

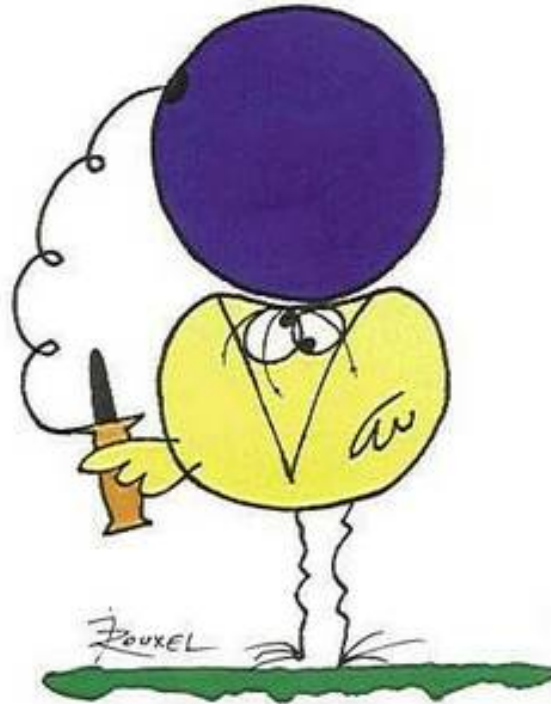
Physique des particules

MASTER 1 PFN

Université Joseph Fourier – Grenoble I

<http://lpsc.in2p3.fr/atlas/bclement/M1Particules/>

Les devises Shadok



EN ESSAYANT CONTINUUELLEMENT
ON FINIT PAR RÉUSSIR. DONC:
PLUS ÇA RATE, PLUS ON A
DE CHANCES QUE ÇA MARCHE.

Physique des neutrinos

Les devises Shadok



EN ESSAYANT CONTINUELLEMENT
ON FINIT PAR RÉUSSIR. DONC:
PLUS ÇA RATE, PLUS ON A
DE CHANCES QUE ÇA MARCHE.

Le neutrino

Invention

Proposé par E.Fermi en 1932
pour expliquer le spectre en
énergie des désintégration β



Dans le Modèle standard

3 saveurs (un neutrino par famille)

N'interagit que par interaction

faible : très difficile à détecter

Charge nulle, **masse nulle**



Découvertes

ν_e : 1959 par Cowan et Reines

ν_μ : 1962 (Schwartz, Steinberg,
Lederman, et Gaillard), dans le
désintégration du pion chargé

ν_τ : 1999, collaboration DONUT,
Fermilab

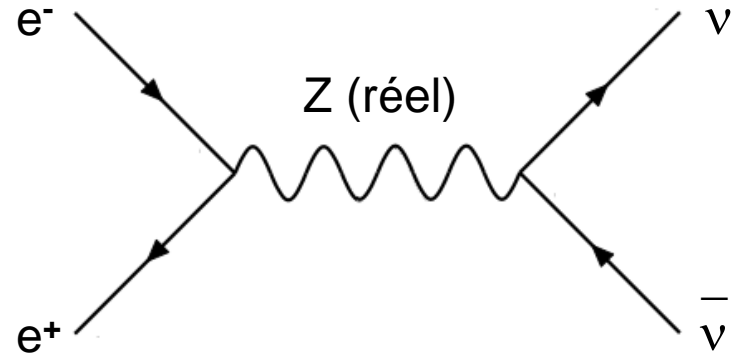
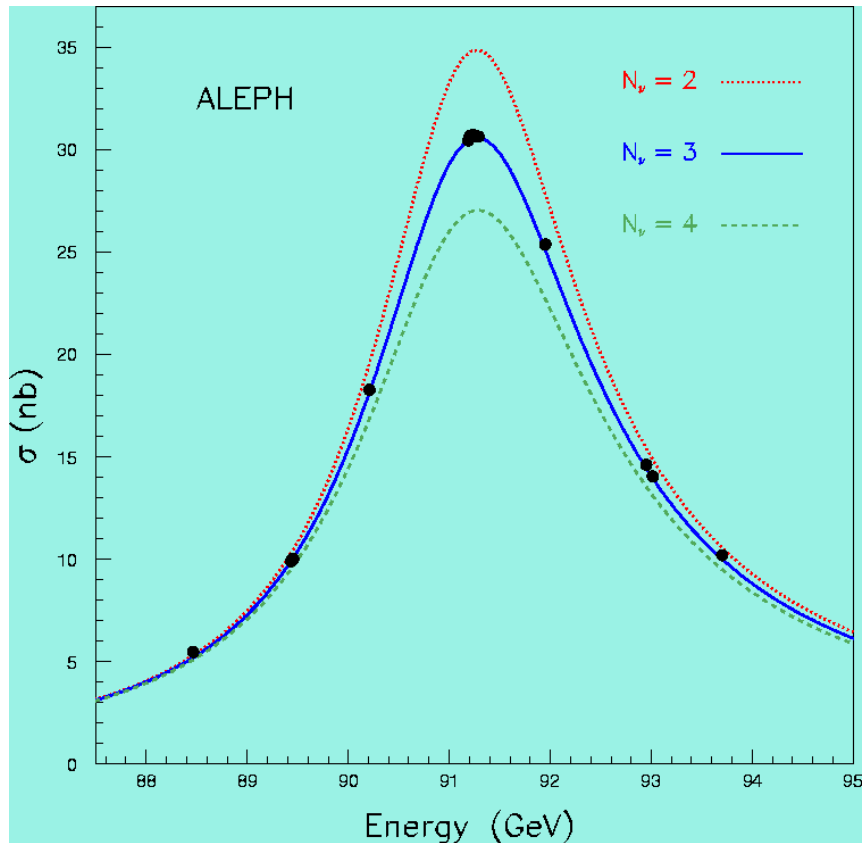
Au delà du Modèle standard ?

Oscillation de neutrinos

Neutrino massif

Nombre de familles : 3 neutrinos

Accélérateur e^+e^- LEP : phase 1 (1989-2000) avec $\sqrt{s} = M_Z$



$\sigma_{e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow ff}$: calculable dans le MS et dépend du nombre de fermions

Mesure compatible avec 3 types de neutrinos

Contrainte cinématique $m_\nu < m_Z/2$

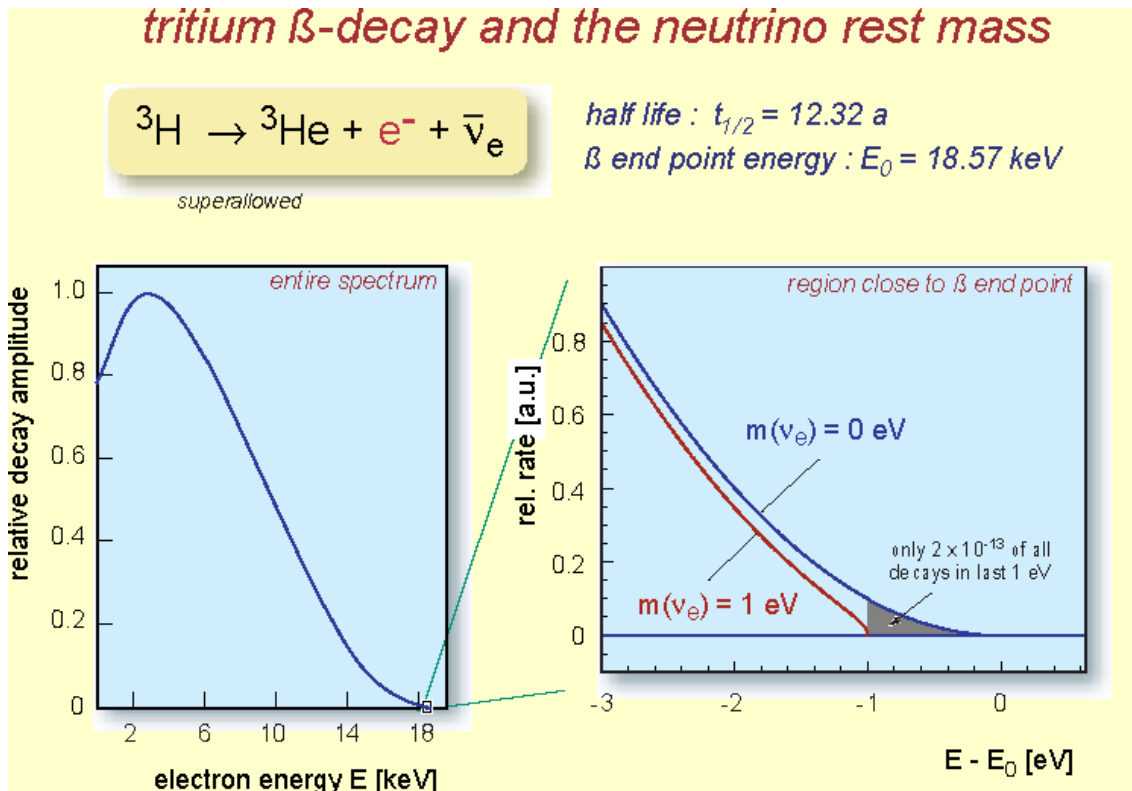
Preuve que 3 et seulement 3 neutrinos couplent au Z,
n'exclut pas la possibilité de neutrino hyper-lourd ou stérile.

Masse du ν_e

Masse du ν_e : spectre continu borné de l'énergie de l'électron émis lors de la désintégration β . **Limite supérieure = f(masse du n, noyau émetteur)**

Déterminer avec précision la borne supérieure + mesure (difficile) du recul du noyau émetteur.

Sensibilité \nearrow si bilan de la réaction $Q_\beta \searrow$: désintégration β du Tritium



$m(\nu_e) < 2 \text{ eV @ 95\% CL}$

limitation de la résolution du détecteur et $m_n \neq 0$ ont le même effet ☹️

Contraintes sur les autres masses :

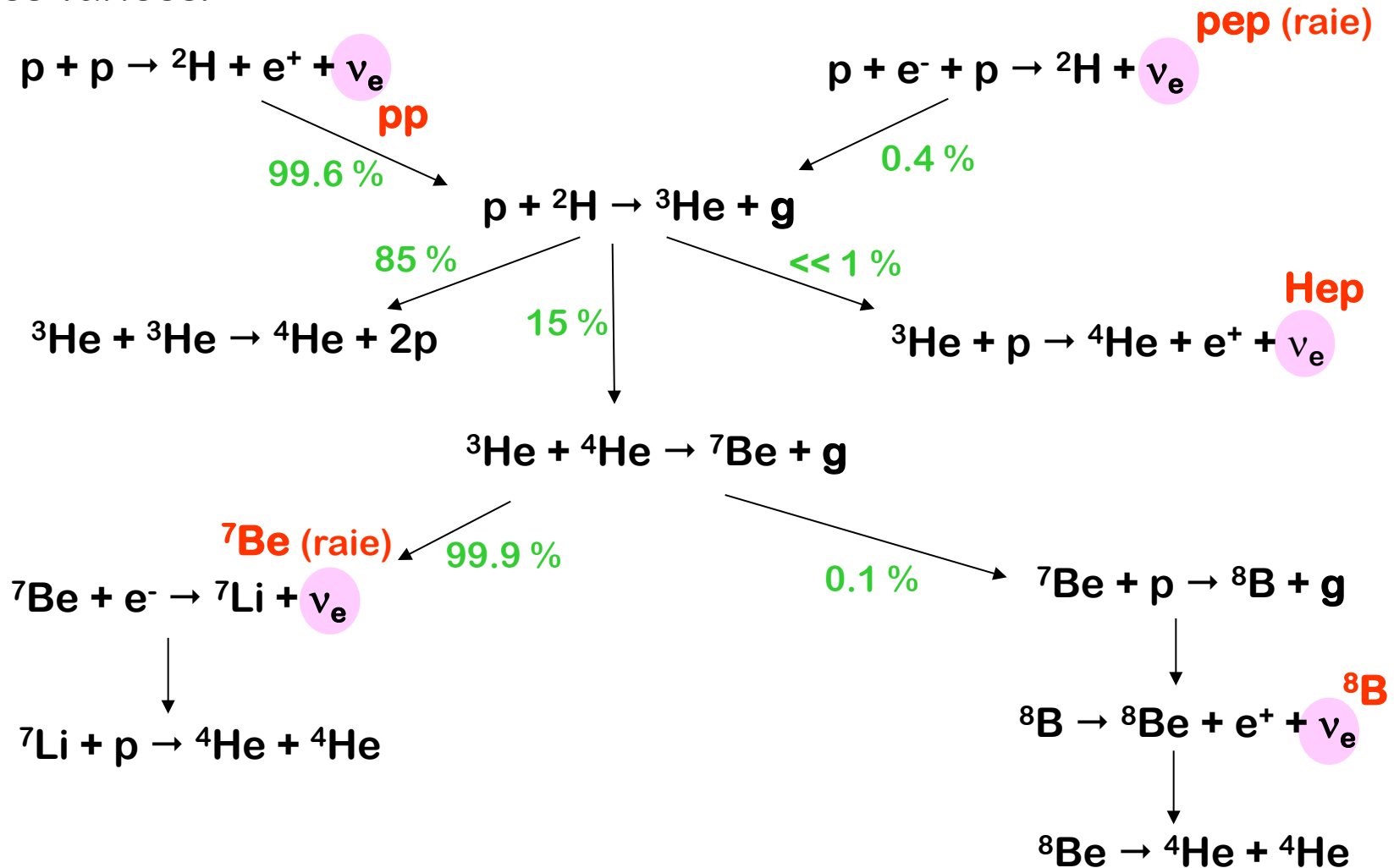
$m(\nu_\mu) < 190 \text{ eV (90\%)}$

$m(\nu_\tau) < 18.2 \text{ MeV (95\%)}$

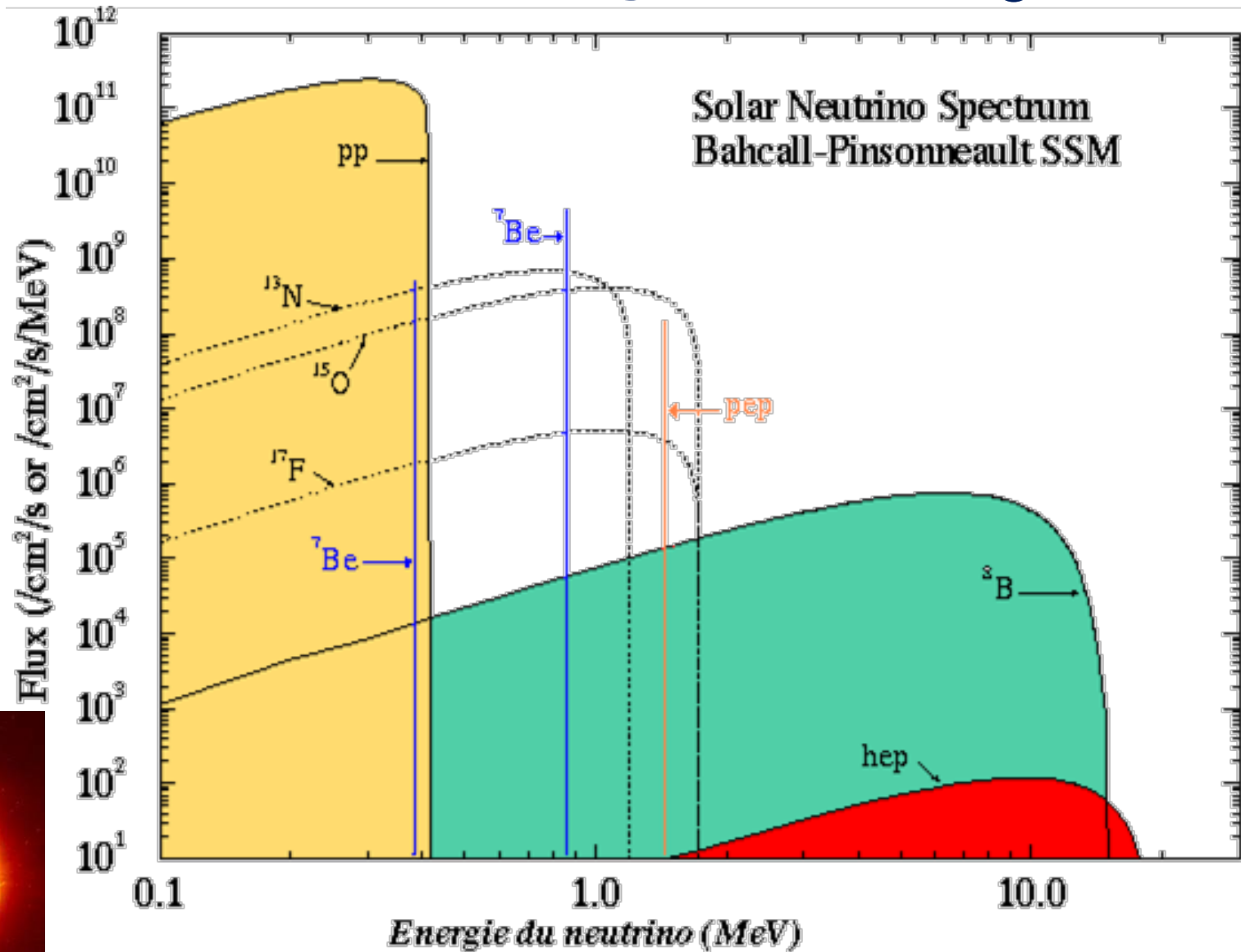
Les neutrinos solaires

Réactions nucléaires au sein du soleil : cycle pp (98 % de l'énergie émise par le soleil)

ν_e de différentes énergies (raies et spectres continus) et avec des abondances très variées.



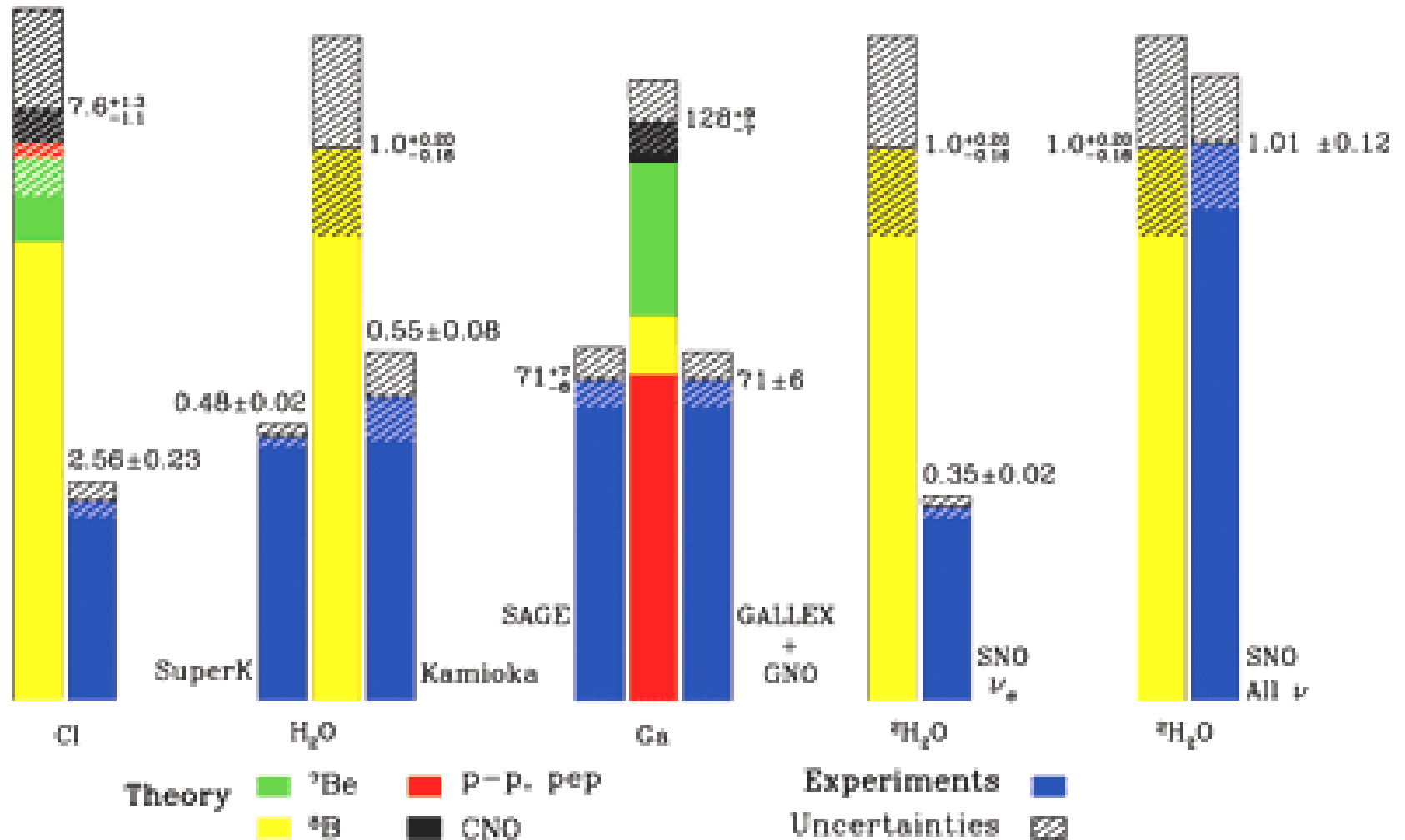
Spectre en énergie des ν_{\odot}



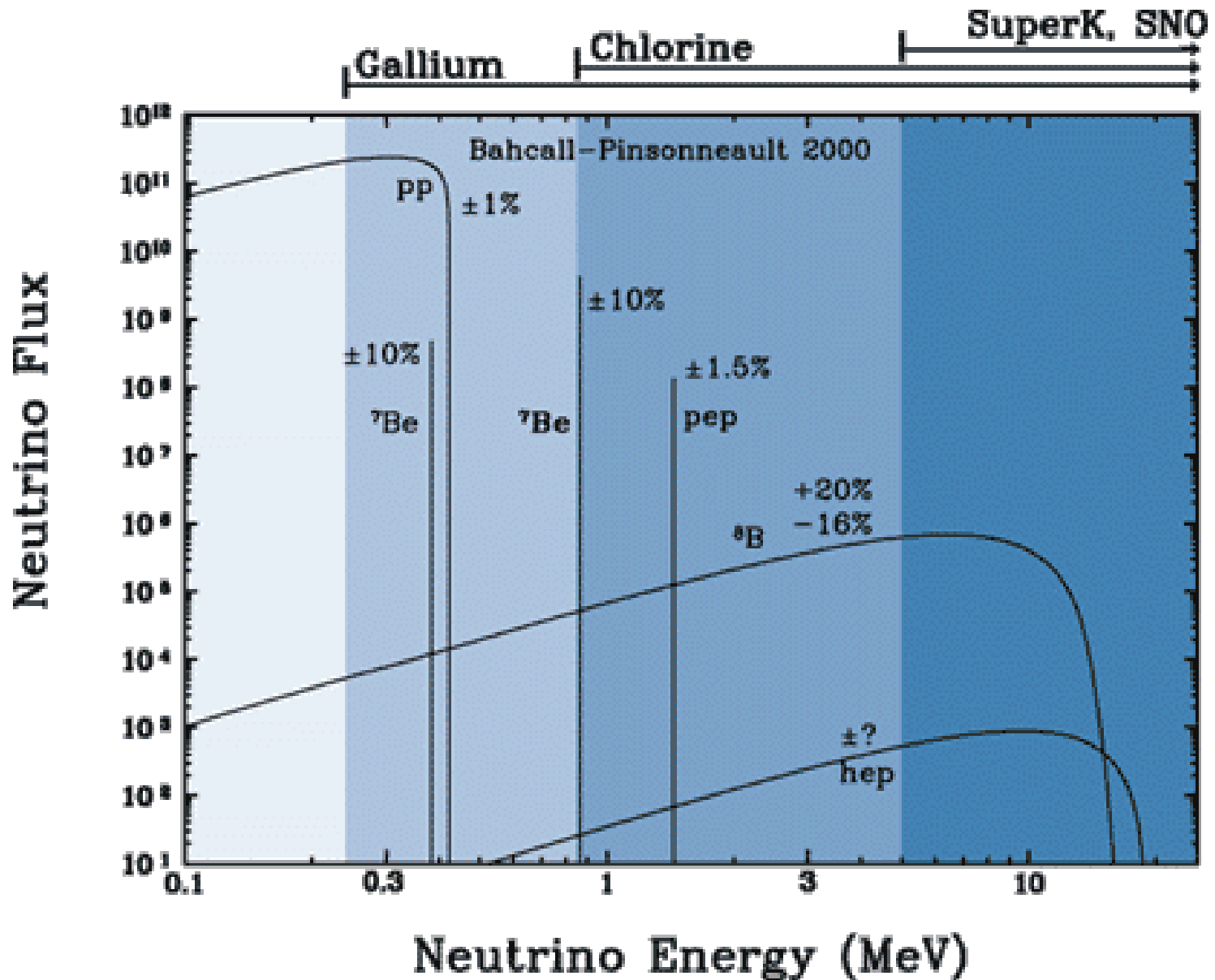
L'énigme des neutrinos solaires

Différents déficits du flux de n_e du soleil mesurés par trois types d'expériences :

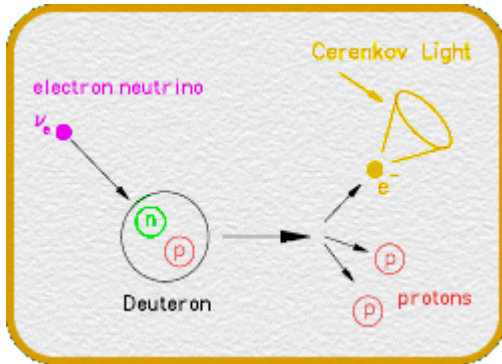
Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



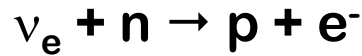
Différentes cibles, différentes énergies



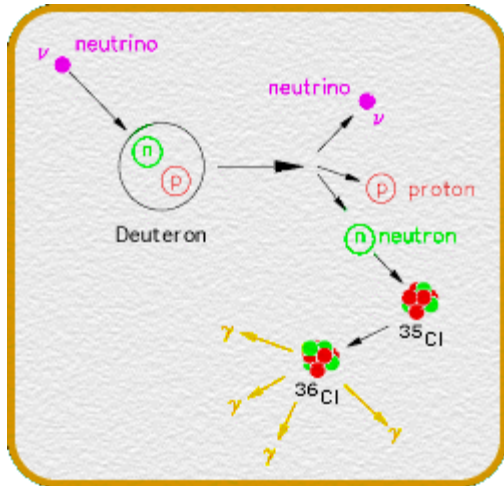
L'expérience SNO



Courants chargés, CC :



Flux déficitaire en ν_e

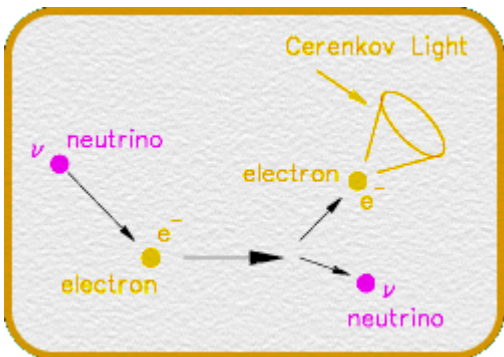


Courants neutres, NC :



Flux des 3 saveurs de n conforme aux prédictions

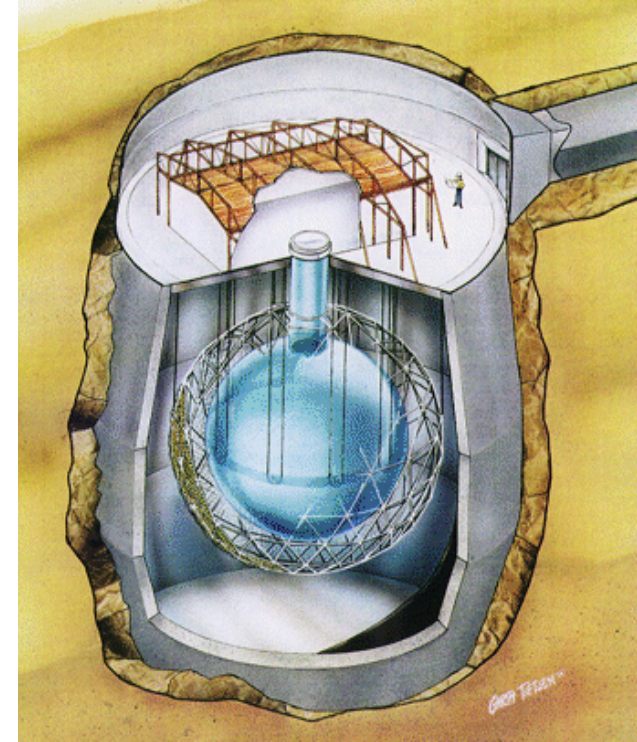
(confirme modèle solaire)



Diffusion sur un électron, ES :



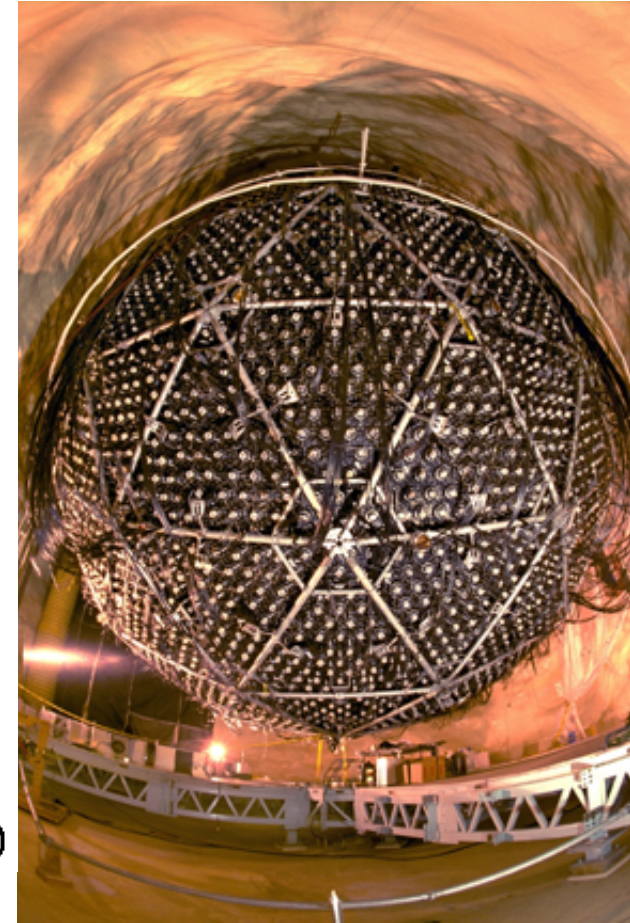
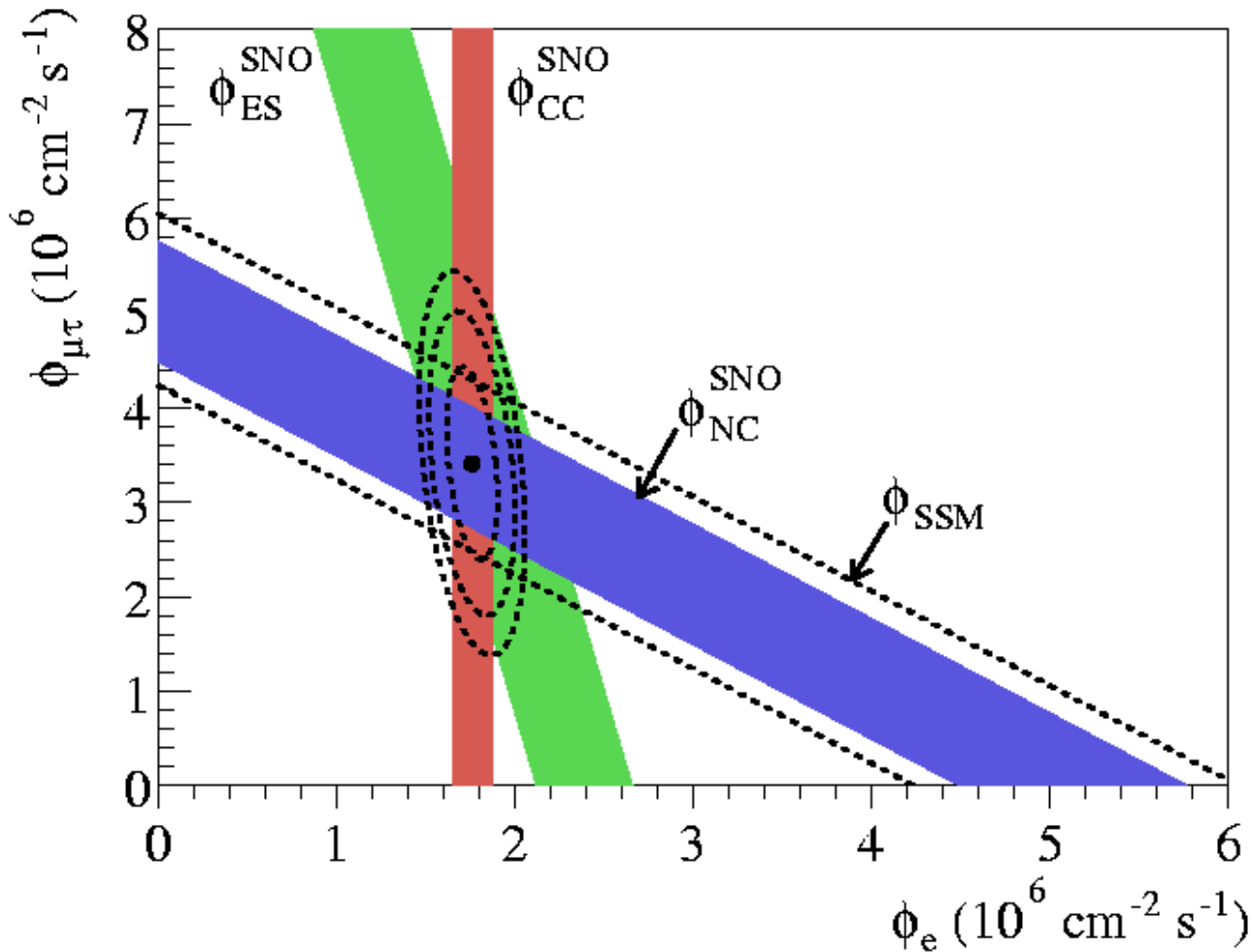
Il existe des n non électroniques sortant du soleil ! (Flux n_x – Flux $n_e \neq 0$)



**1 ktonne eau lourde
(puis eau salée NaCl)
2 km sous Terre
12 m diamètre
9600 PM**

$$\text{Ratio} = \frac{\text{CC}}{\text{ES}} = \frac{(\nu_e) \text{ flux}}{0.86 \nu_e + 0.14(\nu_\mu + \nu_\tau) \text{ flux}}$$

Résultats de SNO

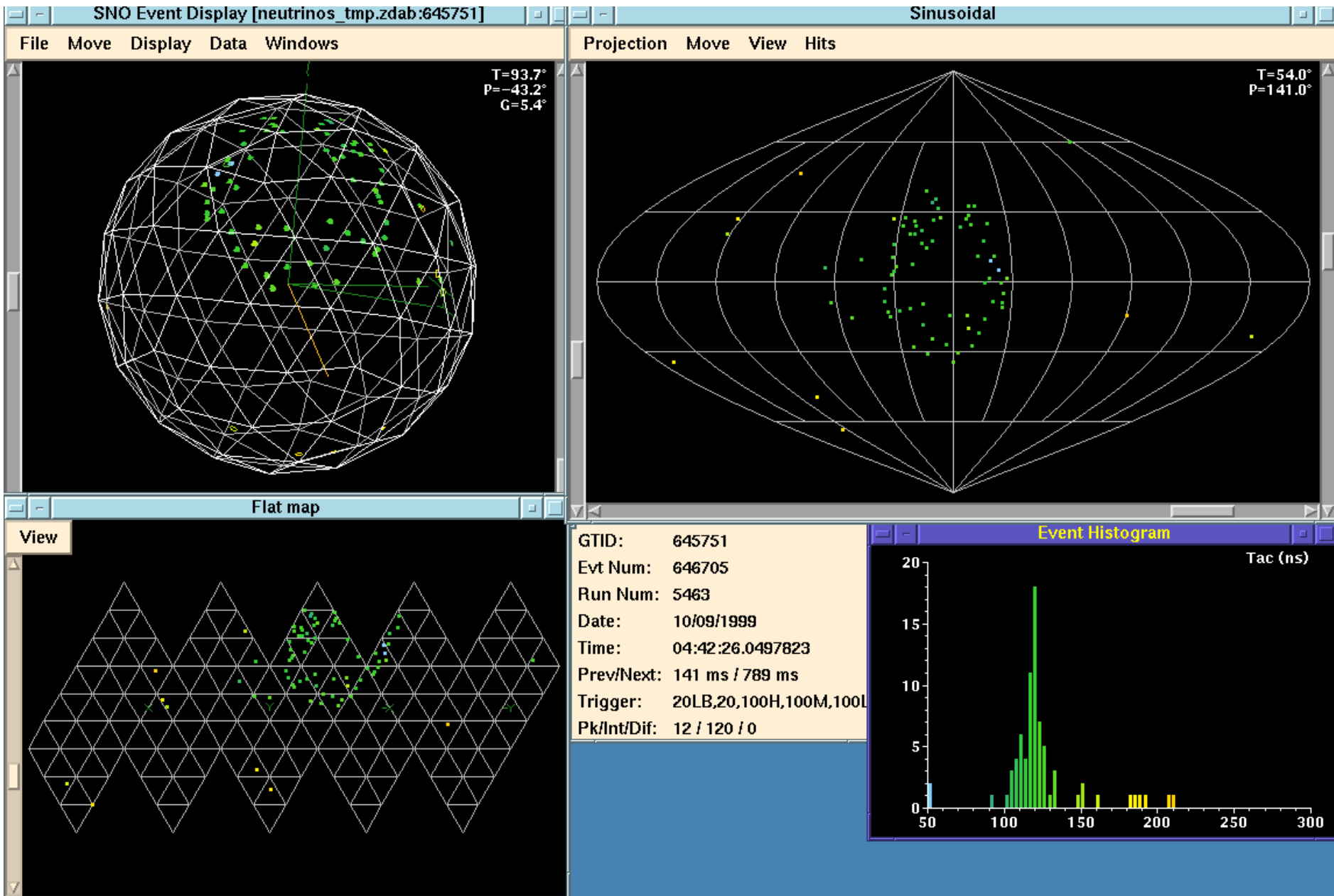


Flux total : en accord avec le modèle solaire

Flux ν_e : confirme le deficit

→ **changement de saveur entre emission (soleil) et détection (terre)**

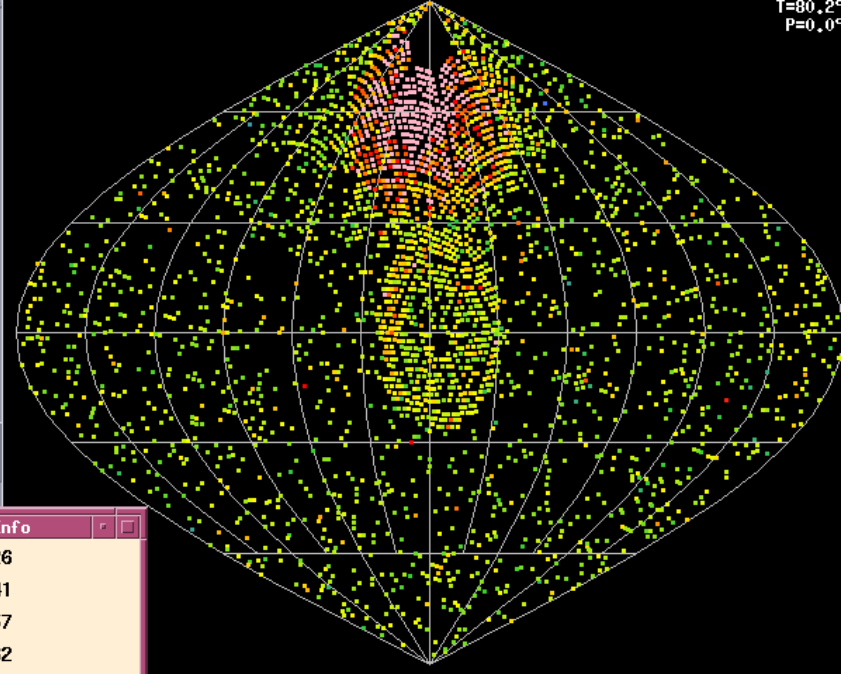
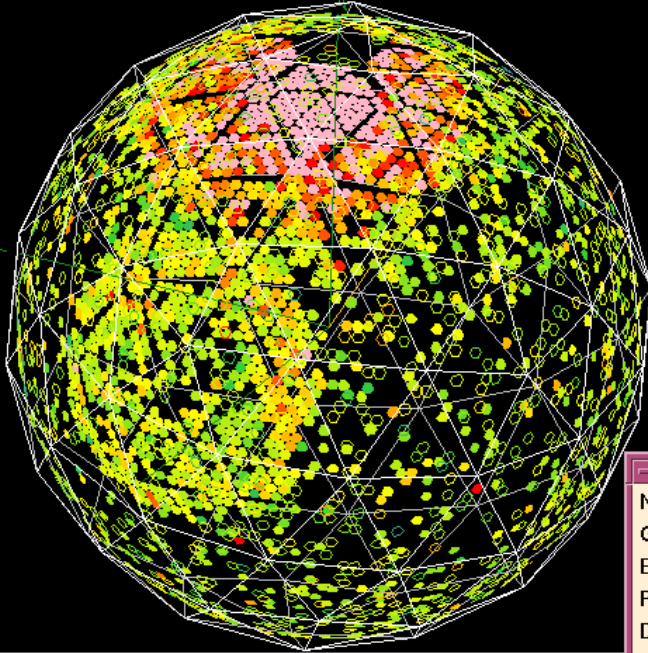
Un événement CC



Muon cosmique

T=115.1°
P=154.7°
G=1.8°

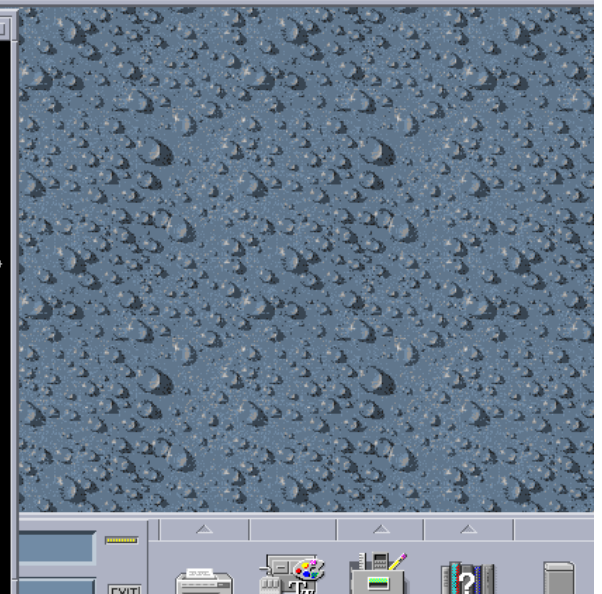
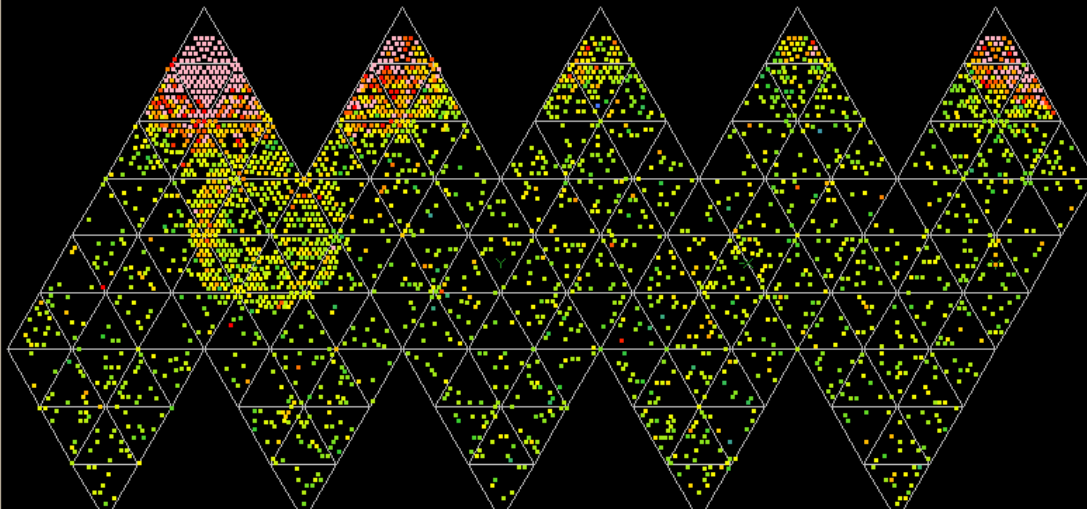
l=80.2°
P=0.0°



Event Info	
NHIT:	2926
GTID:	6341
Evt Num:	6357
Run Num:	3162
Date:	05/05/1999
Time:	12:46:35.0710788
Trigger:	ESUMH

Flat map

View



Probabilités d'apparition et de survie

Etat initial pur ν_e : Oscillation de ν_e vers ν_x au cours de la propagation

Apparition de ν_x :

$$\begin{aligned} P_{\text{apparition}}(x, E) &= \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{x\delta m^2}{4E} \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1.27x(\text{km})\delta m^2(\text{eV}^2)}{E(\text{GeV})} \end{aligned}$$

Survie de ν_e :
$$P_{\text{survie}}(x, E) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{x\delta m^2}{4E}$$

Expérimentalement

Obtenir des neutrinos de saveur connue à $(x, t) = (0, 0)$

Rechercher : l'apparition de nouvelle saveur

la disparition de la saveur d'origine

Oscillations à trois neutrinos

Matrice de mélange 3x3, complexe unitaire

3 différences de masses : δm^2_{12} , δm^2_{23} , δm^2_{13}

3 angles de mélanges : θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}

3 phases...

$$\begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix} = V_{PMNS} \begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} \\ V_{\mu 1} & V_{\mu 2} & V_{\mu 3} \\ V_{\tau 1} & V_{\tau 2} & V_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix}$$

En négligeant les phases :

$$V = \begin{pmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 \\ s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & -s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & -s_{23} \\ 0 & s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}$$

Oscillation :

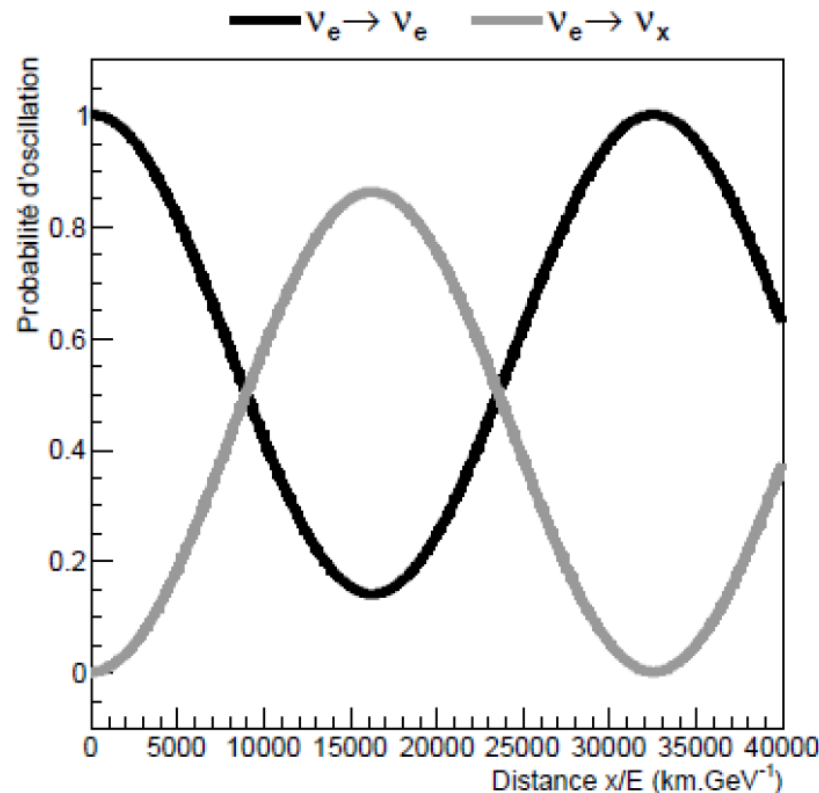
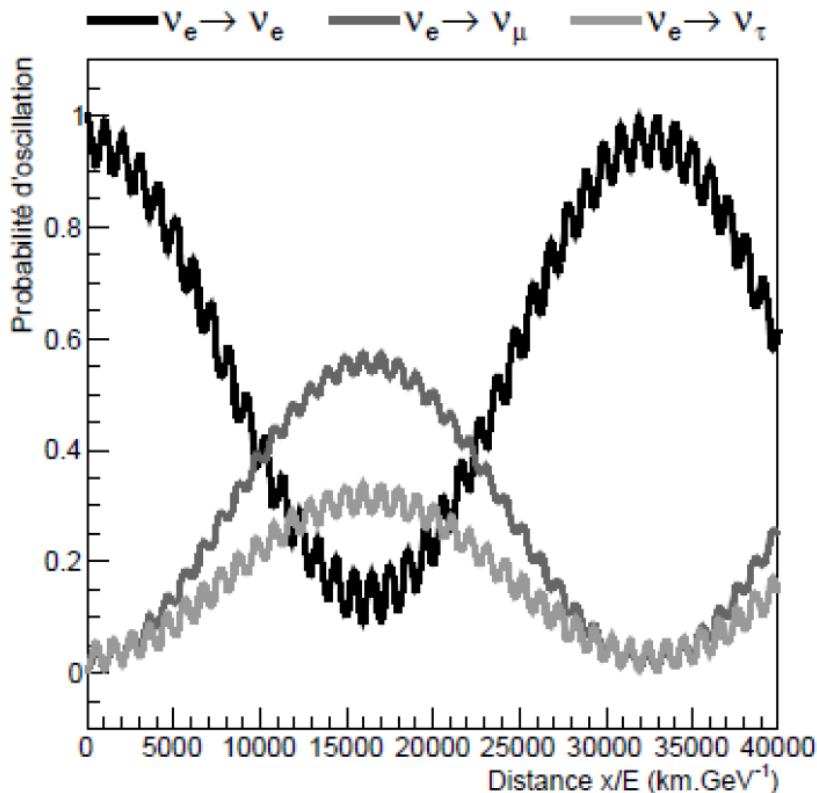
$$P_{i \rightarrow j} = \sum_{i,j,k} |V_{ik}|^2 |V_{jk}|^2 + 2 \sum_{i,j,k,l} |V_{ik}|^2 |V_{jk}|^2 |V_{il}|^2 |V_{jl}|^2 \left(1 - 2 \sin^2 \frac{x \delta m^2_{ij}}{4E} \right)$$

Neutrinos solaires (+centrales)

Etat initial : pur ν_e , $E \sim 1\text{MeV}$ $L \sim 108\text{ km}$

$$\sin^2 2\theta_{12} \approx 0.86 \quad \sin^2 2\theta_{13} \approx 0.09 \quad \sin^2 2\theta_{23} \approx 0.97$$

$$\delta m_{12}^2 \approx 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV} \quad \delta m_{13}^2 \approx \delta m_{23}^2 \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}$$



Interprétation à 2 neutrinos: θ_{sol} $\delta m_{\text{sol}}^2 \rightarrow$ oscillation 1 \leftrightarrow 2

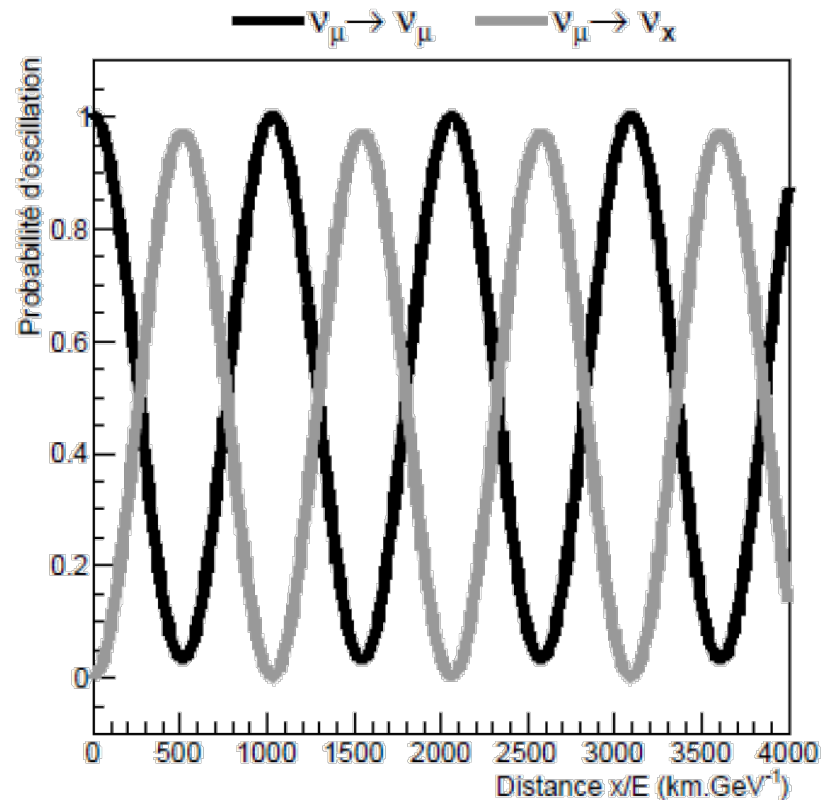
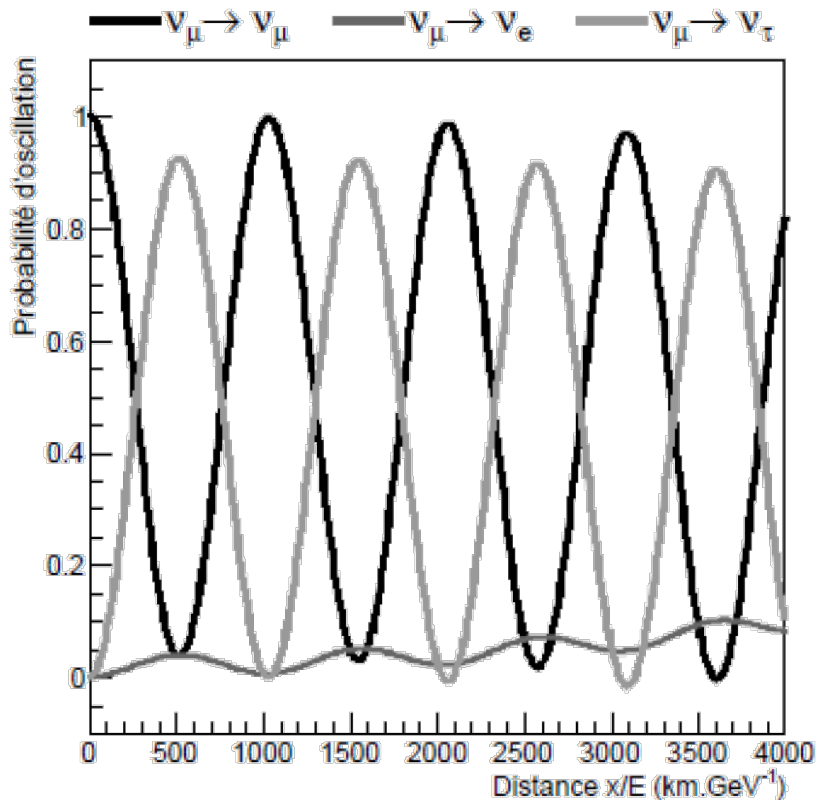
Neutrinos atmosphériques

Rayons cosmiques secondaires : production de pions

$\pi \rightarrow \mu \nu_\mu, \mu \rightarrow e \nu_\mu \nu_e$: $2 \nu_\mu$ pour $1 \nu_e$, $E \sim 50 \text{ MeV}$ $L \sim 1000 \text{ km}$

$$\sin^2 2\theta_{12} \approx 0.86 \quad \sin^2 2\theta_{13} \approx 0.09 \quad \sin^2 2\theta_{23} \approx 0.97$$

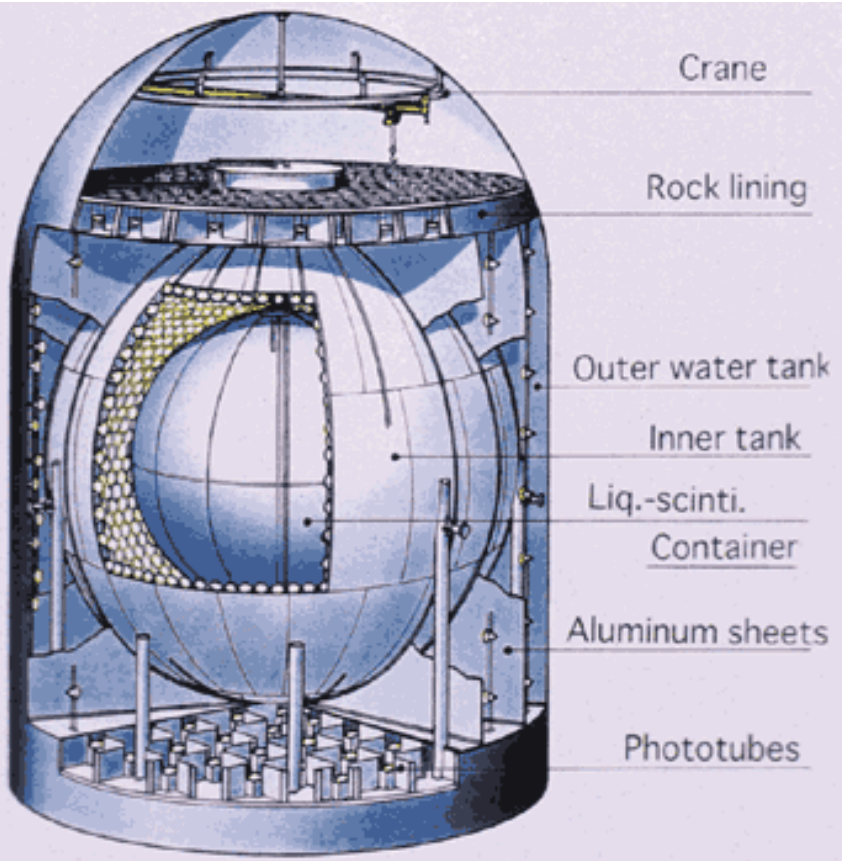
$$\delta m_{12}^2 \approx 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV} \quad \delta m_{13}^2 \approx \delta m_{23}^2 \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}$$



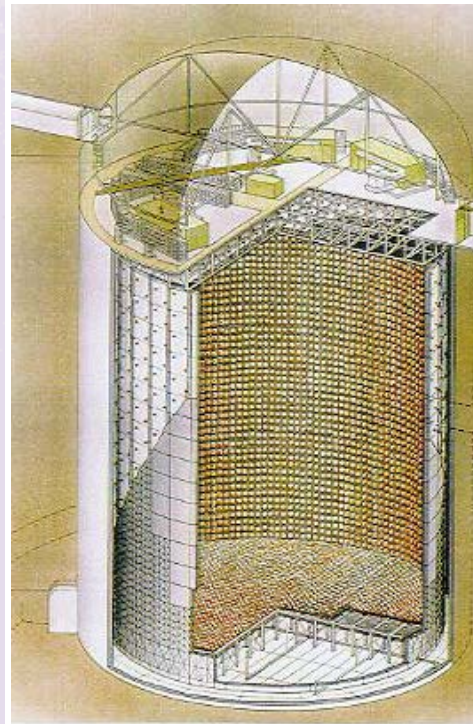
Interprétation à 2 neutrinos: $\theta_{\text{atm}} \quad \delta m_{\text{atm}}^2 \rightarrow$ oscillation 2 \leftrightarrow 3

Quelques détecteurs

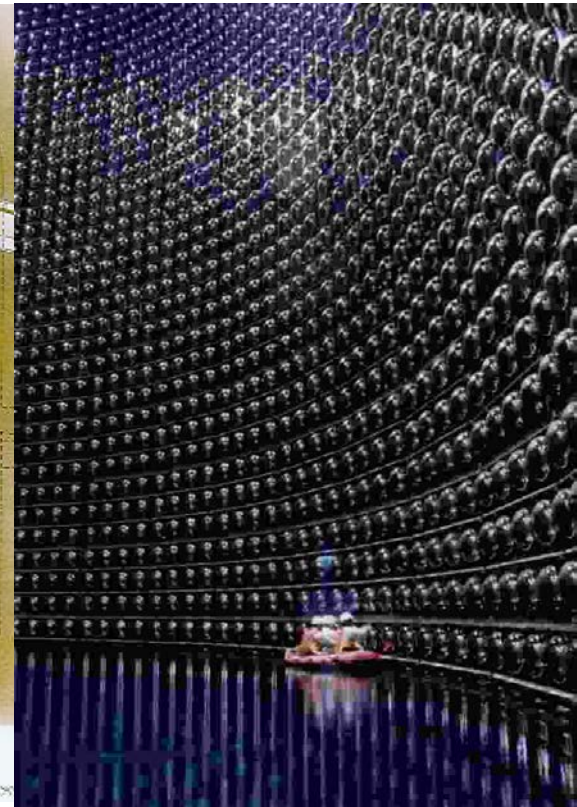
Grand volume actif de scintillateur liquide (KamLAND) ou d'eau (Effet Cerenkov, Kamikande) entourés de photomultiplicateurs



KamLAND (neutrino de centrales)



SuperKamikande (neutrinos solaires et atmospheriques)



Quelques résultats

Masses minimales :

Si $m_1 = 0$ eV alors

- $m_2 = \sqrt{(\Delta m^2_{sol})}$

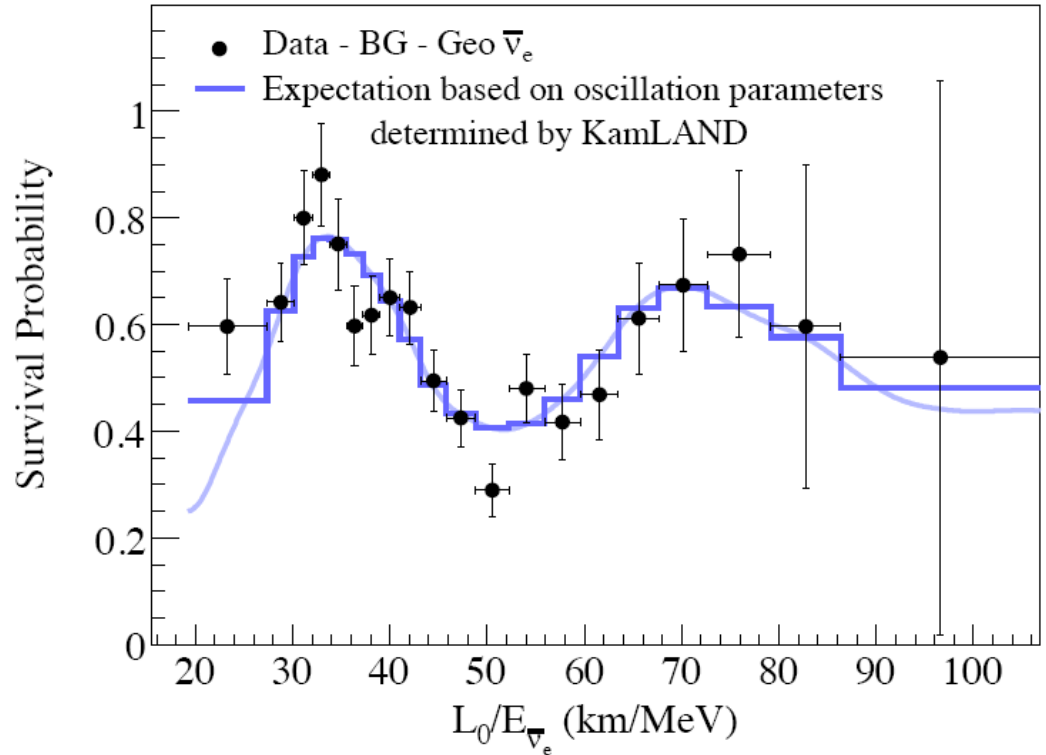
≈ 8.7 meV

- $m_3 = \sqrt{(m_2^2 + \Delta m^2_{atm})}$

≈ 49 meV

Masses faibles

Grands angles de mélanges



Paramètres non mesurés :

Phases de la matrices

Masse absolue

Hiérarchie des masses

