

# jrjc 2011

Journées de Rencontre des Jeunes Chercheurs  
Du 4 au 10 décembre

$\nu_e$   
 $\nu_\mu$   
 $\nu_\tau$

- Cosmologie
- Médecine nucléaire
- Interaction forte
- Physique hadronique
- Applications de la physique nucléaire
- Astrophysique nucléaire
- Astroparticules
- Neutrinos
- Structure nucléaire
- Dynamique nucléaire
- Au-delà du modèle standard
- Modèle standard électrofaible
- Energie nucléaire
- Instrumentation

Les Balcons du Lac d'Annecy

Infos et Inscriptions : <http://jrjc2011.free.fr>

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

*Antoine Cazes*  
*6 décembre 2011*



Lyon 1  
Université Claude Bernard

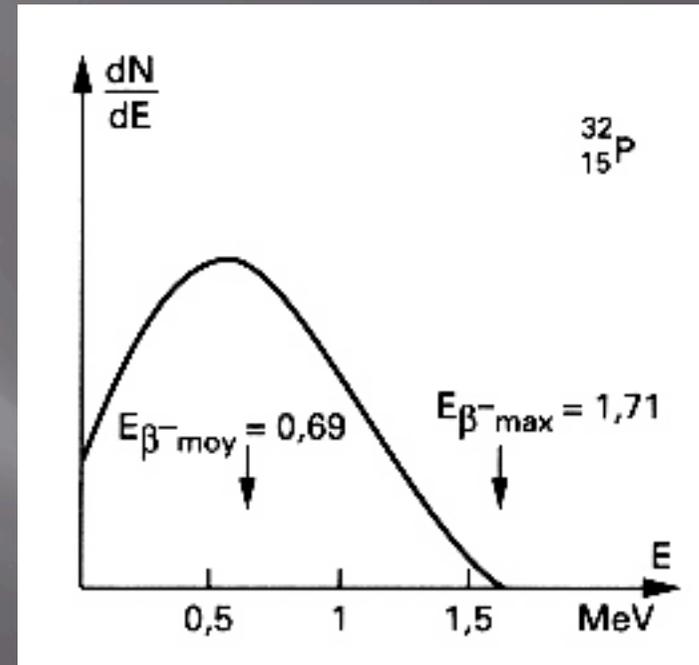


# Une idée désespérée

- Désintégration  $\beta$  :



- 1930 : Dans une lettre à ses amis Radioactifs, Wolfgang Pauli propose une solution désespérée pour expliquer le spectre beta : Une particule supplémentaire, le neutron.
- 1933, Chadwick découvre le neutron (le vrai!)
- 1934, Fermi écrit sa théorie de l'interaction faible, y incluant le « petit neutron », le neutrino



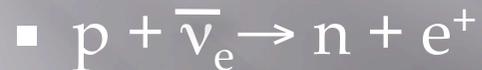
# Majorana

- ▣ Les neutrinos sont toujours gauche
- ▣ Les anti-neutrinos sont toujours droit.
- ▣ Majorana propose que la différence de chiralité est suffisante et que neutrinos et anti-neutrinos sont les mêmes particules
- ▣ Voir la présentation de Sophie Blondel



# La découverte : Exp de Reines et Cowan

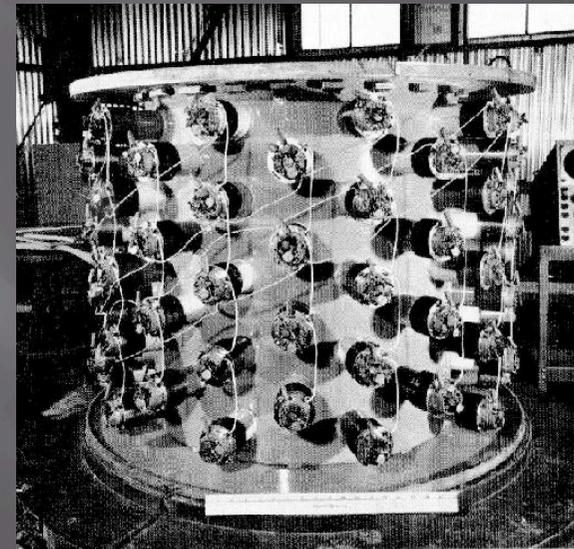
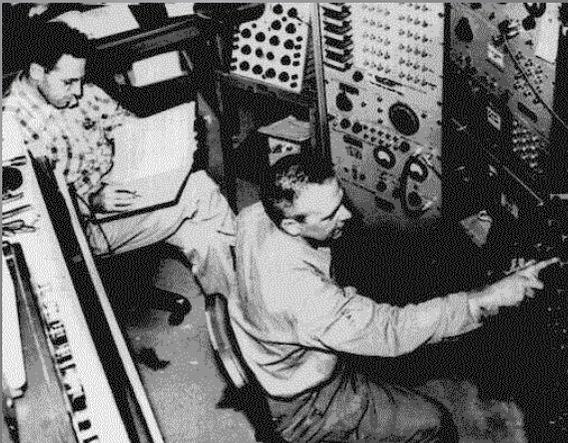
▣ 1956: Un réservoir d'eau près de la central de Savannah river (USA), équipé de PM.



▣ 2  $\gamma$  de 511keV



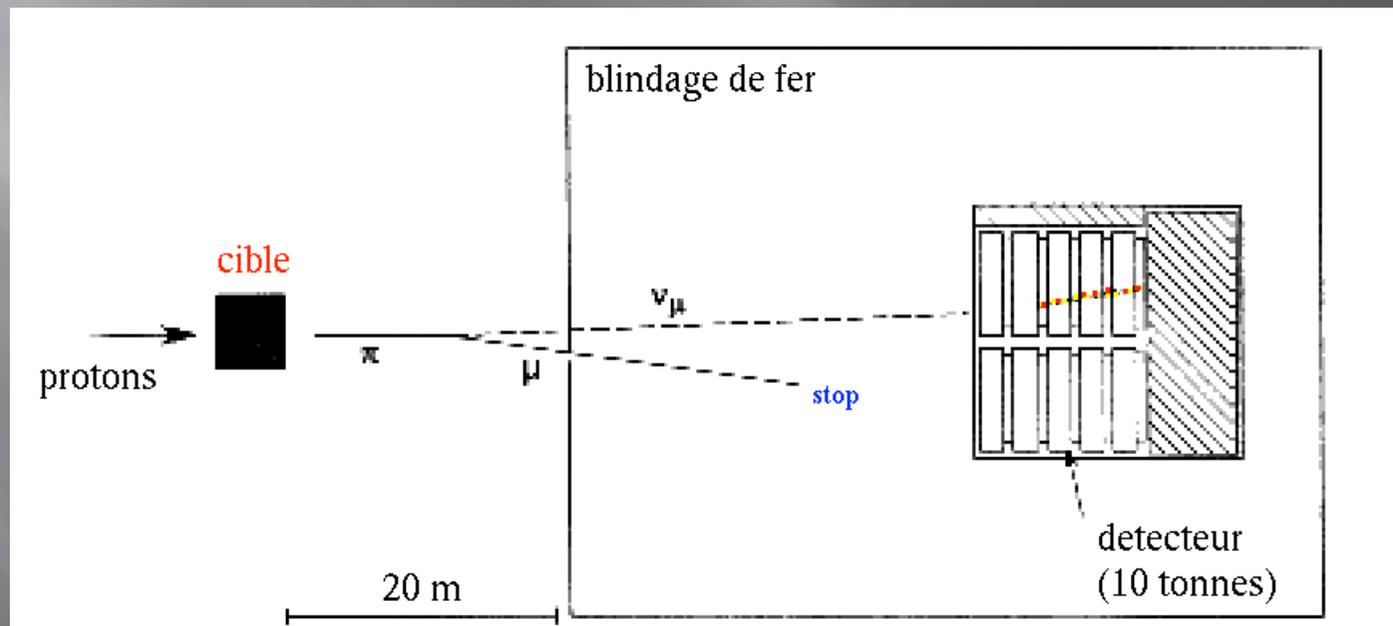
▣  $\gamma$  du Cd retardé de 5 $\mu$ s



▣ Ils prennent des données avec le réacteur allumé et éteint, et il prouve l'existence du  $\nu_e$

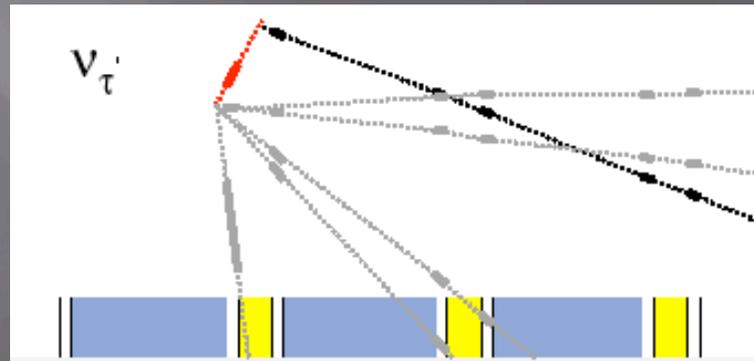
# Le neutrino mu

- 1962 : Jack Steinberger, Melvin Schwartz et Leon Lederman lance des pcrée le premier faisceau de neutrino ( $\nu_\mu$ ) pour découvrir le neutrino muonique dans une chambre à étincelles.



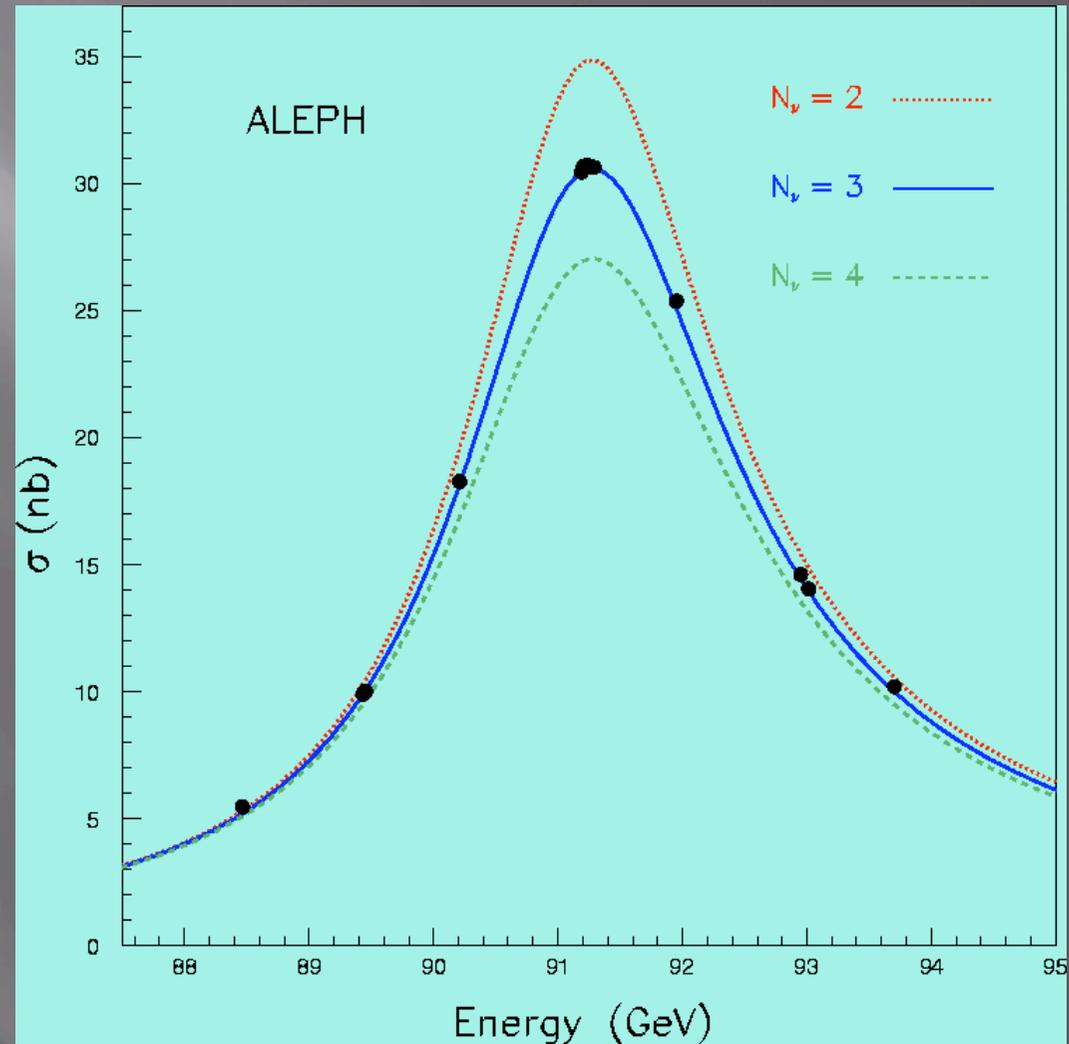
# Le neutrino tau.

- ▣ Il faut attendre l'an 2000 pour voir enfin le neutrino tau.
- ▣ Un faisceau de  $\nu_\tau$  est créé par la désintégration de méson charmé produit par l'interaction du faisceau de protons du Tevatron sur une cible de tungstène.
- ▣ Les interactions de  $\nu_\tau$  sont détectées par la technique des émulsions photographique.

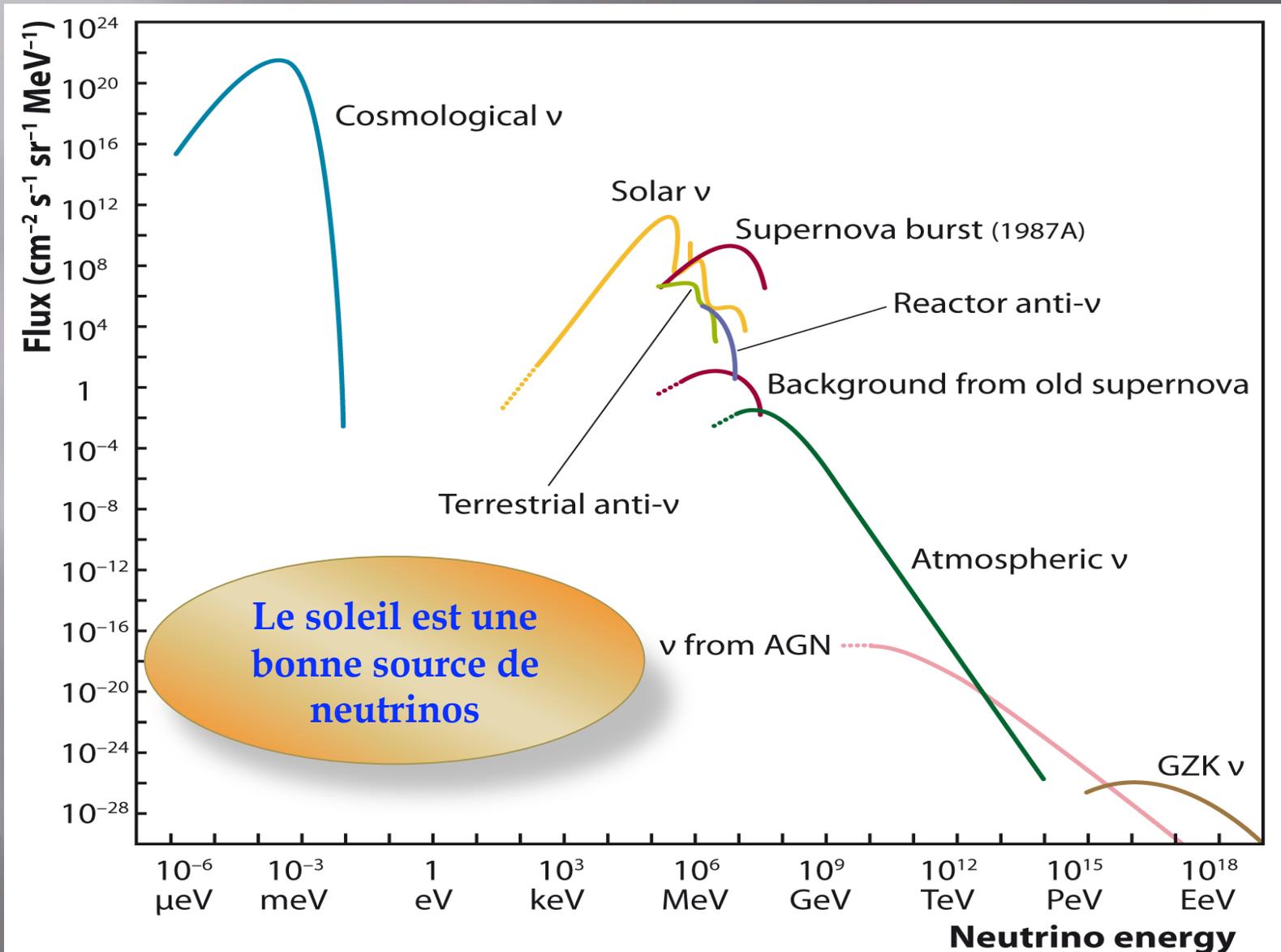


# Mais on savait qu'il devait exister:

- ▣ La largeur du Z dépend du nombre de canaux de désintégration.
- ▣  $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$
- ▣ Mesure du LEP

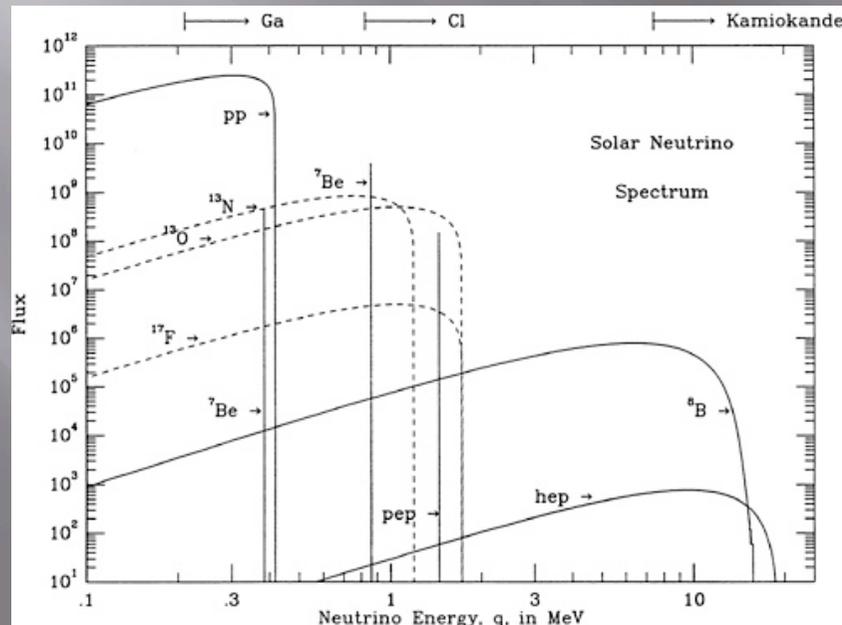


# Les sources de neutrinos



# Homestake

- 1970/94 : Experience de Davis dans la mine d'or de Homestake (South Dakota)
- Utilise la réaction
$$^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$$
- Flux prédit par J. Bahcall



**Il manque la  
moitié des  
neutrinos!!!**

# Les oscillations de neutrinos

- ▣ Idée de Bruno Pontecorvo.

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} = | \langle \nu_\beta | e^{-iHt} | \nu_\alpha \rangle |^2.$$

$$H = \sqrt{p_\nu^2 + m^2} \simeq p_\nu + \frac{m^2}{2p_\nu} = p_\nu + \frac{m^2}{2E_\nu}$$

$$P_{\alpha \rightarrow \beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{1,27 \Delta m_{12}^2 L}{E_\nu} \right)$$

# Et avec 3 neutrinos

$$U = \begin{matrix} \Delta m_{31}^2 & \Delta m_{31}^2 & \Delta m_{21}^2 \\ \left( \begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{array} \right) & \left( \begin{array}{ccc} c_{13} & 0 & e^{-i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{array} \right) & \left( \begin{array}{ccc} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \\ \text{atmos+LBL(dis)} & \text{Chooz+LBL(app)} & \text{solar+KamLAND} \end{matrix}$$

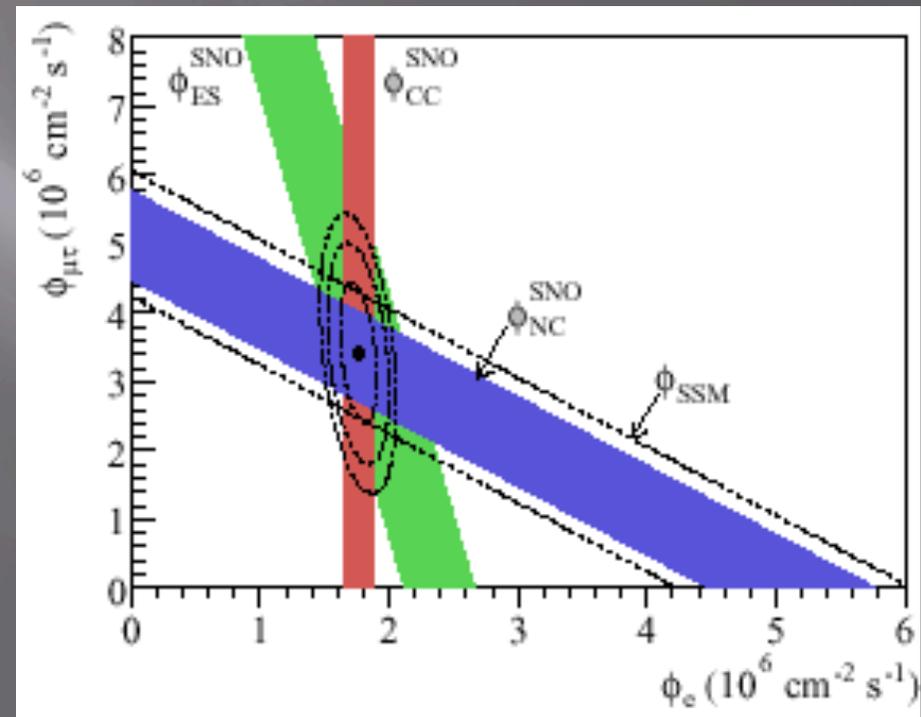
3-flavour effects are suppressed:  $\Delta m_{21}^2 \ll \Delta m_{31}^2$  and  $\theta_{13} \ll 1$  ( $U_{e3} = s_{13}e^{-i\delta}$ )

$\Rightarrow$  dominant oscillations are well described by effective two-flavour oscillations

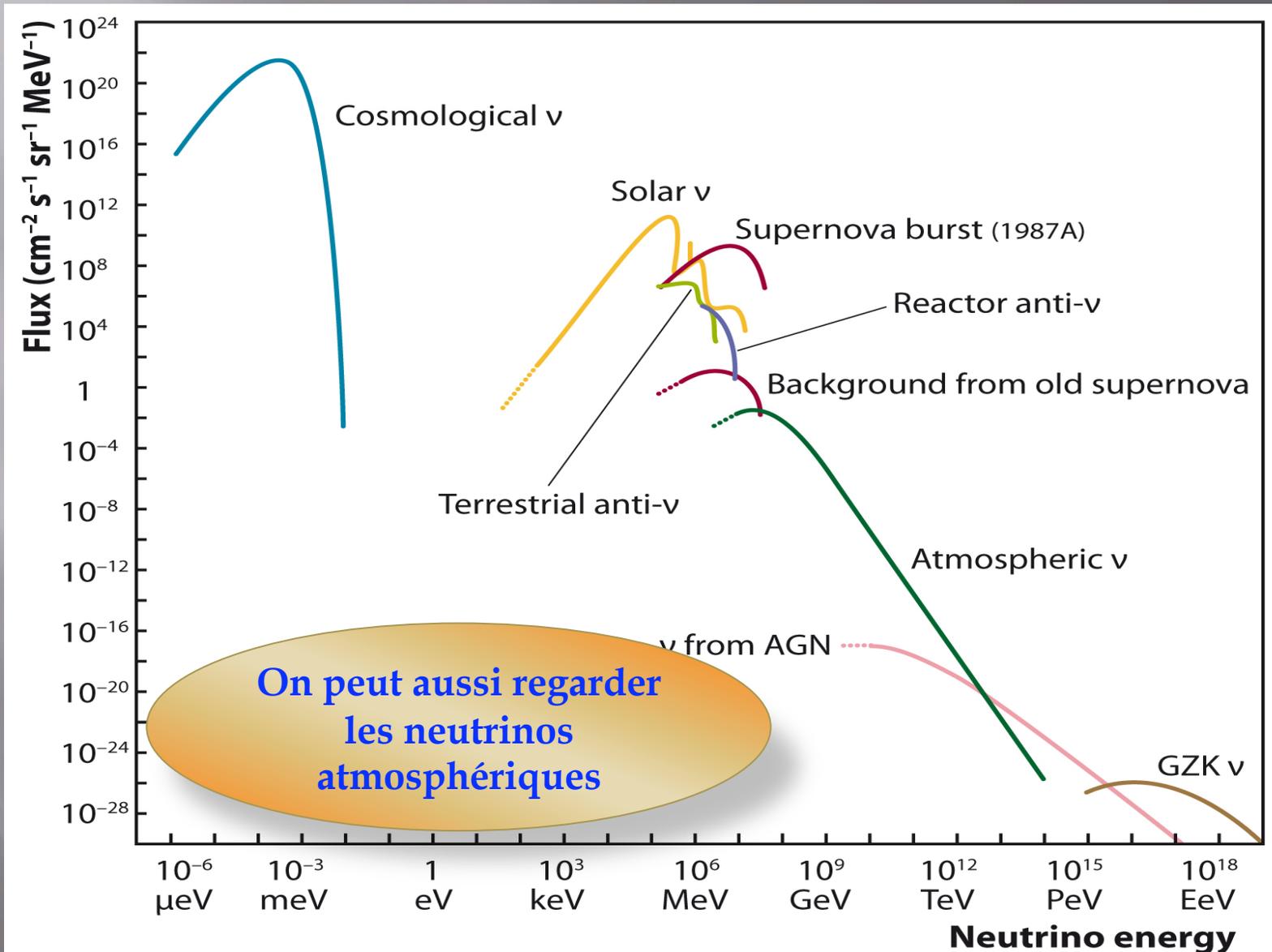
$\Rightarrow$  CP-violation is suppressed by  $\theta_{13}$  and  $\Delta m_{21}^2/\Delta m_{31}^2$

# Les neutrino solaire : La conclusion : SNO

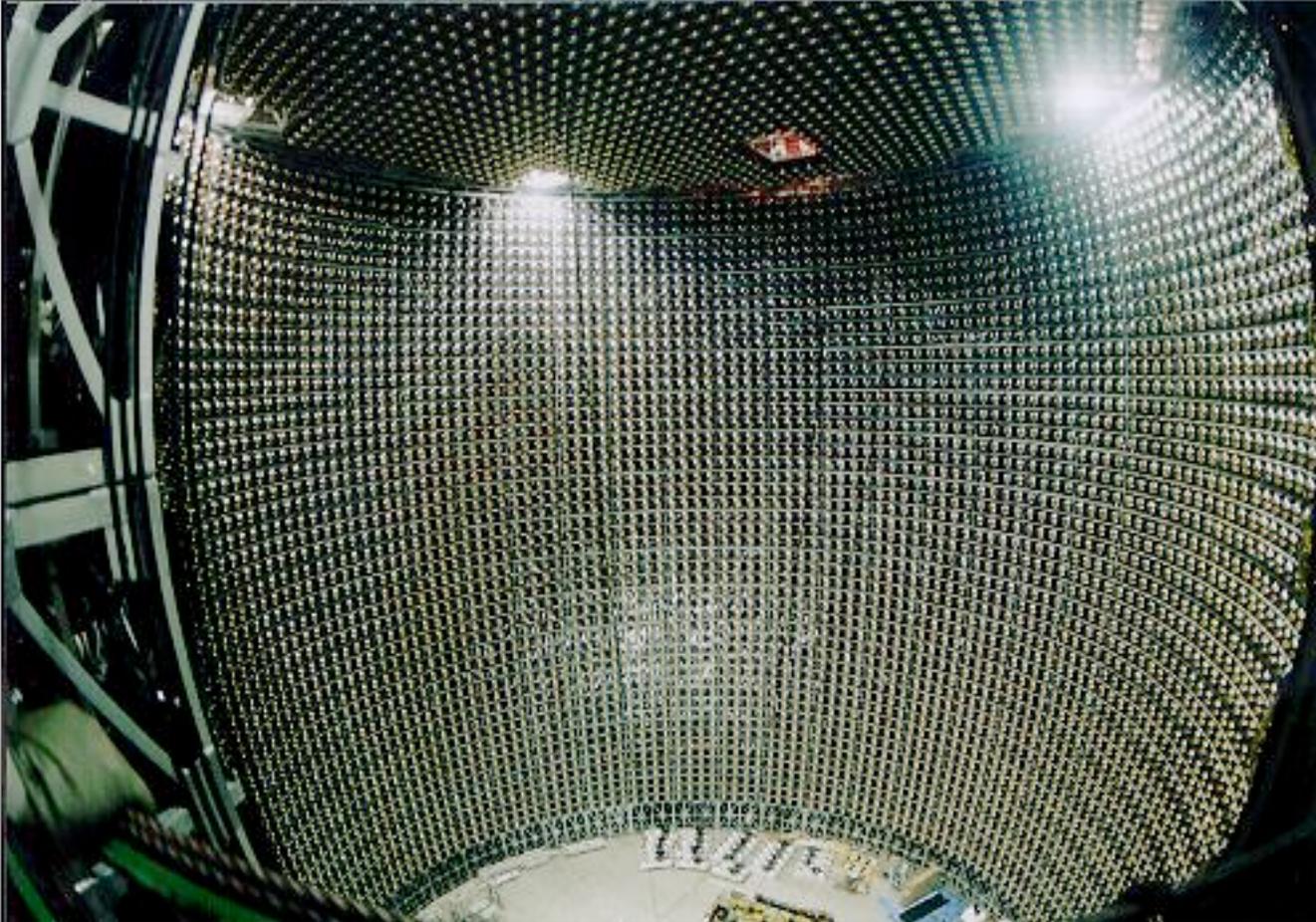
- ▣ Pour l'an 2000
- ▣ Preuve directe : SNO (D<sub>2</sub>O)
  - Interaction courants chargés
    - $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$
  - Interaction courants neutres
    - $\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$
  - Interaction quasi élastique
    - $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$



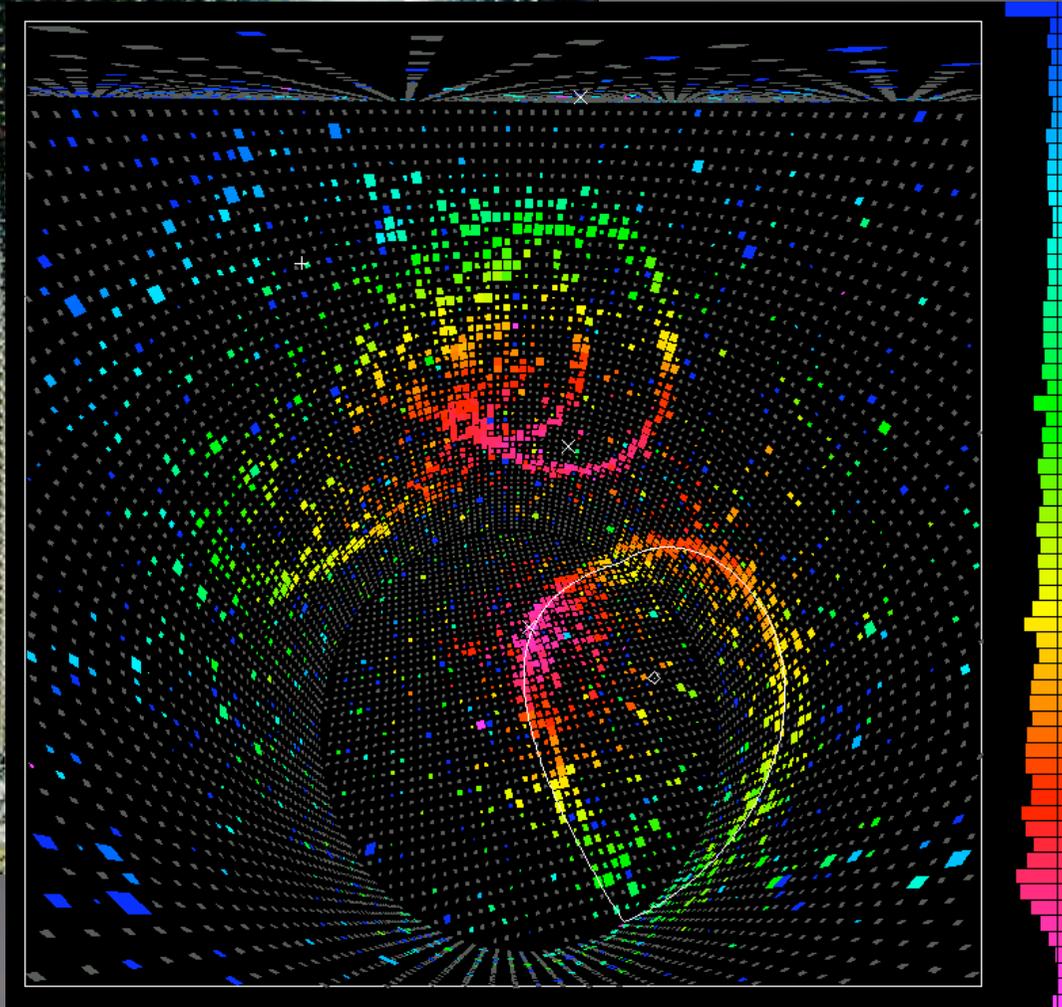
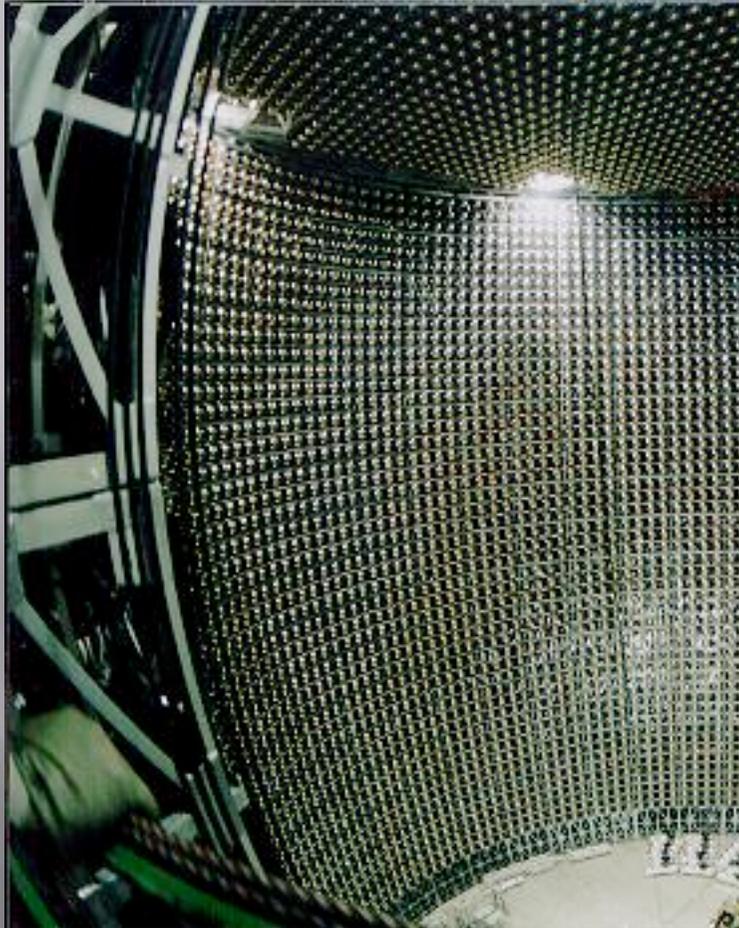
# Les sources de neutrinos



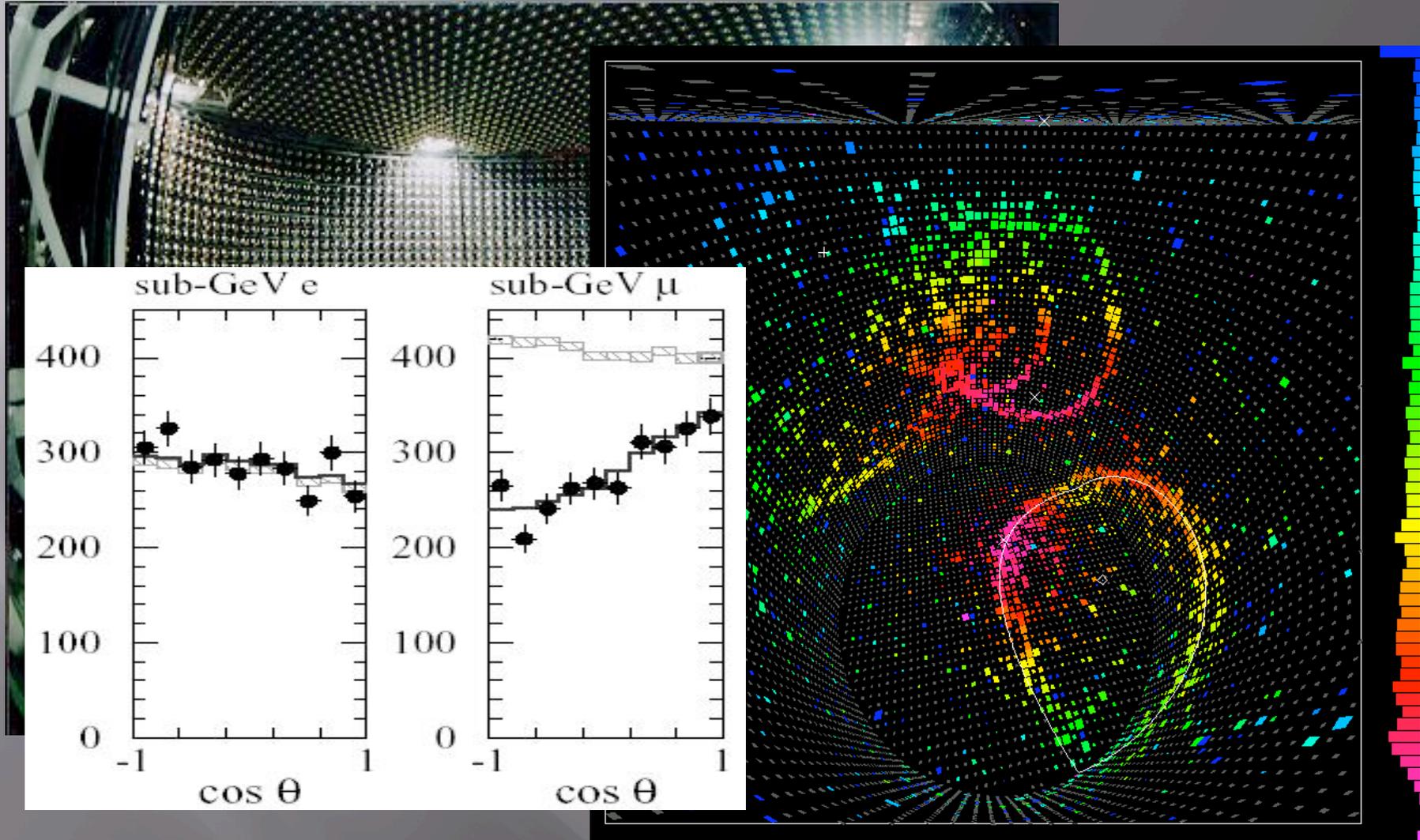
# Super Kamiokande



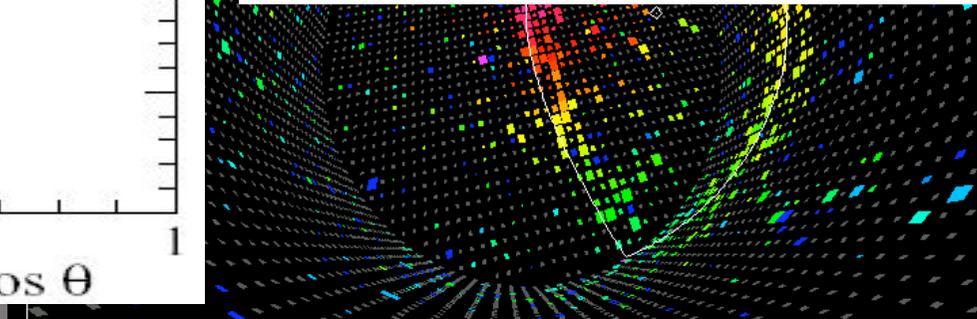
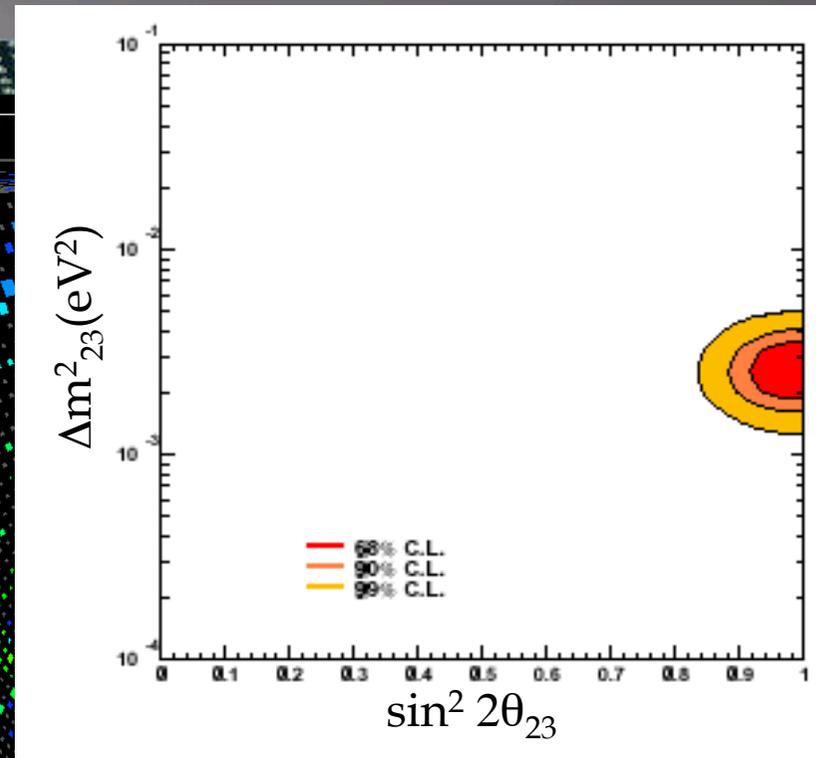
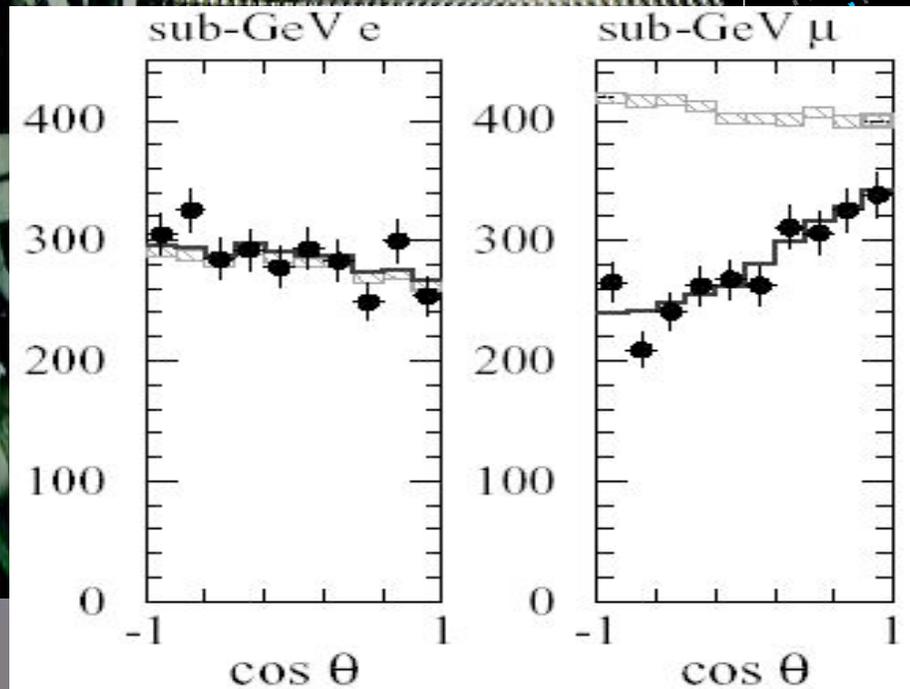
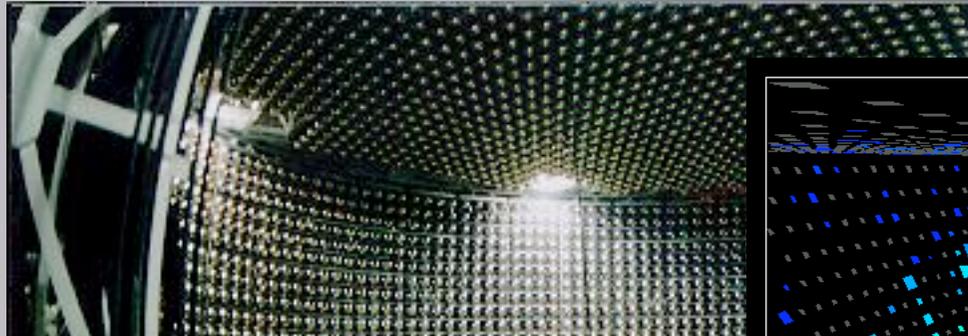
# Super Kamiokande



# Super Kamiokande



# Super Kamiokande

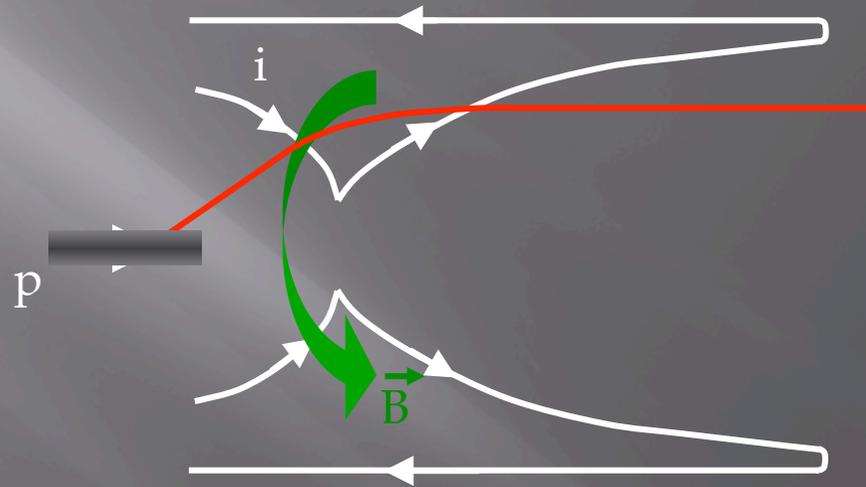


# Les faisceaux de neutrino

- On frappe une cible avec des protons
- Les pions et les kaons d'un signe sont focalisés à l'aide d'une «corne»

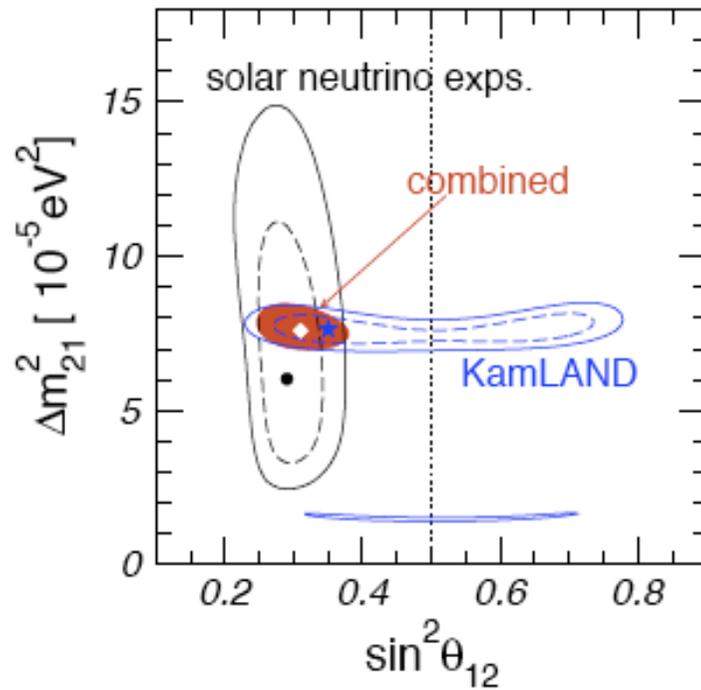


S. Van der Meer, 1961

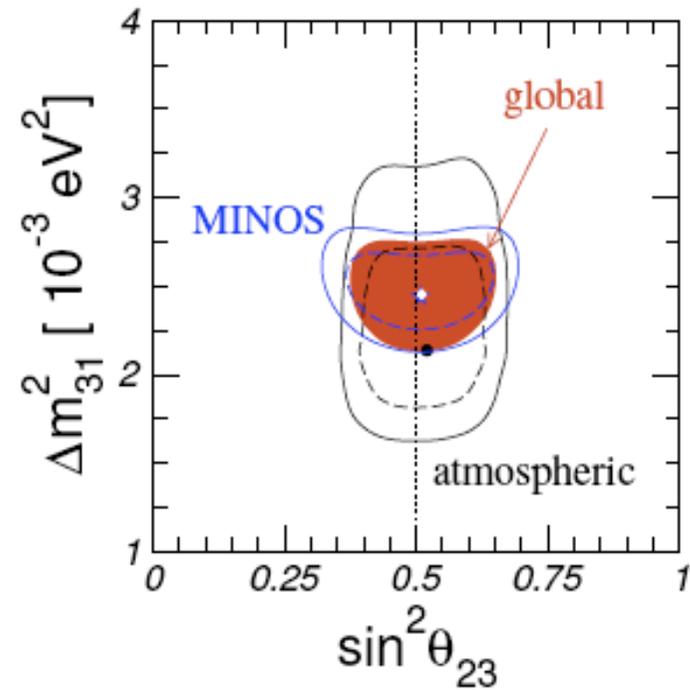


- Long base Line :
  - K2K (Japon), Minos (USA)
    - Expériences de disparition
    - Mesure précise des paramètres atmosphérique
  - OPERA (Europe)
    - Expérience d'apparition.

# Résultats actuels



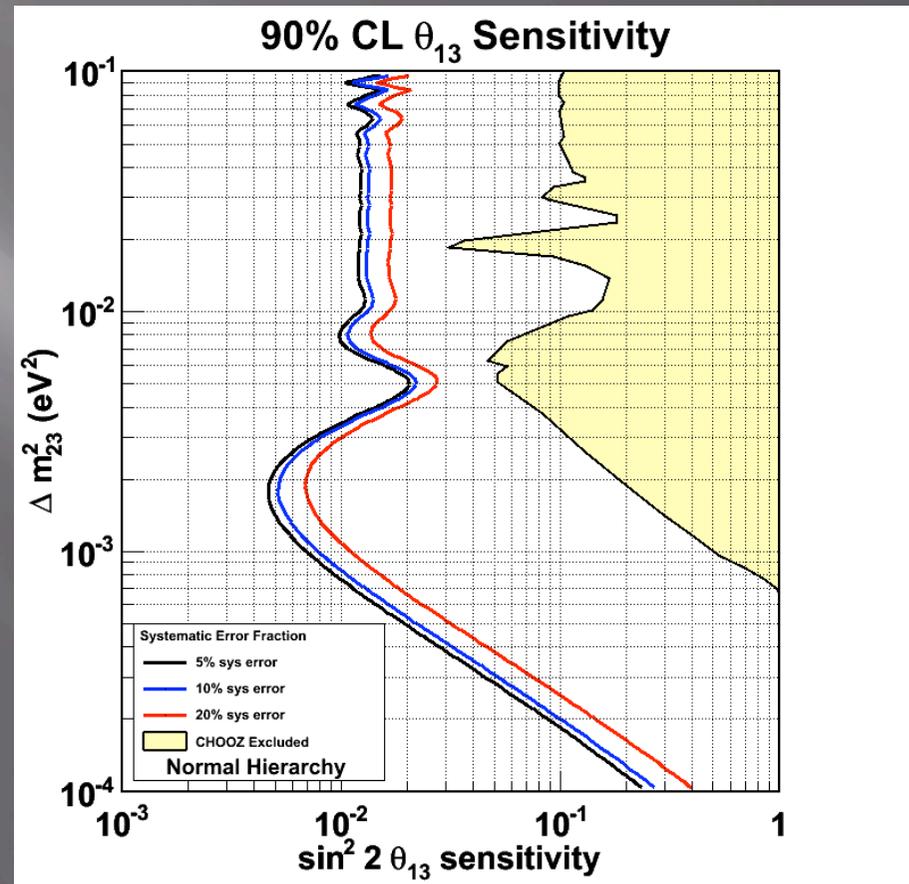
$$\sin^2 \theta_{12} \approx 0.3$$



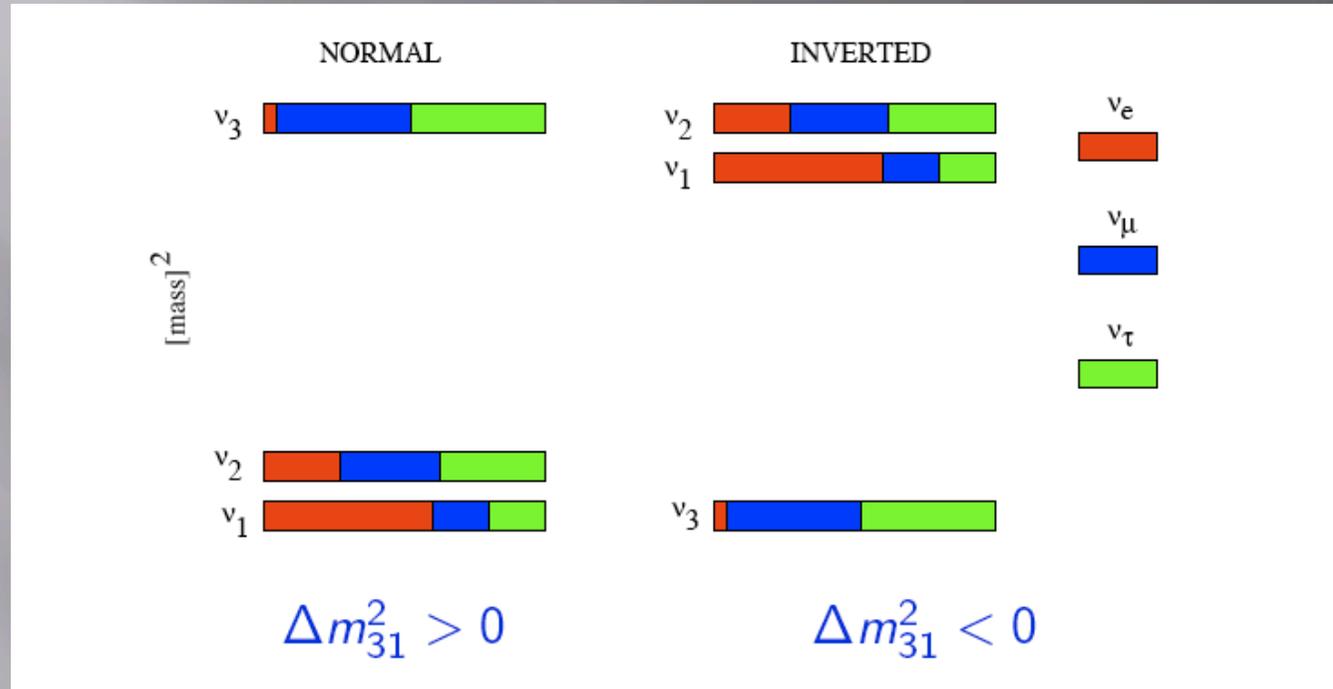
$$\sin^2 \theta_{23} \approx 0.5$$

# Le dernier angle de mélange : $\theta_{13}$

- Pendant près de 20 ans, l'expérience CHOOZ dans les Ardenne à tenue la meilleure limite sur  $\theta_{13}$ .
- Recherche active :
  - T2K
  - Double Chooz/Daya Bay/RENO
- Nouveauté depuis quelque mois!!!
- Voir présentation de Laura Zambelli

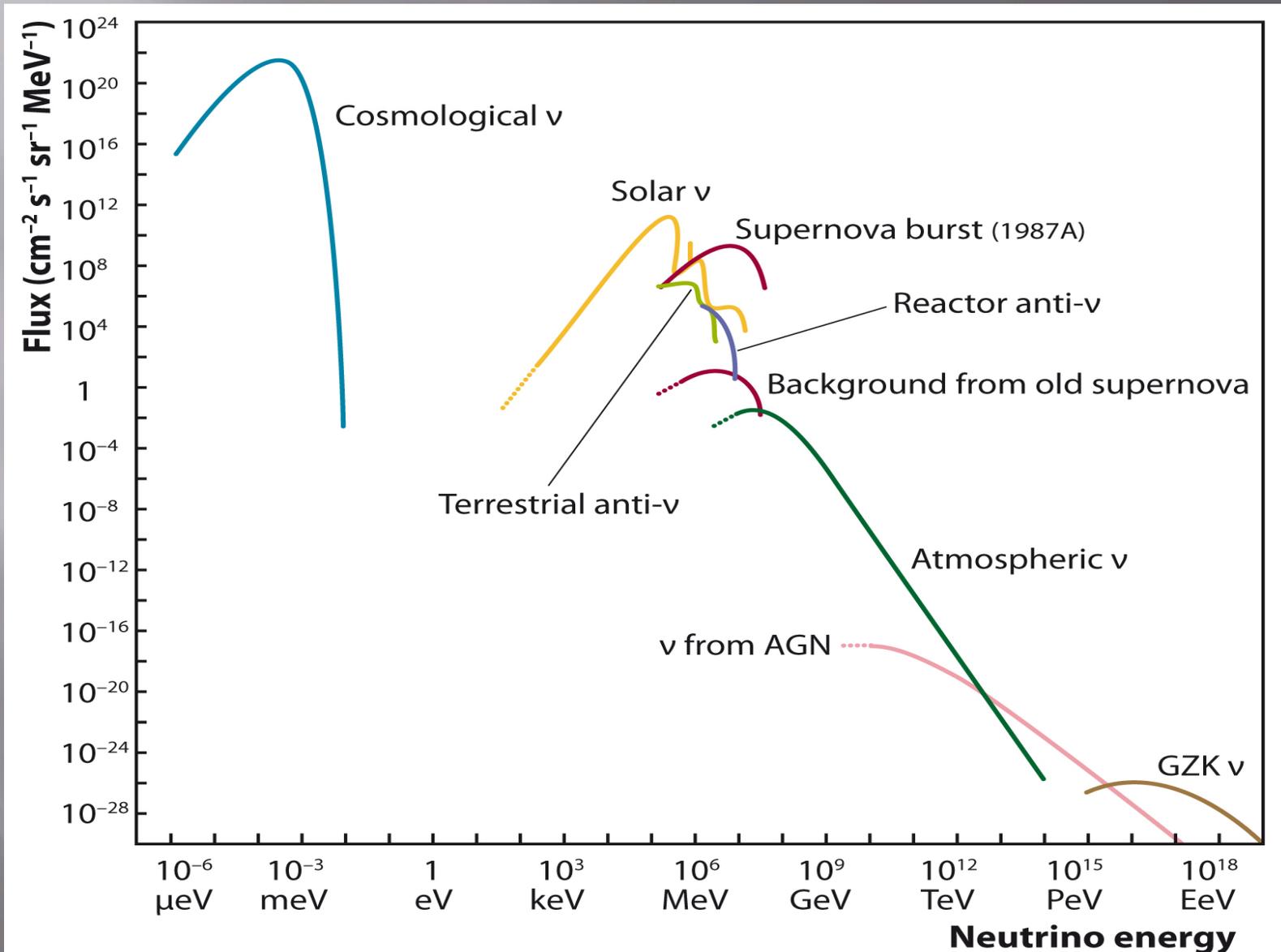


# Bilan :

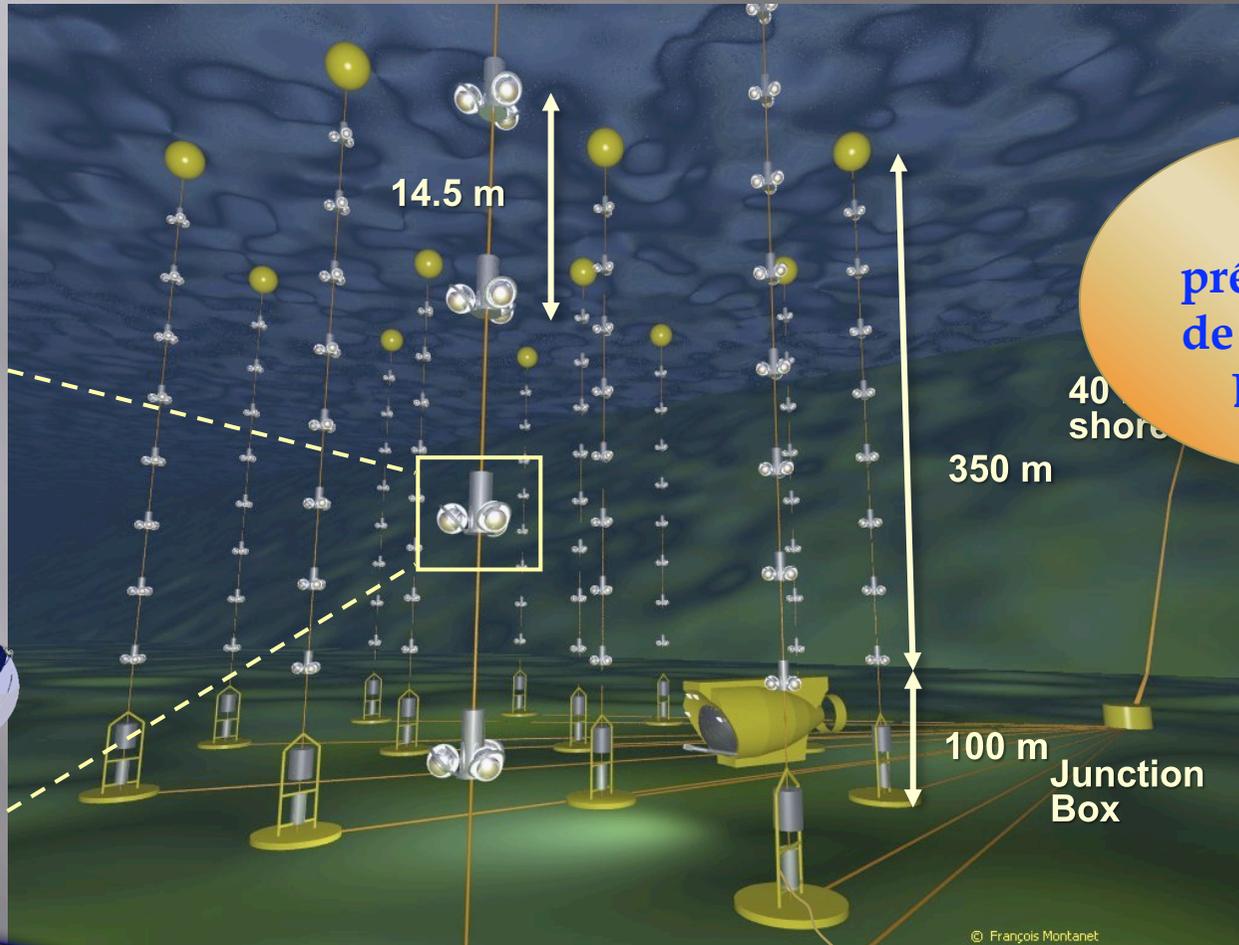
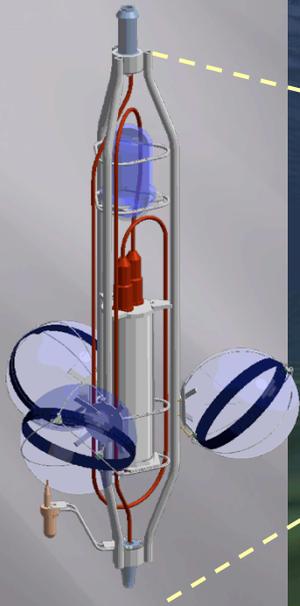


- Masse encore inconnu
- On est sur la voie de  $\theta_{13}$ , et  $\delta_{CP}$ ?
- Majorana?

# Les sources de neutrinos



# ANTARES

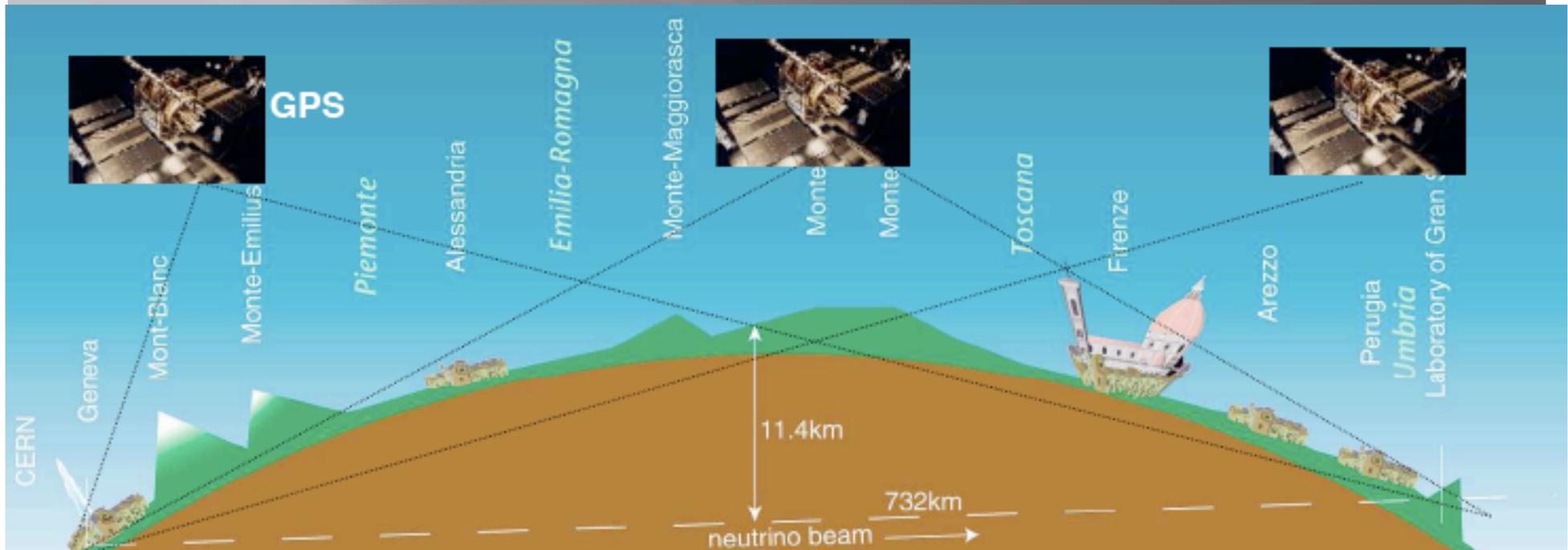


Voir la  
présentation  
de Boutayeb  
Bouhou



Dans la mer Méditerranée  
(pres de Toulon) à **2475 m** de  
profondeur.

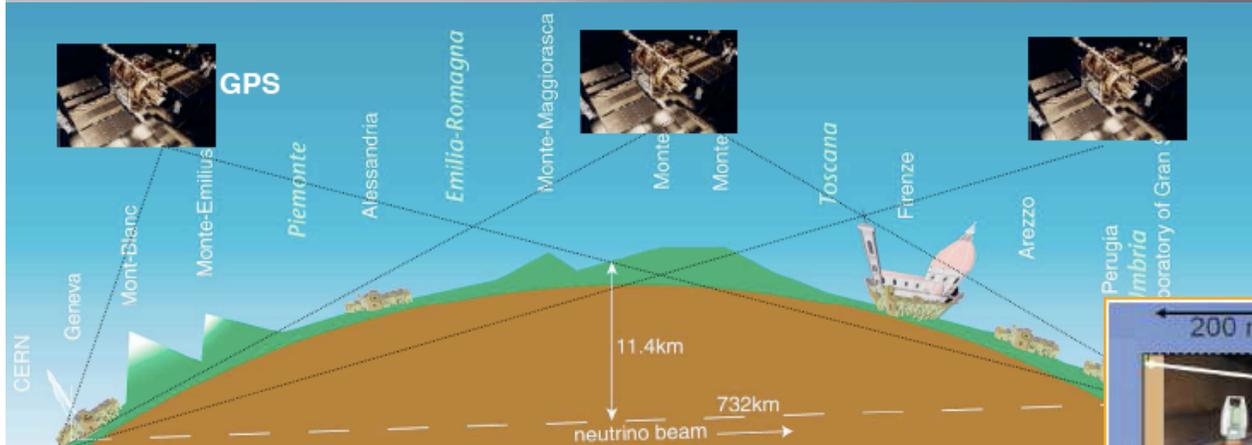
# La dernière surprise des neutrinos



Mesure de la distance  
 $731278.0 \text{ m} \pm 20 \text{ cm}$

Résultat  
 $\Delta t = 57.8 \pm 7.8 \text{ (stat.)}$   
 $+8.3-5.9 \text{ (sys.)}$

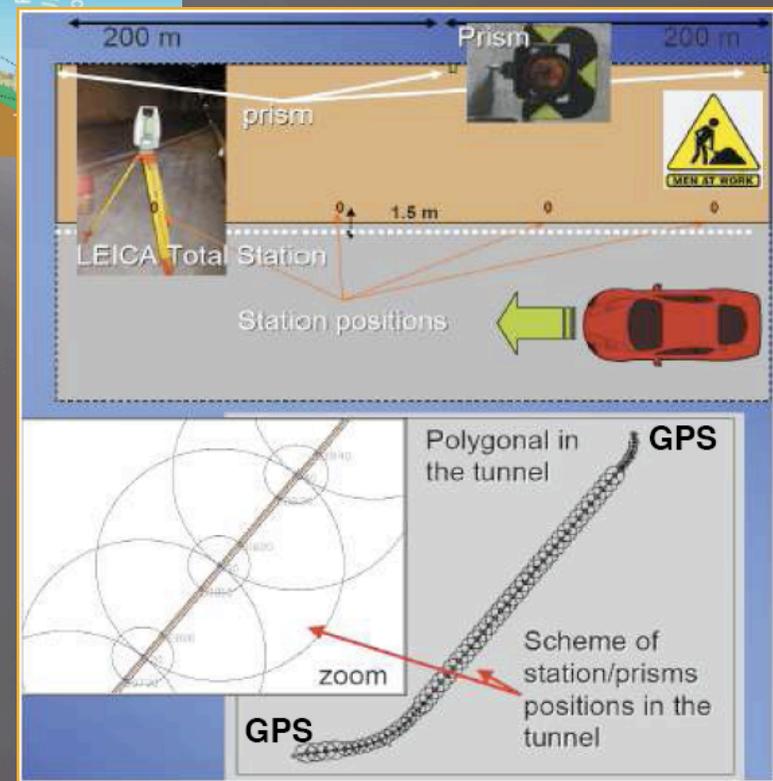
# OPERA : Mesure de la vitesse des neutrinos.



- On utilise le GPS
- Résolution  $\sim 1\text{cm}$  à l'extérieur du tunnel

- On mesure ensuite la distance avec des outils de géomètre.
- Une mesure tous les 10m en partant de chaque coté du tunnel

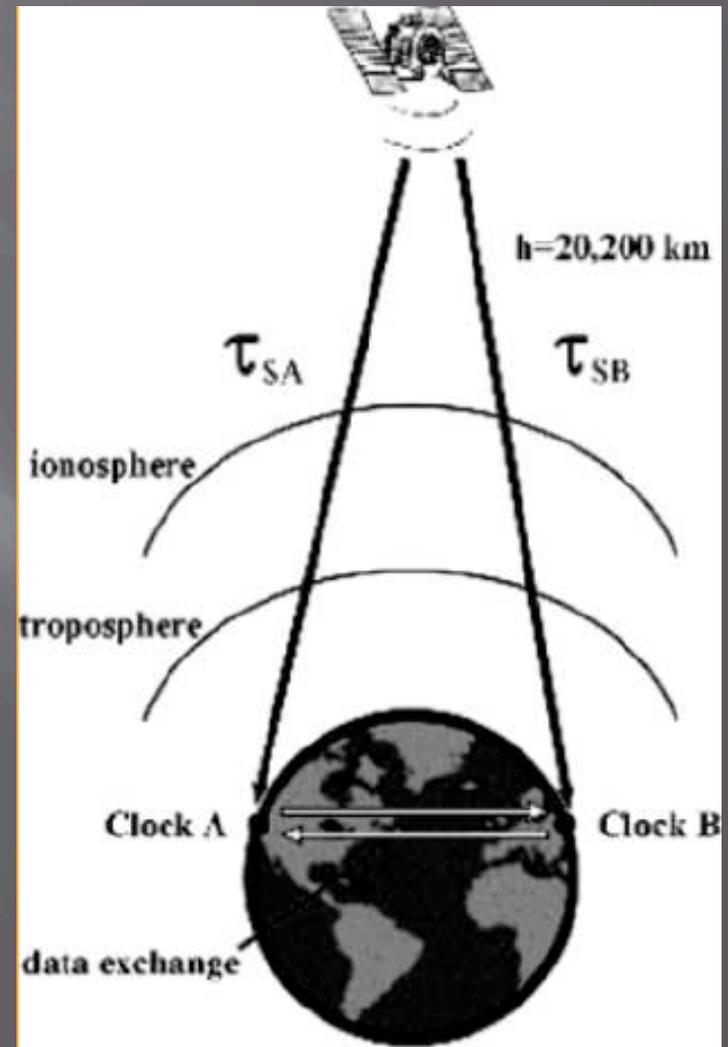
Résultat final :  
 $731278.0 \text{ m} \pm 20 \text{ cm}$



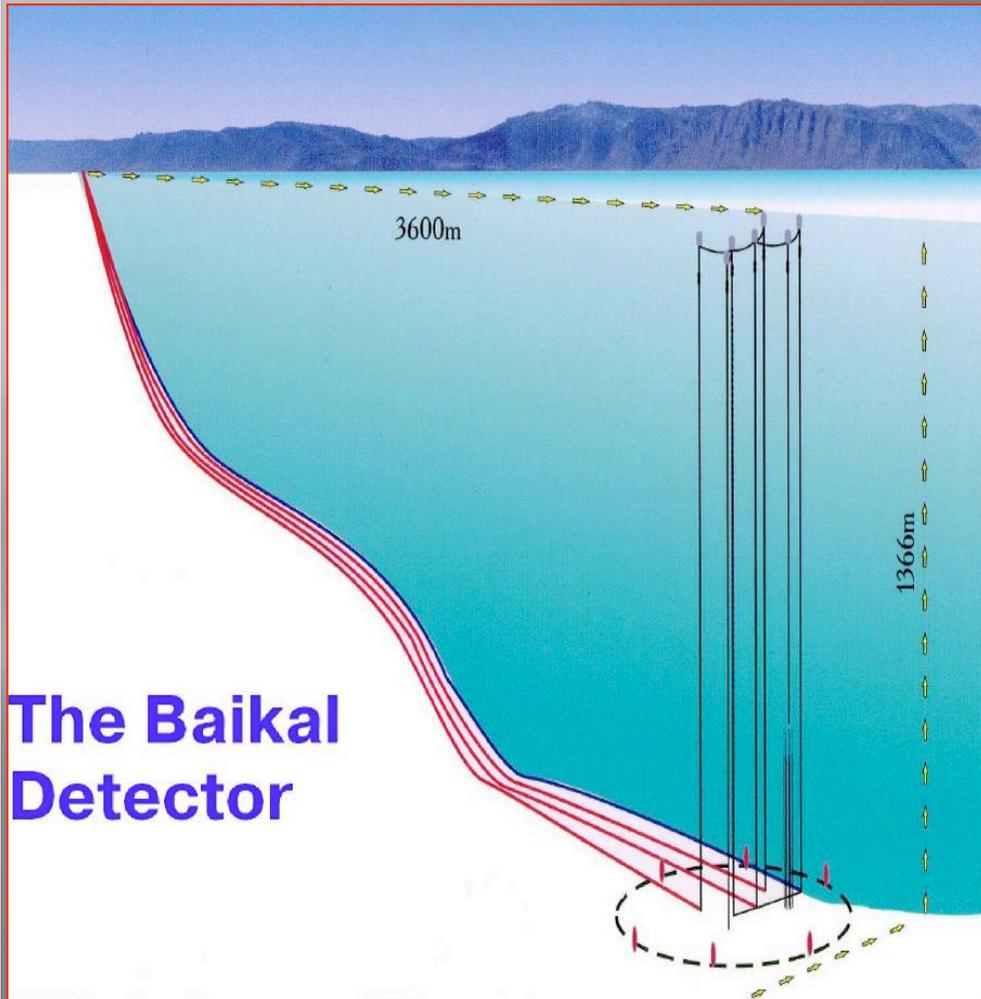
# Synchronisation du temps

- GPS utilisé en common-view mode : même satellite pour les deux sites.
- Résolution  $\sim 1\text{ns}$

Résultat  
 $\Delta t = 57.8 \pm 7.8$  (stat.)  
 $+8.3-5.9$  (sys.)



# Les télescopes à Neutrino



ICECUBE

