_e$  :  $32.2 \pm 9.4_{(\text{stat.})} \pm 2.3_{(\text{syst.})}$  ( $3.8\sigma$ )
- Résultat néanmoins ambigu car confirmé et pas confirmé par certaines expériences sur faisceau (MiniBoone, Karmen,...)
- Interprétation en termes d'oscillation:  
 $\Delta m^2 \gg 0.2 \text{ eV}^2 (\gg \Delta m^2_{\text{atm}} \gg \Delta m^2_{\text{sol}})$



# Un 4<sup>ème</sup> neutrino?

- Anomalies mesurées pourraient curieusement toutes s'expliquer avec une oscillation dont la fréquence est compatible avec  $\Delta m^2 \approx 1 \text{ eV}^2$ . Nouvelle famille de neutrino?



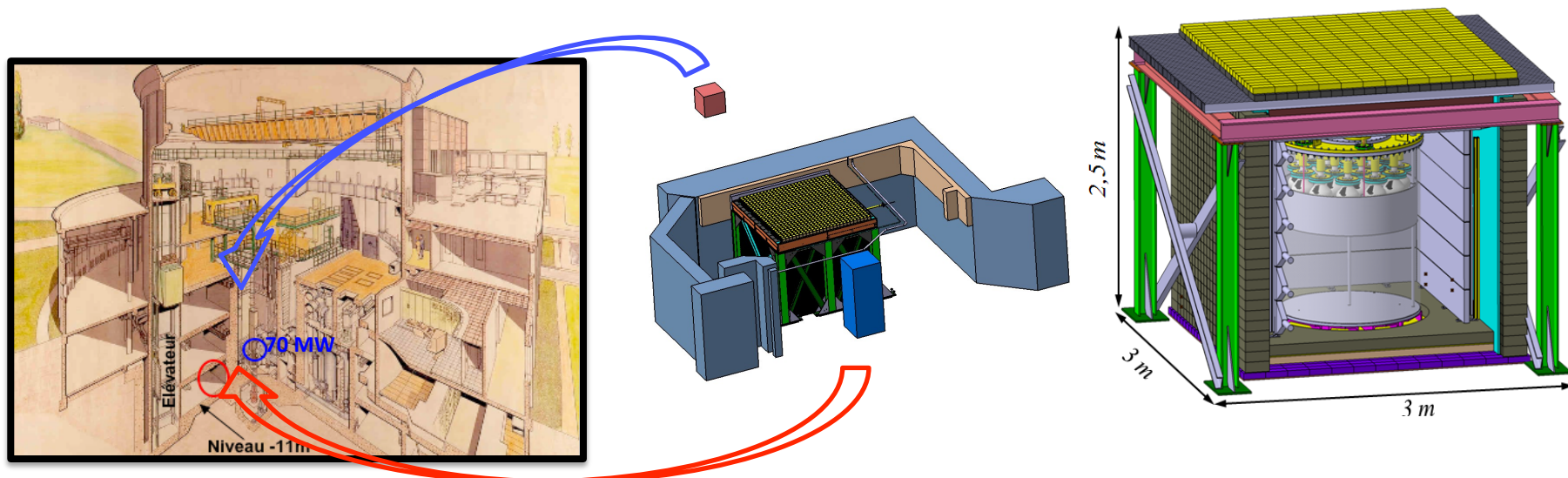
- Si 4<sup>ème</sup> neutrino, nécessairement stérile (i.e. sans interaction avec le modèle standard)

Quelques expériences qui testent les  
anomalies à courtes distances



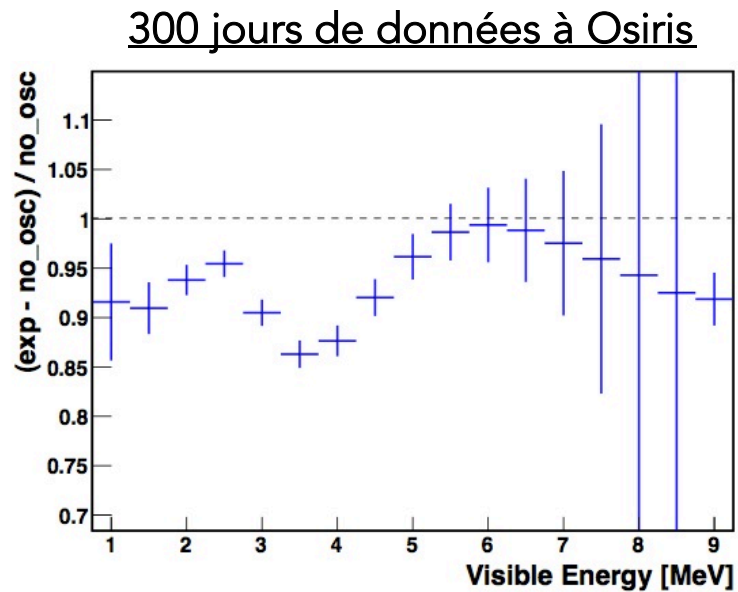
# Nucifer

- Petit détecteur de neutrino à liquide scintillant placé depuis 2012 auprès du réacteur de recherche du CEA-Saclay Osiris
- Construit d'abord comme outil de surveillance de l'activité d'une centrale nucléaire (pourrait être utile dans le cadre du traité de non-prolifération de l'AIEA)
- A néanmoins la possibilité de dire quelque chose sur les oscillations à courtes distances:
  - Distance = 7 m
  - $P_{\text{reacteur}} = 70 \text{ MW}$
  - Dimensions du détecteur  $h = 0.7 \text{ m} \times \Phi = 1.2 \text{ m}$

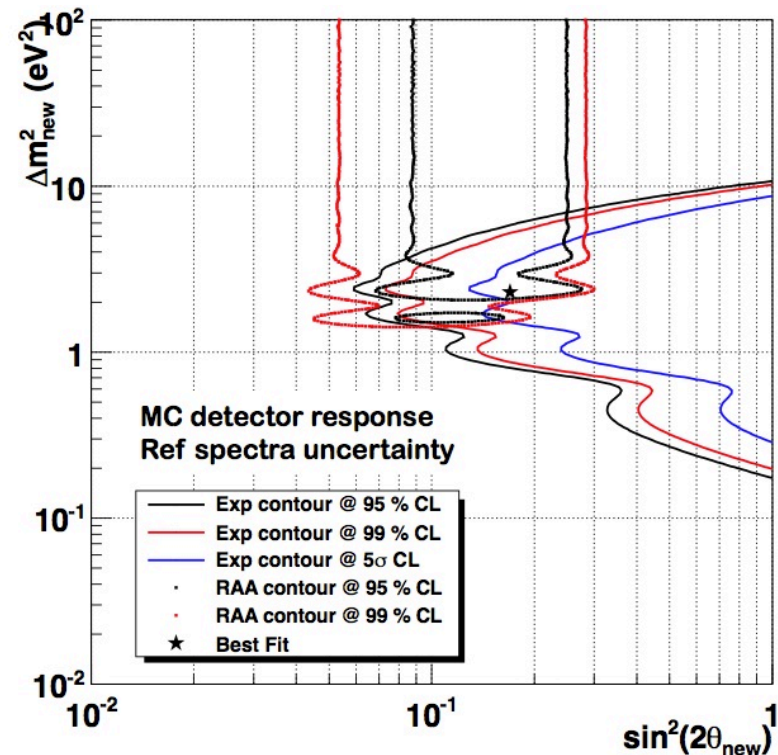


# Sensibilité de Nucifer

- Ajout de blindages supplémentaires contre les bruits de fond nécessaire
- Sensibilité avec l'ajout des blindages:

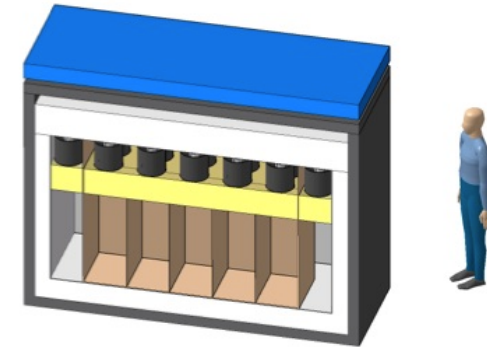


Oscillations attendues pour  
 $\Delta m^2 \approx 1 \text{ eV}^2$  &  $\sin^2(2\theta) \approx 0.15$

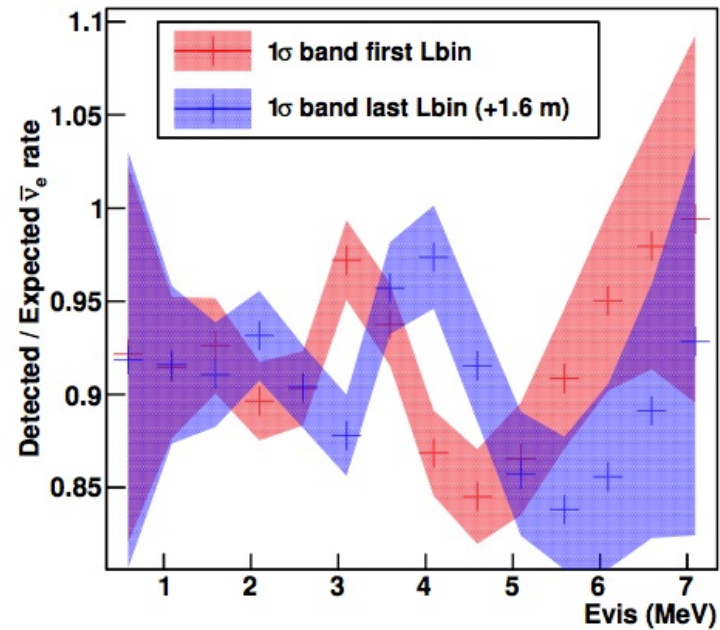


# Stéréo

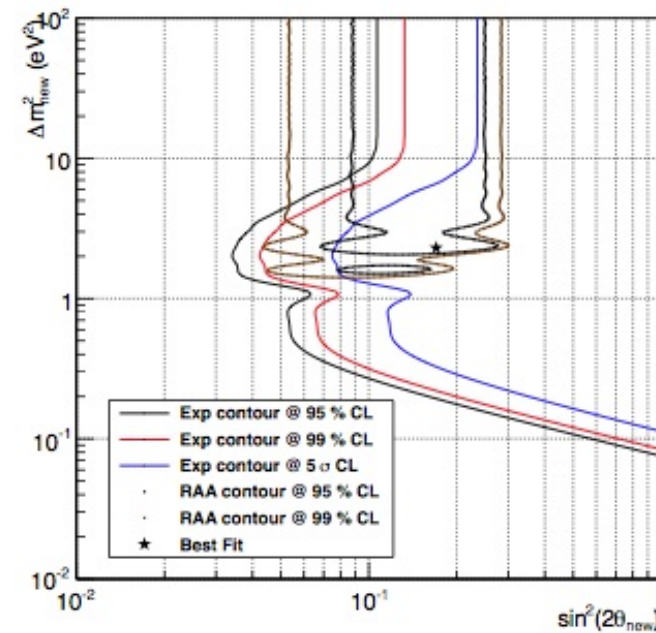
- Détecteur de neutrino "à la Nucifer", mais segmenté en plusieurs cellules indépendantes
- En phase de R&D, sera placé près du réacteur de recherche de l'ILL à Grenoble d'ici 2015



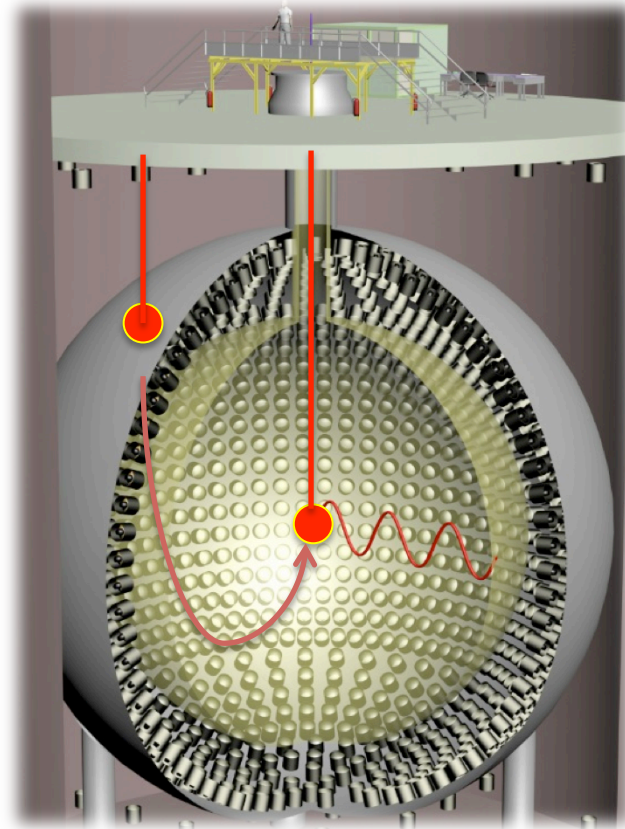
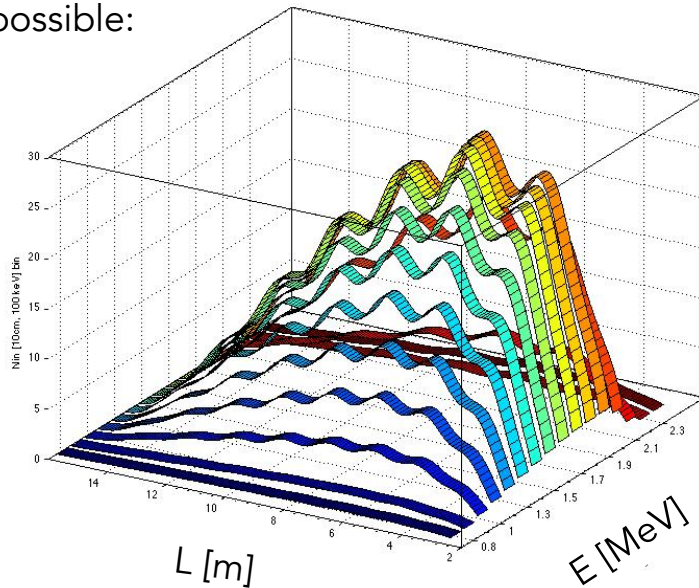
Oscillations attendues dans les 1<sup>er</sup> et dernier segments



Sensibilité de Stéréo

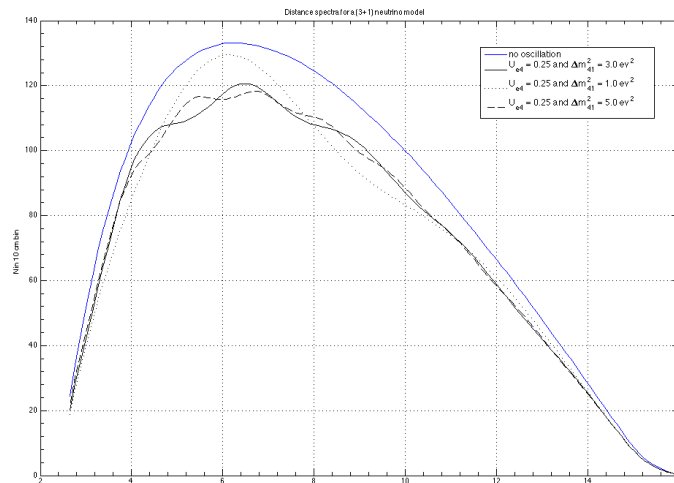


- Positionnement d'une source radioactive intense de  $^{144}\text{Ce}$  (75 kCi) au voisinage de KamLAND, un grand détecteur de neutrino à liquide scintillant situé au Japon:
  - Très courtes distances ( $\leq 99$  m)
  - Niveau de bruit de fond extrêmement bas
- Reconstruction des oscillations à la fois en énergie et distance possible:



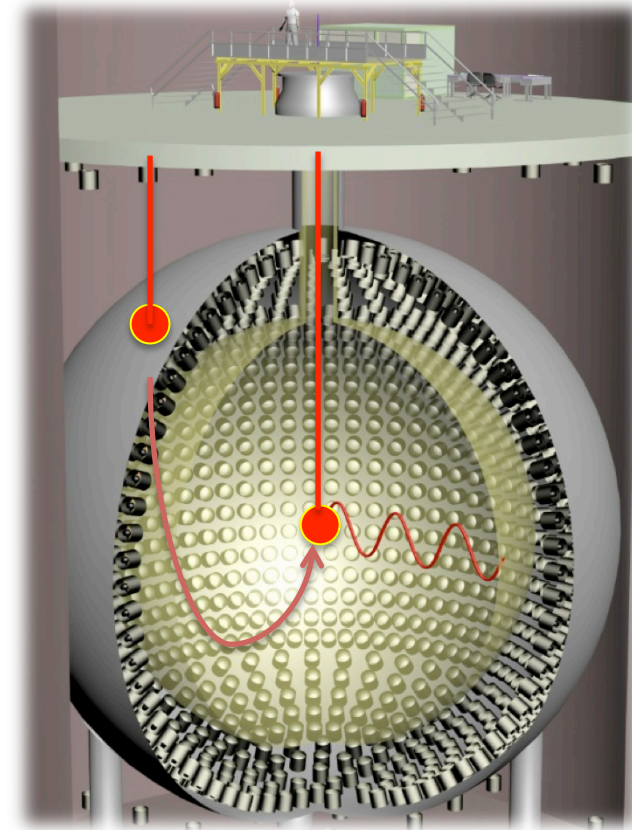


- Positionnement d'une source radioactive intense de  $^{144}\text{Ce}$  (75 kCi) au voisinage de KamLAND, un grand détecteur de neutrino à liquide scintillant situé au Japon:
  - Très courtes distances ( $\leq 99$  m)
  - Niveau de bruit de fond extrêmement bas
- Reconstruction des oscillations à la fois en énergie et distance possible:



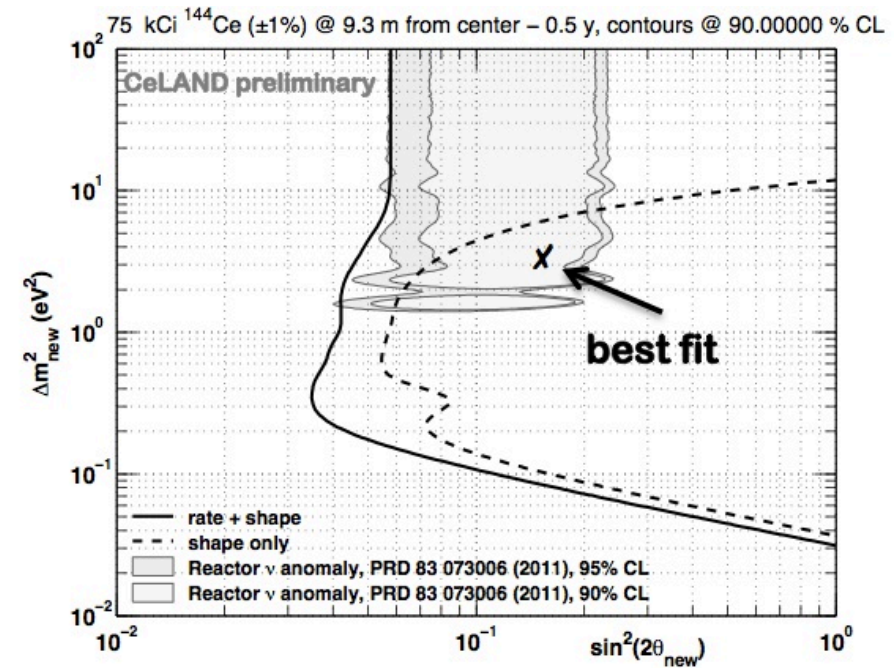
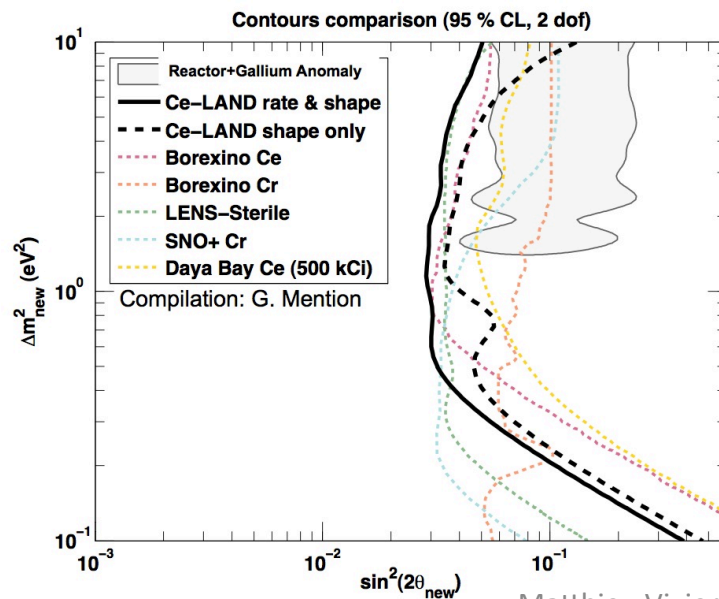
L [m]

Matthieu Vivier - Congrès de la SFP 2013, Marseille



# CeLAND

- Sensibilité de CeLAND couvre l'anomalie des oscillations à courtes distances avec une demi-année de données.
- Sera capable d'effectuer une mesure précise en une année de données, si signal il y a
- Déploiement de la source prévu pour début 2015



Comparaison de la sensibilité de CeLAND avec les expériences concurrentes

# Conclusions

---

- Anomalies détectées dans le régime des courtes distances par des expériences utilisant des sources et des techniques de détection des neutrinos différentes.
- L'interprétation de ces déficit en termes d'oscillation pointent toutes vers un  $\Delta m^2 \approx 1 \text{ eV}^2$
- Les anomalies détectées ne concernent toutes que des taux de comptage! Nous avons besoin d'une mesure mettant en évidence le "pattern" d'oscillation à la fois en énergie et en distance.
- A l'heure actuelle plus de 20 projets sont en cours d'étude pour trancher définitivement la question du neutrino stérile avec une masse de l'ordre de l'eV...



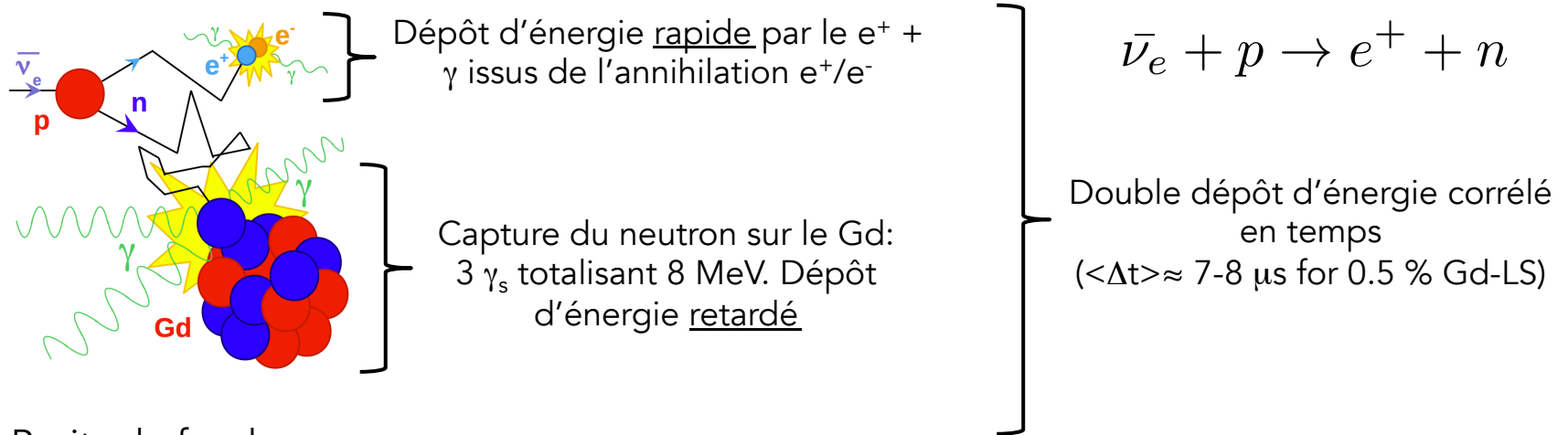
Backup slides

# Un florilège de projets en cours...

Experiment type	Appearance/ Disappearance	Oscillation channel	Projects
Reactor	Disappearance	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$	Nucifer, Stéreo, Scraam, Neutrino-4, DANSS, Poséidon, Mars,...
Radioactive source	Disappearance	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ $\nu_e \rightarrow \nu_e$	CeLAND, SoX, Sage2, SNO+, LENS-S,...
Cyclotron	Disappearance	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$	IsoDAR
Pion/Kaon decay-at-rest	Appearance & Disappearance	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ $\nu_e \rightarrow \nu_e$	OscSNS, CLEAR, DAEδALUS, KDAR
Pion decay in flight	Appearance & Disappearance	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ $\nu_e \rightarrow \nu_e$	MINOS+, MicroBooNE, Lar1kton+MicroBooNE, Icarus/Nessie @ CERN
Low-E neutrino factory	Appearance & Disappearance	$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ $N_e \rightarrow \nu_e$	$\nu$ STORM @ Fermilab

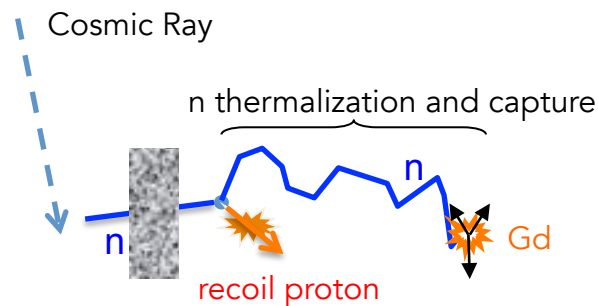
# Désintégration beta inverse

- Signal: désintégration beta inverse sur protons dans la cible à neutrinos



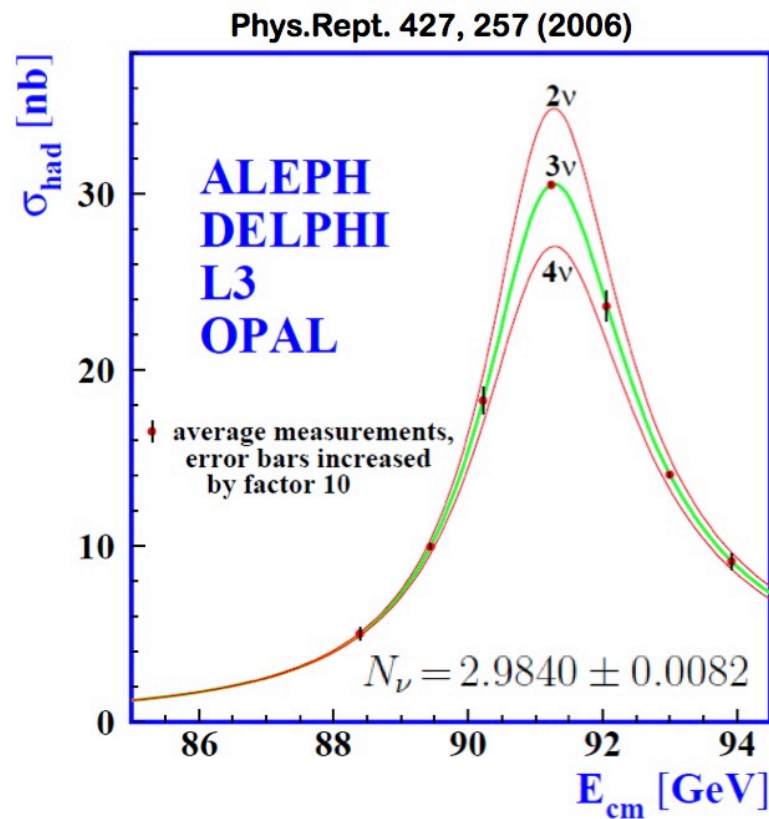
- Bruits de fond:

- **Accidentel**, venant principalement des  $\gamma$  du réacteur (7 m du coeur...!) et radioactivité intrinsèque des matériaux faisant le détecteur. Pas de corrélation en temps.
- **Corrélé**, venant des neutrons de spallations des rayons cosmiques sur la matière environnante.



# Neutrino stérile

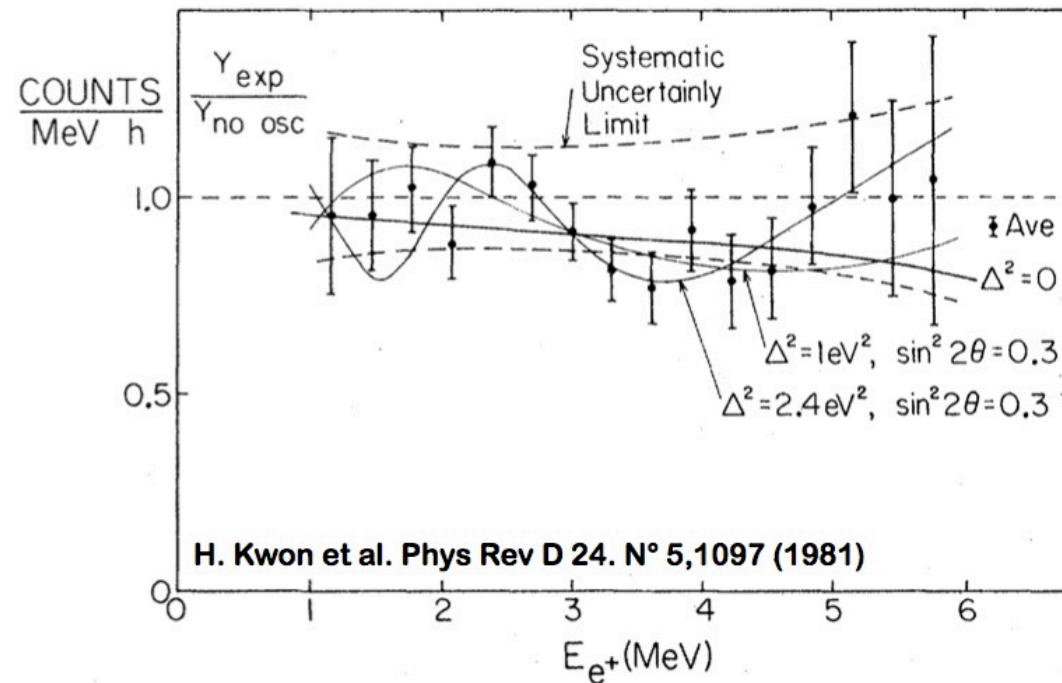
- Lepton n'ayant aucune interaction avec les particules du modèle standard
- Trois neutrinos actifs seulement autorisés dans le modèle standard:



Mesure de la résonance du Z (données de LEP)

# La mesure de l'ILL

- Spectromètre placé à 8 m du coeur, expérience menée au début des années 80.
- Ré-analyse des données en 1995 pour corriger de la surestimation du flux de neutrino de l'ILL (10%). Change uniquement le taux de comptage, un déficit de 20% subsiste...!



- Grosses incertitudes, mais pattern d'oscillation visible à l'œil !??