

# Physique des Neutrinos :

Le point de vue (subjectif!) d'un expérimentateur

Thierry Pradier

pradier@in2p3.fr

Université Louis-Pasteur Strasbourg-I

&

IPHC::DRS



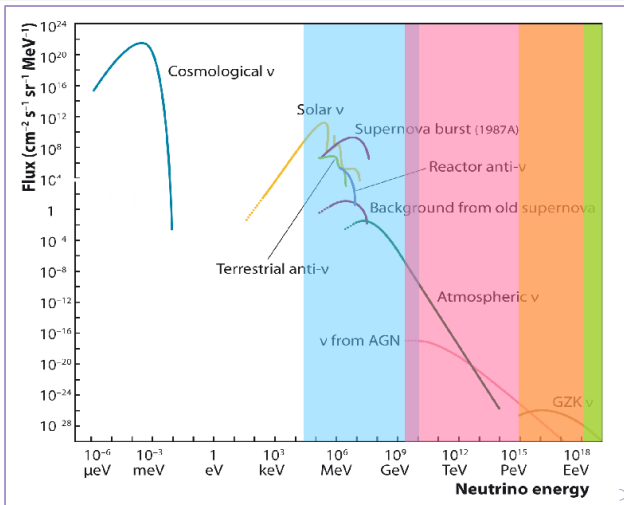


## Physique des $\nu$ ...les sources



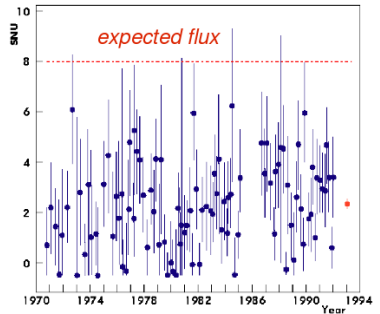
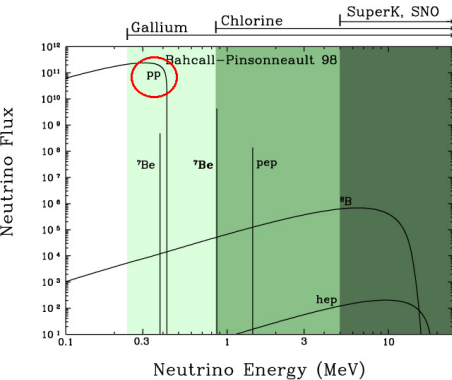
## Les sources de neutrinos

- Sous la roche
- Sous l'eau/la glace
- Acoustique/Radio
- Air Showers



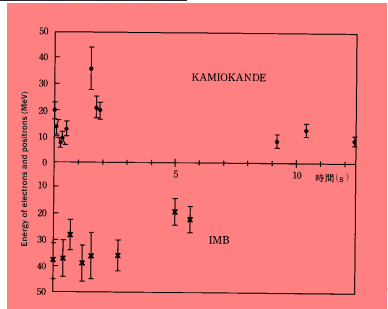
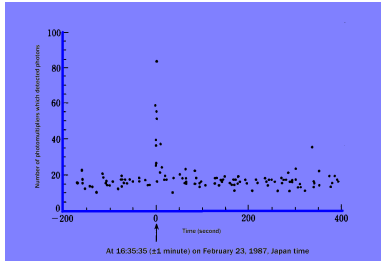
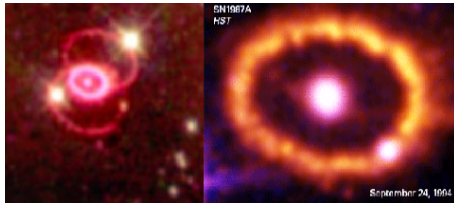


# 1968 : l'énigme *fondatrice* des $\nu$ solaires

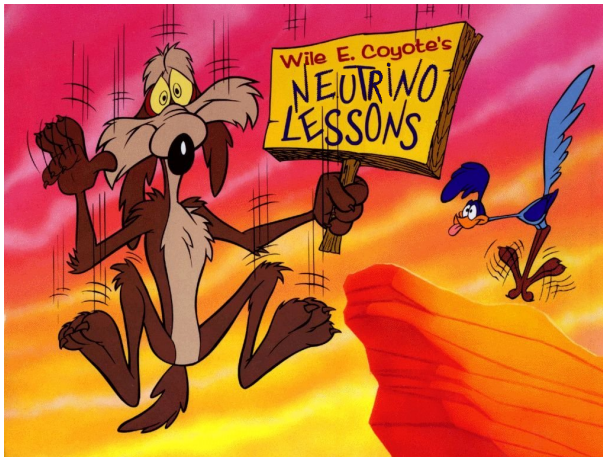


HomeStake Data (from 1968)

# 1987 : la naissance de l'astronomie $\nu$



## Physique des $\nu$ : les oscillations



## Matrice de Mélange et Observables

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Matrice de Mélange Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo (MNSP)

# Matrice de Mélange et Observables

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \times \\
 \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\alpha}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\frac{\alpha}{2}+i\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

# Matrice de Mélange et Observables

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \times \\
 \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\alpha}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\frac{\alpha}{2} + i\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Contraintes exp. sur 23 :  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

- $\Delta m_{23}^2 = 2.38_{-0.16}^{+0.2} \times 10^{-3} eV^2$
- $\sin^2 \theta_{23} = 1.00_{-0.08}$

# Matrice de Mélange et Observables

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \times \\
 \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\alpha}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\frac{\alpha}{2}+i\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Contraintes exp. sur 13 :  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ ,  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

- $\Delta m_{13}^2 \simeq \Delta m_{23}^2$
- $\delta_{CP}$  inconnue
- Hiérarchie inconnue,  $\sin^2 \theta_{13} \lesssim 0.03$

# Matrice de Mélange et Observables

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \times \\
 \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\alpha}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\frac{\alpha}{2}+i\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Contraintes exp. sur  $12 : \nu_e \rightarrow \nu_\mu, \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$

- $\Delta m_{12}^2 = 8.2_{-0.5}^{+0.6} \times 10^{-5} \text{eV}^2$
- $\tan^2 \theta_{12} = 0.4_{-0.07}^{+0.09}$



# Matrice de Mélange et Observables

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \times \\
 \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\alpha}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\frac{\alpha}{2}+i\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

## Contraintes expérimentales sur le secteur de la masse

- $m_{\text{lightest}} \lesssim 2.2 \text{ eV}$
- Nature : Majorana  $\nu = \bar{\nu}$  ou Dirac inconnue

# Probabilité d'Oscillation

- Probabilité de Transition :

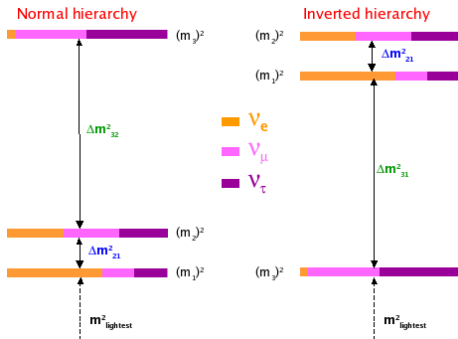
$$P(\nu_\alpha \longrightarrow \nu_\beta) = \left| \sum U_{\beta k} e^{-i \frac{E_k t}{\hbar}} U_{\alpha k}^* \right|^2$$

- Pour un neutrino d'énergie  $E$ , après une distance parcourue  $L$  :

$$P(\nu_\alpha \xrightarrow{\alpha \neq \beta} \nu_\beta) = -4 \sum_{i \neq j} \cos \theta_{ij} \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m_{ij}^2 L}{E} \right)$$

- Transition si masses non-nulles et différentes !

# Hiéarchies de masses et manip possibles



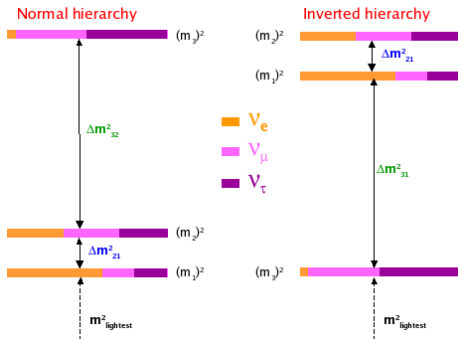
Distinction suivant  $\frac{L}{E}$  :

- $\frac{L}{E} \ll 1$   
 $\Rightarrow$  Neutrinos Atmosphériques  
 $\Rightarrow P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$  indep. de  $\theta_{12}$ ,  $\delta m$
- $\frac{L}{E} \gg 1$   
 $\Rightarrow$  Neutrinos Solaires  
 $\Rightarrow P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$  indep. de  $\Delta m$

- $\Delta m_{13} \simeq \Delta m_{23} = \Delta m$ ,

- $\Delta m_{12} = \delta m \ll \Delta m$

# Hierarchies de masses et manip possibles



Distinction suivant  $\frac{L}{E}$  :

- $\Delta m_{13} \simeq \Delta m_{23} = \Delta m$ ,
- $\Delta m_{12} = \delta m \ll \Delta m$

- $\frac{L}{E} \ll 1$   
 $\Rightarrow$  Neutrinos Atmosphériques  
 $\Rightarrow P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$  indep. de  $\theta_{12}$ ,  $\delta m$
- $\frac{L}{E} \gg 1$   
 $\Rightarrow$  Neutrinos Solaires  
 $\Rightarrow P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$  indep. de  $\Delta m$

$\nu$  Solaires &  $\nu$  de SN 1987A

Neutrinos et Oscillations

Contraindre la Matrice de Mélange

Echelle des Masses et Nature du neutrino

Les futur des Neutrinos?

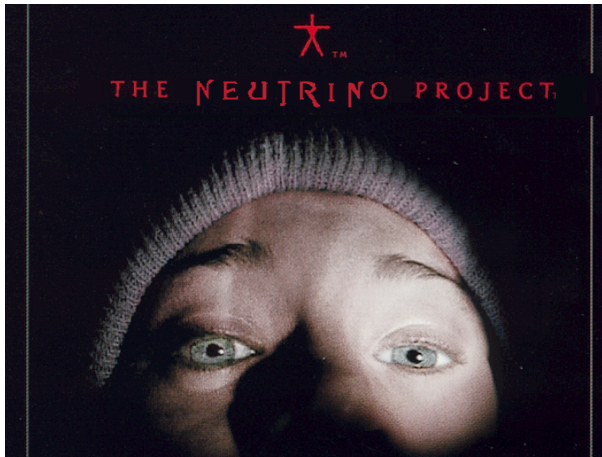
Présentations à venir...

Etats propres de masse et de saveur

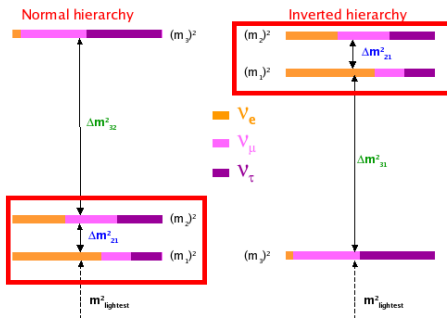
Probabilité d'Oscillation

Différentes manip possibles

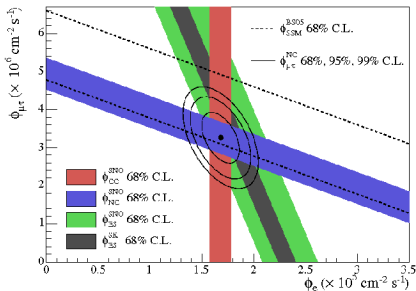
## Physique des $\nu$ : contraindre la matrice



# Mesures dans le Secteur 12



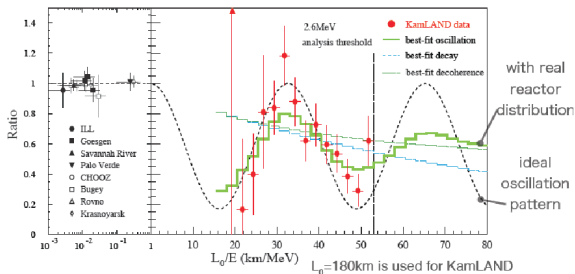
# Mesures dans le Secteur 12 : Neutrinos Solaires



## Processus expérimental

- $P(\nu_e \rightarrow \nu_e) \propto \sin^2 \theta_{12}$  pour  $\left(\frac{L}{E}\right)_{\text{soleil}}$
- Disparition de  $\nu_e$  du Soleil : SNO (toutes saveurs)

# Mesures dans le Secteur 12 : Neutrinos de Réacteurs

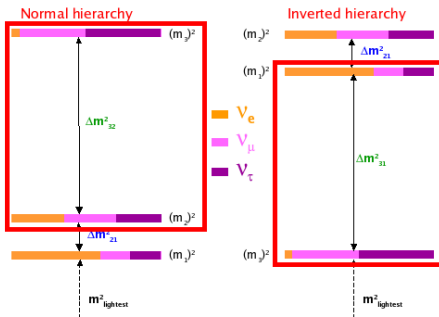


## Autre Processus expérimental

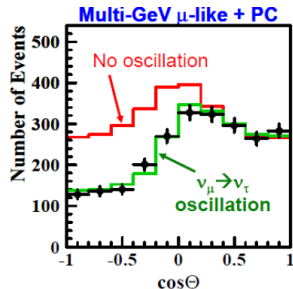
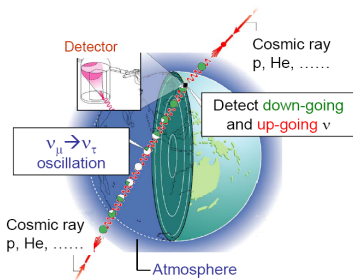
- $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left[ 1.27 \Delta m_{12}^2 \left( \frac{L}{E} \right)_{\text{réacteurs}} \right]$
- Disparition de  $\bar{\nu}_e$  de Réacteurs : KamLAND ( $L \sim 200\text{km}$ ,  $E \sim \text{MeV}$ )



# Mesures dans le Secteur 23



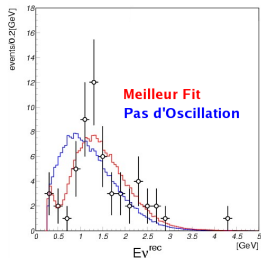
# Mesures dans le Secteur 23 : Neutrinos Atmosphériques



## Processus expérimental

- $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left[ 1.27 \Delta m_{23}^2 \left( \frac{L}{E} \right)_{\text{atmosphériques}} \right]$
- Disparition de  $\nu_\mu$  atmosphériques : SuperKamiokande

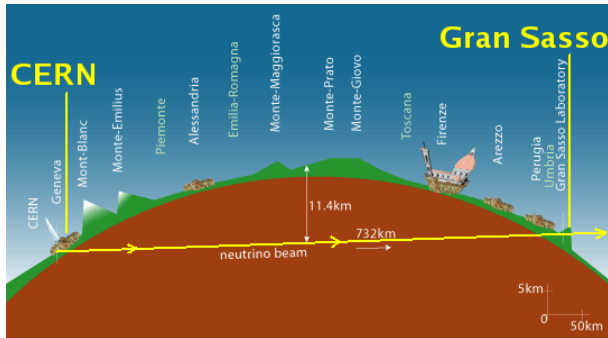
## Mesures dans le Secteur 23 : Neutrinos de Réacteurs



### Processus expérimental

Disparition de  $\nu_\mu$  provenant de KEK : confirmation de l'Oscillation  
( $L \sim 200\text{km}$ ,  $E \sim 10\text{GeV}$ )

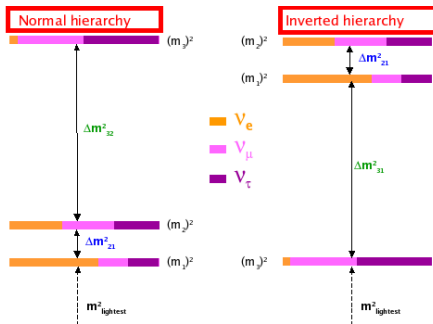
## Le présent du Secteur 23



Bientôt la prise de données

Première expérience d'apparition des  $\nu_\tau$  : OPERA  $\Rightarrow$  N. Chon-Sen

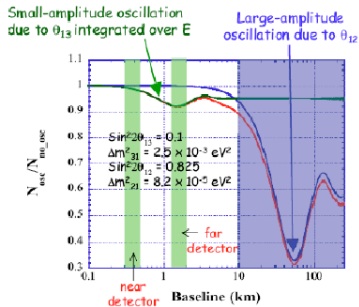
# Mesures dans le Secteur 13



# Mesures dans le Secteur 13 : Neutrinos de Réacteurs

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{12} - \sin^2 2\theta_{13} (\cos^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{13} + \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{23})$$

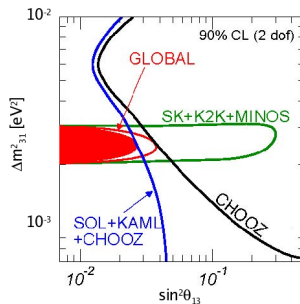
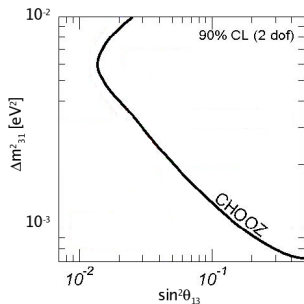
pour  $(\frac{L}{E})_{\text{réacteurs}}$ , où  $\Delta_{ij} = 1.27 \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{E}$



Manips passées et futures

Disparition de  $\bar{\nu}_e$  provenant de réacteurs ( $L \sim 1\text{km}$ ,  $E \sim \text{MeV}$ )

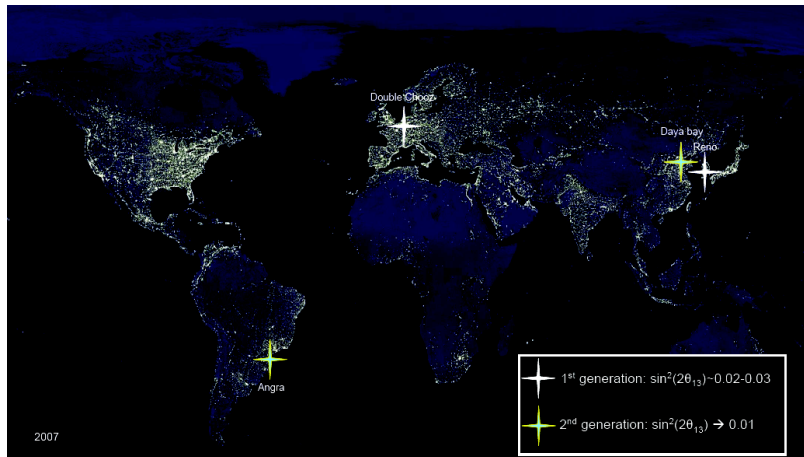
## Mesures dans le Secteur 13 : Neutrinos de Réacteurs



### Résultat *historique*

Expérience *Chooz* (1988), seul résultat sur  $\theta_{13}$  jusqu'à récemment

## Mesures dans le Secteur 13 : Neutrinos de Réacteurs

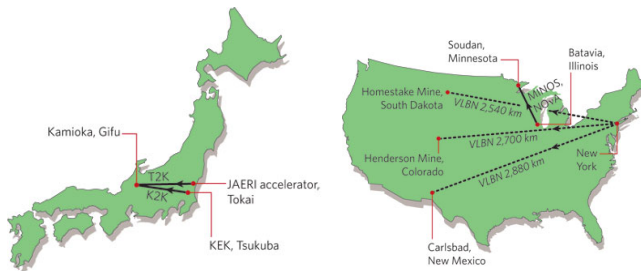




## Mesures dans le Secteur 13 : Neutrinos de Réacteurs



## Le futur du Secteur 13



### Manips futures

Apparition de  $\nu_e$  à partir de faisceau de  $\nu_\mu$  d'accélérateurs

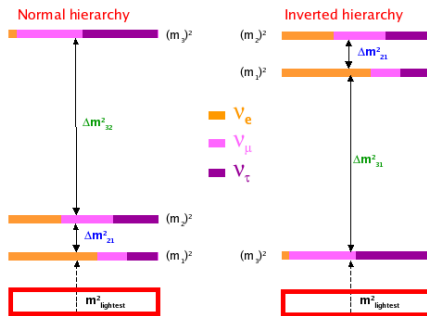
( $L \sim 200 - 1000\text{km}$ ,  $E \sim \text{GeV}$ )

## Physique des $\nu$ : Echelle de Masses et Nature du $\nu$



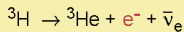
(\*) Je suis pas connu  
pour la physique mais  
pour mes blagues nulles

# Mesures des Masses



# Mesure cinématique directe : Tritium endpoint

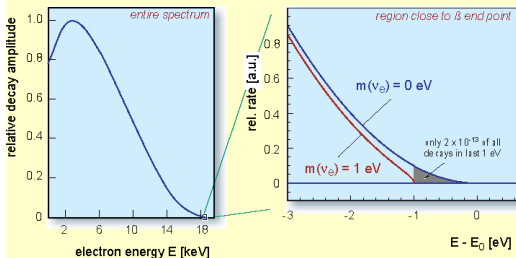
## tritium $\beta$ -decay and the neutrino rest mass



superallowed

half life :  $t_{1/2} = 12.32$  a

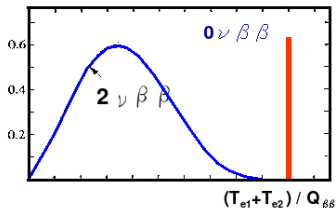
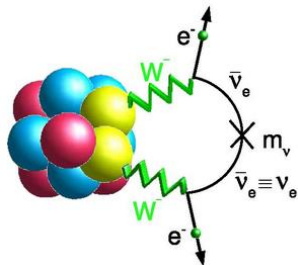
$\beta$  end point energy :  $E_0 = 18.57$  keV



## Résultats expérimentaux et futur

$m_\nu < 2.2$  eV à 95% (Troistk/Mainz)  $\Rightarrow$  0.2 eV (Katrín, > 2009)

## Nature du Neutrino : *Double Beta decay*



*Double β sans neutrino*  $\Rightarrow \nu_{\text{majorana}}$

Résultat expérimental : une masse effective

$$m_{\beta\beta} = \left| |U_{e1}|^2 m_1 + e^{i\beta} |U_{e2}|^2 m_2 + e^{i\alpha} |U_{e3}|^2 m_3 \right|$$

## Nature du Neutrino : *Double Beta decay*

isotope	expérience	dernier résultat	$\langle m_\nu \rangle$ (sup.) [eV]
$^{48}\text{Ca}$	Elegant VI	2004	$7.2 \div 44.7$
$^{76}\text{Ge}$	Heidelberg/Moscow	2004	0.44 (99.9973 %)
$^{82}\text{Se}$	NEMO-3	2007	$1.2 \div 3.2$
$^{100}\text{Mo}$	NEMO-3	2007	$0.6 \div 2.40$
$^{116}\text{Cd}$	Solotvina	2003	1.7
$^{130}\text{Te}$	Cuoricino	2007	$0.16 \div 0.84$
$^{136}\text{Xe}$	DAMA	2002	$1.10 \div 2.9$
$^{150}\text{Nd}$	Irvine TPC	1997	3.0
$^{160}\text{Gd}$	Solotvina	2001	26.0

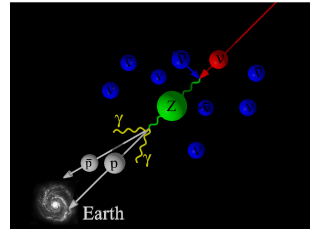
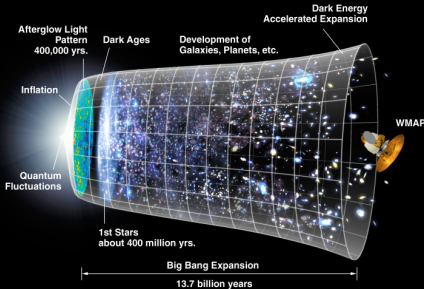
## Physique des $\nu$ : le futur





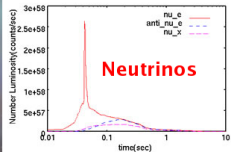
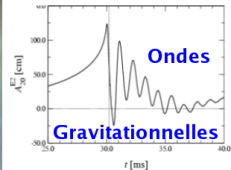
# Le Fond Cosmologique de Neutrinos et les $\nu$ UHE

## Neutrino Cosmological Background : 10s after Big-Bang !



- $$E_{\nu_i}^{\text{résonance}} = \frac{m_Z^2}{2m_{\nu_i}} \simeq 4 \times 10^{21} \left( \frac{1 \text{ eV}}{m_{\nu_i}} \right) \text{ eV}$$

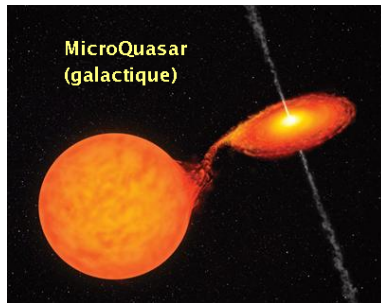
# Neutrinos et Ondes Gravitationnelles : SN II



$$m_\nu \neq 0 : \delta t_{\text{propagation}} \simeq 5.15 \text{ms} \left( \frac{L}{10 \text{kpc}} \right) \left( \frac{m_\nu c^2}{1 \text{eV}} \right)^2 \left( \frac{10 \text{MeV}}{E_\nu} \right)^2$$

$$E_\nu^{\text{SN}} \sim \text{MeV}, \delta t_{\text{GW}-\nu_e^{\text{flash}}} \lesssim 0.5 \text{ms} \Rightarrow \delta m^2 \sim 0.6 \text{eV}^2$$

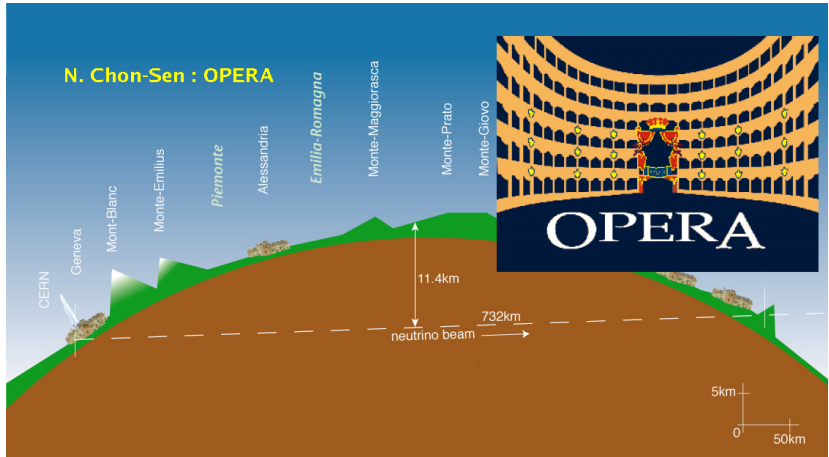
## Neutrinos et Ondes Gravitationnelles : $\mu$ Quasars



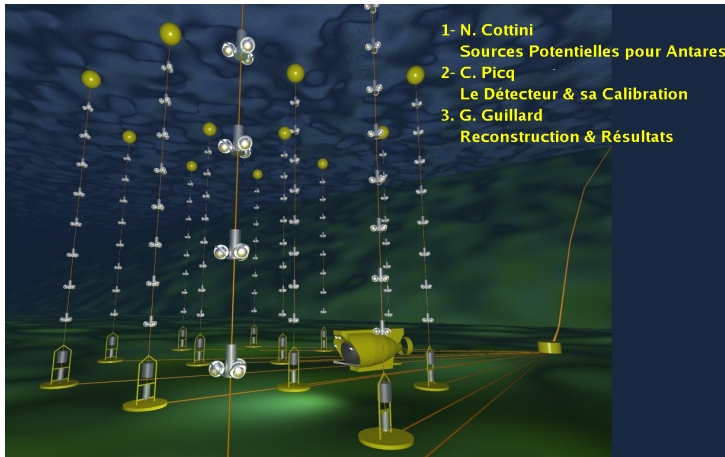
$$\text{Gravité Quantique : } c^2 p^2 = E^2 \left[ 1 + \xi \left( \frac{E}{E_{QG}} \right) + \mathcal{O} \left( \frac{E^2}{E_{QG}^2} \right) + \dots \right]$$

$$\Delta t_{QG} \simeq 0.15 \text{ms} \left( \frac{d}{10 \text{ kpc}} \right) \left( \frac{E_{\nu}^{HE}}{1 \text{ TeV}} \right) \left( \frac{10^{19} \text{ GeV}}{E_{QG}} \right) \Rightarrow E_{QG} \simeq 10^{22} \text{ GeV}$$

# OPERA : Oscillations, étude du neutrino



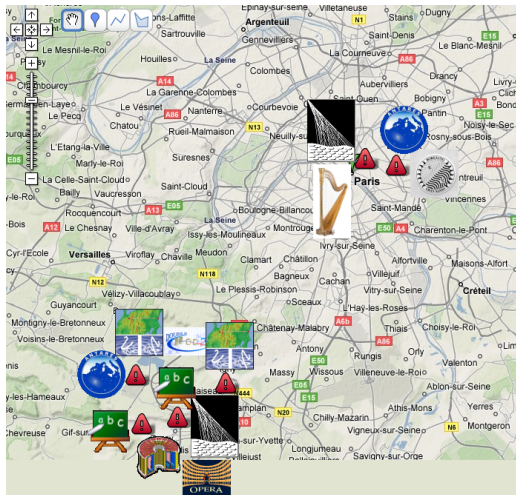
# ANTARES : Astronomie avec des Neutrinos ( $E_\nu \sim TeV$ )



# Annexe : Carte de France des Neutrinos (I)

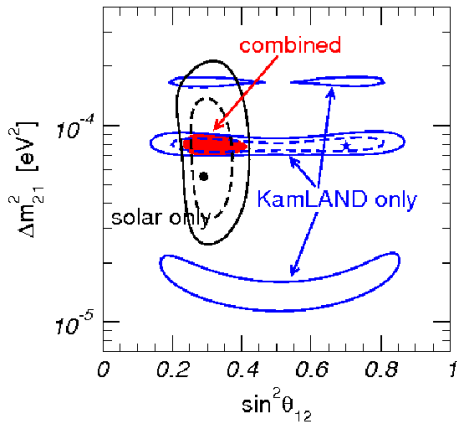


# Annexe : Carte de France des Neutrinos (II)



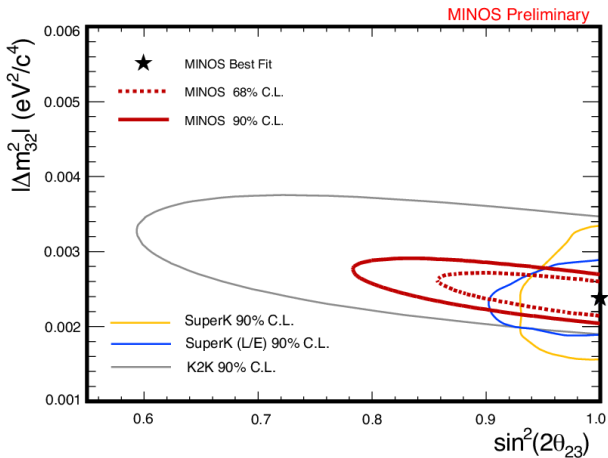
- APC Borexino, Antares, Auger
- LPNHE Auger, HARP
- LR T2K
- LAL Auger, NEMO, OPERA
- IPNO Theorie, Auger
- LPTH Theorie
- SPP T2K, DoubleChooz, Antares

## Annexe : Résultats Secteur 12

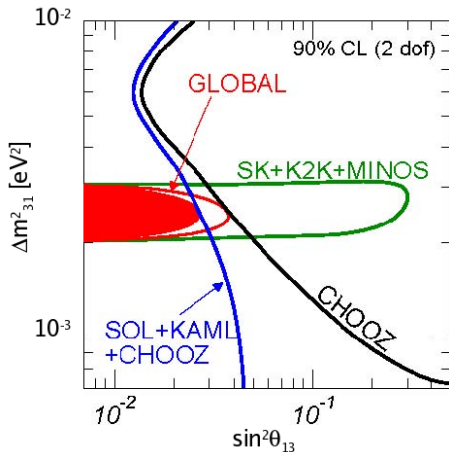




# Annexe : Résultats Secteur 23



## Annexe : Résultats Secteur 13



# Annexe : Résultats Combinés Double $\beta$ et Oscillations

