

# « Rencontres de physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit »

*Promotion Emmy Noether - 15-26 juillet 2013*

Cours « Comprendre l'infiniment petit » (4)

Les neutrinos,  
des particules toujours bien  
mystérieuses...

*Corinne Augier, UCBL Lyon 1 - IPNL - IN2P3/CNRS*  
*Lundi 22 juillet 2013*

# PLAN

1- Rappel : les constituants élémentaires aujourd'hui (voir les 3 cours de Sébastien DESCOTES-GENON)

2- Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine  
En résumé : quelques propriétés des neutrinos

3- Les sources de neutrinos  
En résumé : quelques chiffres

4- Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

5- Neutrinos : une question de masse et de nature ?

6- En conclusion sur les neutrinos aujourd'hui...

## ATTENTION AUX UNITES UTILISEES

- Energies en eV avec  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ , et  $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$  ;
- Masses en unités d'énergie = énergie de masse au repos  $mc^2$  : exemple 1 proton  $\sim 1 \text{ GeV}$
- Sections efficaces, caractérisant la probabilité d'une réaction à se produire, en unité de surface  $\text{m}^2$  ou  $\text{cm}^2$  ou barn avec  $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$
- spin en unité  $\hbar = 1$  (exemple électron de spin  $\frac{1}{2}$ )

# 1- En introduction : les particules élémentaires aujourd'hui (MS)

Les fermions de la matière : quarks et leptons, 3 familles

- 3 saveurs pour chaque charge électrique
- **nombre leptonique L pour les leptons/antileptons**

4 interactions fondamentales :

- forte
- électromagnétique
- faible
- gravitationnelle (pour tous mais pas dans le MS)

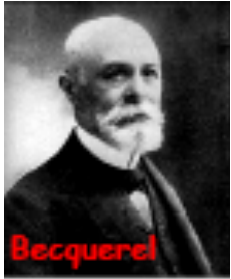
Bosons d'interaction  
(manque gravitation)

	MATIERE	ATOME	NOYAU	PROTON
<b>FERMIONS</b>	<b>LEPTONS Spin 1/2</b>		<b>QUARKS</b>	
1 <sup>ère</sup> famille (matière stable)	$L_e = 1$ électron	$L_e = 1$ neutrino électron	bas (down)	haut (up)
2 <sup>ème</sup> famille	$L_\mu = 1$ muon	$L_\mu = 1$ neutrino muon	étrange (strange)	charme (charm)
3 <sup>ème</sup> famille	$L_\tau = 1$ tau	$L_\tau = 1$ neutrino tau	beauté (beauty)	sommet (top)
<b>ANTIMATIÈRE</b>	Une antiparticule pour chaque fermion			
+ boson de Higgs	$Q/e = -1$ faible, emgt	$Q/e = 0$ faible	$Q/e = -1/3$ faible, emgt et forte	$Q/e = +2/3$ faible, emgt et forte

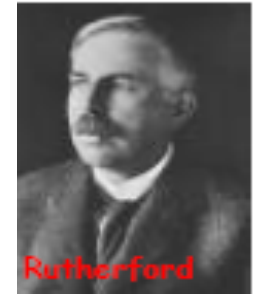
**Force Carriers**

- I. Emgt. {  $\gamma$  photon
- I. Forte {  $g$  gluon
- I. faible {  $Z$  boson,  $W$  boson

## 2- Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine



**1896** : Becquerel découvre la radioactivité (prix Nobel 1903)



**1913** : Les expériences de Rutherford (diffusion de particules  $\alpha$  sur feuille d'or) conduisent à une première image de l'atome, avec un noyau massif entouré de  $Z$  électrons, et le noyau =  $A$  protons +  $(A-Z)$  électrons

### Crise du spin et de l'énergie



**1914** : Chadwick mesure le spectre en énergie des rayonnements  $\beta$  issus de la désintégration du  $^{210}\text{Bi}$  : le spectre est continu, contrairement aux spectres  $\alpha$  et  $\gamma$  qui présentent des raies discrètes (désintégration à deux corps ou désexcitation nucléaire).

Il écrit à Rutherford : « there is probably some silly mistake somewhere ». Mais la suite de l'histoire confirme que la particule  $\beta$  n'emporte qu'une partie de l'énergie de la désintégration. Pb avec la conservation de l'énergie ???

**1928** : Nouveau problème lié au spin entier mesuré pour l'atome  $^{14}\text{N}$  (or  $A=14$  protons et  $A-Z=(14-7)=7$  électrons donc 21 fermions dont spin  $\frac{1}{2}$  entier attendu). Idem pour  $^6\text{Li}$

Certains théoriciens comme Niels Bohr vont jusqu'à remettre en cause la conservation de l'énergie, qui ne serait vérifiée que de façon statistique !!!!

# Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine



Mais Pauli ne peut se résoudre à abandonner la conservation de l'énergie

Il soumet par **lettre en décembre 1930** une explication basée sur la **possible existence d'une particule neutre inconnue de spin 1/2 au sein du noyau, qu'il appelle neutron.**

# Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine



Lettre de Wolfgang Pauli du 4 décembre 1930

Chers Mesdames, chers Messieurs les Radioactifs

Zürich, 4 décembre 1930

Comme va vous l'expliquer avec plus de détails celui qui vous apporte ces lignes et auquel je vous prie d'accorder toute votre bienveillante attention, il m'est venu en désespoir de cause, face à la statistique « fausse » concernant les noyaux N-14 et Li-6, ainsi que le spectre bêta continu, l'idée d'un expédient pour sauver le « principe d'échange » de la statistique et le principe de conservation de l'énergie. Il s'agit de la possibilité qu'il existe dans les noyaux des particules électriquement neutres, que je propose d'appeler neutrons, dotées d'un spin de valeur  $1/2$ , obéissant au principe d'exclusion, et qui de surcroît se distinguent des quanta de lumière par le fait qu'ils ne se déplacent pas à la vitesse de la lumière. La masse des neutrons doit être du même ordre de grandeur que celle des électrons et en tout cas non supérieure à 0.01 fois celle des protons. Le spectre bêta continu serait alors compréhensible si l'on suppose que, pendant la désintégration bêta, avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante. [...]

J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable car on aurait dû voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagner, et la gravité de la situation, due à la nature continue du spectre bêta, est éclairée par une remarque de mon très éminent prédécesseur, M. Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : "Oh ! Il vaut mieux ne pas y penser du tout, comme pour les nouveaux impôts.". Mais c'est bien pourquoi il importe de discuter sérieusement de tout chemin qui pourrait nous mener hors de l'impasse. Ainsi donc, chers Radioactifs, examinez et jugez. Malheureusement, je ne peux pas venir moi-même à Tübingen, ma présence à Zurich étant absolument requise en raison d'un bal qui a lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre. [...]

Votre très dévoué,

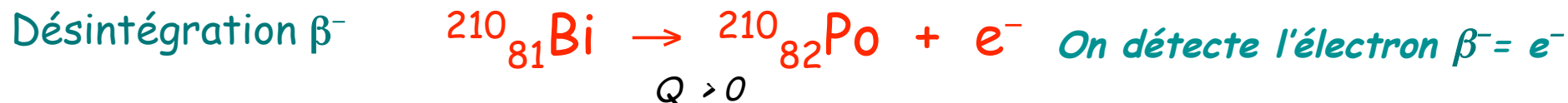
W. Pauli

6

(traduction Claude Maillard - Wolfgang Pauli, Physique moderne et philosophie, Albin Michel, Paris, 1999)

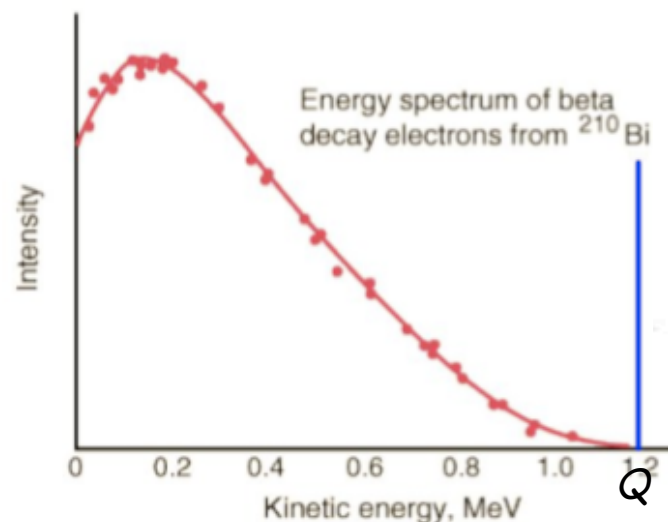
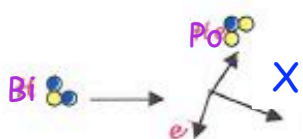
# Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine

## Explication de ce spectre continu...

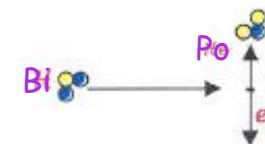


### Observations

*Spectre continu observé = spectre à 3 corps !!*



*Spectre à 2 corps attendu = 1 raie à Q*



*Pour satisfaire la conservation de l'énergie et du moment cinétique et comprendre le spectre observé*

*⇒ Il faudrait une 3ème particule dans la désintégration (X)*

*→ de spin 1/2*

*→ de masse très petite ( $\sim 0,01 m_p c^2$ )*

*→ emportant une partie de l'énergie disponible*

*$e^-$  et X se partagent l'énergie disponible*



# Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine

Ainsi donc, la crise du spin et de l'énergie serait résolue...



▪ Pour noyau  $^{14}\text{N}$  :  $(A \text{ protons} + 1 \text{ « neutron de Pauli »} + (A-Z) \text{ électrons}) \times \text{spin } 1/2 = \text{entier !}$

*Crise du spin ok*

▪ Lors de la désintégration du noyau, cette particule est émise en même temps que l'électron

*Crise du spectre continu ok*

Pauli vient d'inventer à la fois le terme neutron et le neutrino

**1932** : Chadwick (prix Nobel 1935) observe un nouveau rayonnement en bombardant du béryllium avec des particules alpha. Il est composé de particules de masse approximativement égale à celle du proton mais sans charge électrique : ce sont **les neutrons** (ceux que nous connaissons, beaucoup plus massifs que l'électron).

La découverte expérimentale soulage le monde scientifique...

Heisenberg sur une idée de Majorana propose :

**un noyau = Z protons + (A-Z) neutrons** (il n'y a plus d'électron)

**1933** : Fermi propose une **théorie de la désintégration  $\beta$**  et il appelle **neutrino** la particule de Pauli, qui pour lui est « plus petite » (moins lourde !!!) que le neutron du noyau découvert par Chadwick !





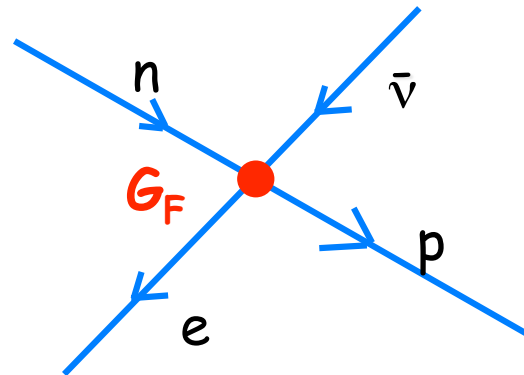
# Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine

## Les décroissances $\beta^-$ , $\beta^+$ et c.e. : exemples d'interaction faible



Fermi : théorie de l'interaction faible avec neutrino en tant qu'interaction de contact dans les désintégrations  $\beta$

désintégration  $\beta^-$  :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$



Constante de couplage de Fermi :

$$G_F = 1.17 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

(incertitude  $10^{-11}$ )

$\ll \alpha = 1/137$  constante de structure fine de l'interaction électromagnétique

Interaction faible :

- interaction dite de contact car sa portée vaut  $\sim 10^{-3} \text{ fm}$  ( $10^{-18} \text{ m}$ )  $\ll$  aux dimensions nucléaires
- périodes de désintégration très longues
- faibles intensités

# En résumé : quelques propriétés des neutrinos

**Origine** : par les désintégrations de type  $\beta$

Particule **postulée** par Pauli, **confirmée** par Fermi dans sa théorie

**masse = 0 dans le Modèle Standard (en fait très faible mais non nulle),**

**spin = 1/2, charge électrique = 0**

**fermion élémentaire de la matière**

**3 saveurs : neutrinos électron, muon et tau (+ 3 antineutrinos)**



**Interagit très peu avec la matière**

→ **particule qui n'est sensible qu'à l'interaction faible (et gravitation)**

→ **difficile à détecter et à étudier car un neutrino peut traverser la Terre sans être arrêté : des neutrinos de basse énergie (dizaine de MeV) pourraient traverser une longueur de plomb égale à une année-lumière sans que la moitié d'entre eux n'interagisse...**

**Exemple : section efficace de capture d'un neutrino  $\nu_e$  par un nucléon :**

→ **vaut  $\sim 10^{-47} \text{ m}^2$  pour un neutrino de quelques MeV,**

→ **augmente avec  $E_\nu$  jusqu'à  $\sim 10^{-42} \text{ m}^2$  à 1 GeV, et  $10^{-40} \text{ m}^2$  à 100 GeV**

→ **à comparer à la section efficace de capture d'un proton de 1 GeV qui est  $10^{14}$  fois plus grande !!...**

⇒ Taux d'interaction très faible : il faudra donc attendre 1956 pour la 1ère observation expérimentale d'anti-neutrinos électroniques issus du réacteur nucléaire de Savannah River (USA) par Cowan et Reines (prix Nobel 1995) : réaction bêta inverse

The diagram illustrates the experimental setup for the detection of anti-electron neutrinos. It shows a central detector consisting of a 7.6 cm thick layer of water (H<sub>2</sub>O) and cadmium chloride (CdCl<sub>2</sub>) solution, sandwiched between two layers of liquid scintillator. The scintillator is connected to photomultiplier tubes (PM). The diagram depicts the initial interaction of an anti-neutrino ( $\bar{\nu}_e$ ) with a proton (p) to produce a neutron (n) and a positron (e<sup>+</sup>). The positron then annihilates with an electron (e<sup>-</sup>), producing two gamma photons ( $\gamma$ ). The neutron is captured by a cadmium atom (Cd), which then decays, producing three gamma photons ( $\gamma$ ). The chemical equation at the bottom is  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e$ .

Labels in the diagram include: scintillateur liquide, H<sub>2</sub>O + CdCl<sub>2</sub>, scintillateur liquide, PM, intraction initiale, annihilation,  $\bar{\nu}_e$ , n, p, e<sup>+</sup>, e<sup>-</sup>,  $\gamma$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma$ , and 7,6 cm.

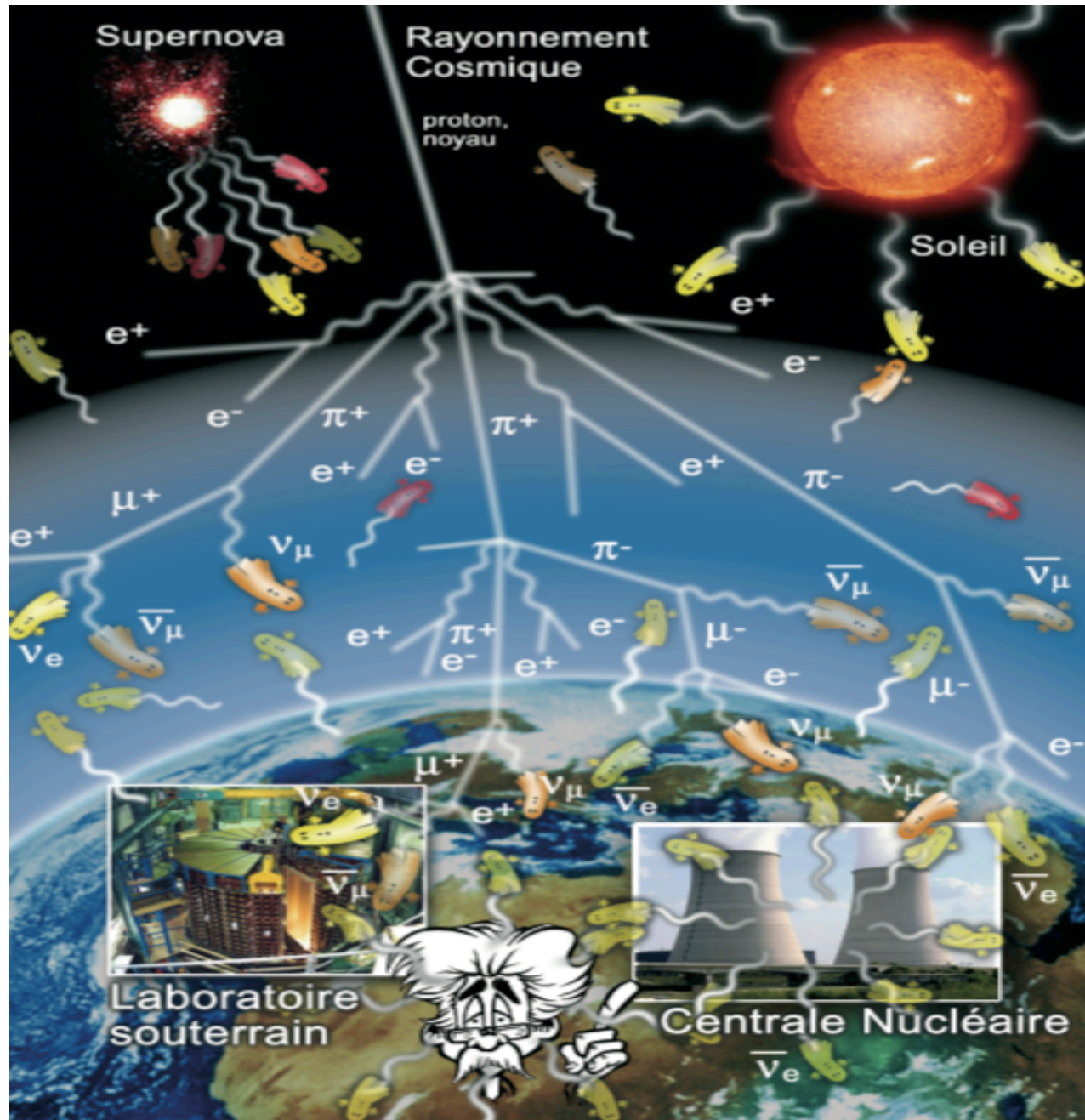
Le neutron est capturé par un atome de cadmium qui en se désexcitant produit 3 photons gamma.

Par ailleurs, le positon s'annihile avec les électrons pour donner 2 photons gamma.

400 L d'un mélange d'eau et de chlorure de cadmium ;  
 Détection des gammas : sur  $5 \times 10^{13}$  antineutrinos électron émis/s.cm<sup>2</sup> par le réacteur, seulement 3 événements/h détectés

### 3- Les sources de neutrinos

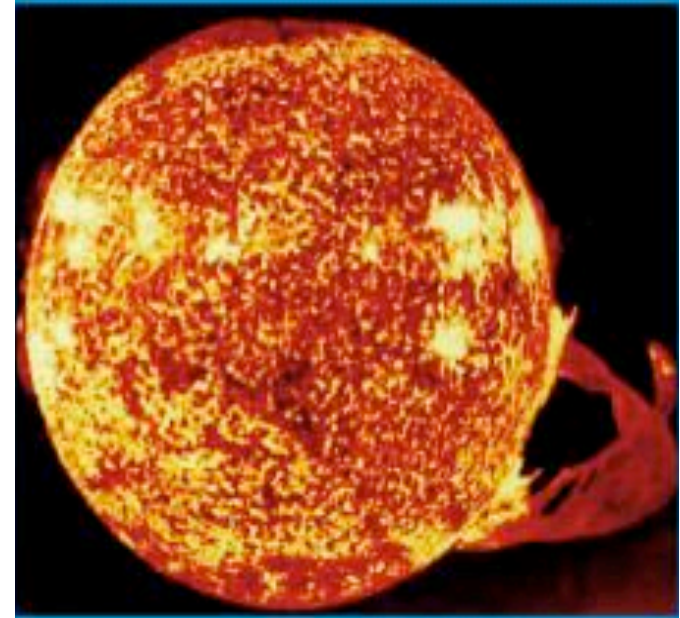
Sources naturelles ou artificielles : des neutrinos en provenance de l'espace ou de la Terre...



# Les sources de neutrinos

## Les sources naturelles de neutrinos

- 1) Les désintégrations isobariques ( $\beta^-$ ,  $\beta^+$  et c.e) : émission d'(anti)neutrinos électroniques
- 2) Les neutrinos émis par le soleil (neutrinos électroniques)

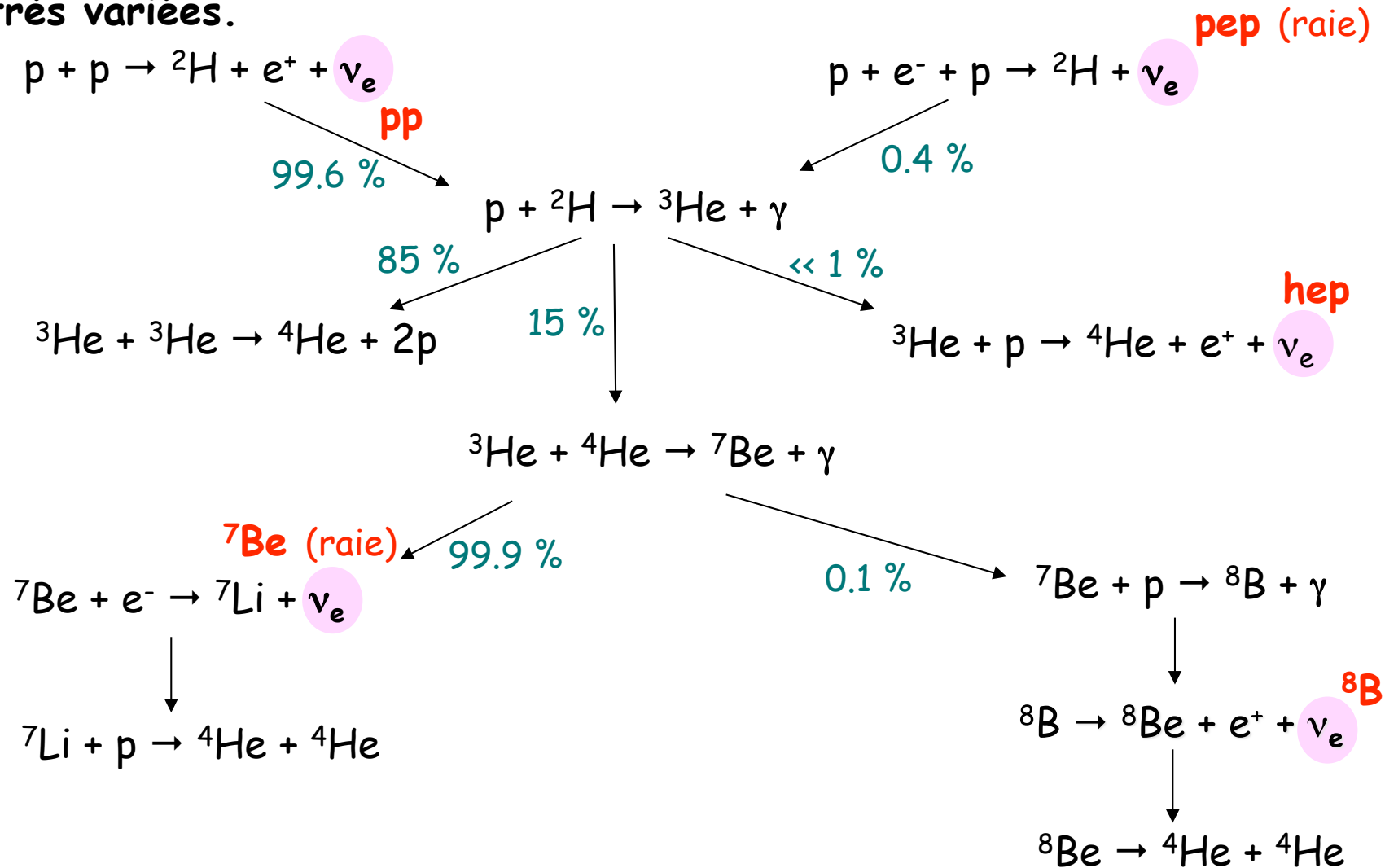


# Les sources de neutrinos

## Les neutrinos solaires : exemple du cycle pp

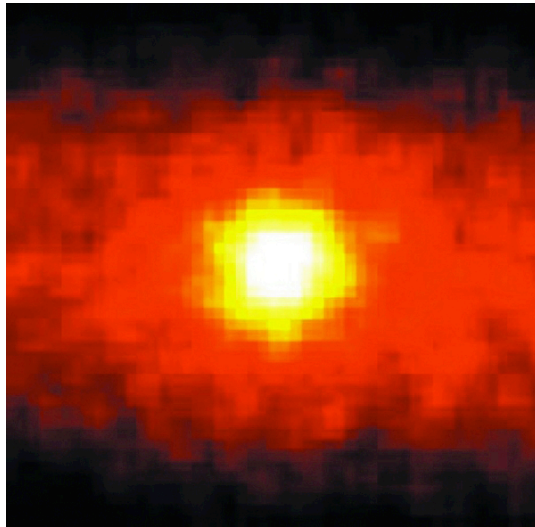
Réactions nucléaires au sein du soleil sources de **neutrinos électroniques**.

Exemple du **cycle pp** (98 % de l'énergie émise par le soleil) :  $\nu_e$  de différentes énergies (raies et spectres continus) et avec des abondances très variées.

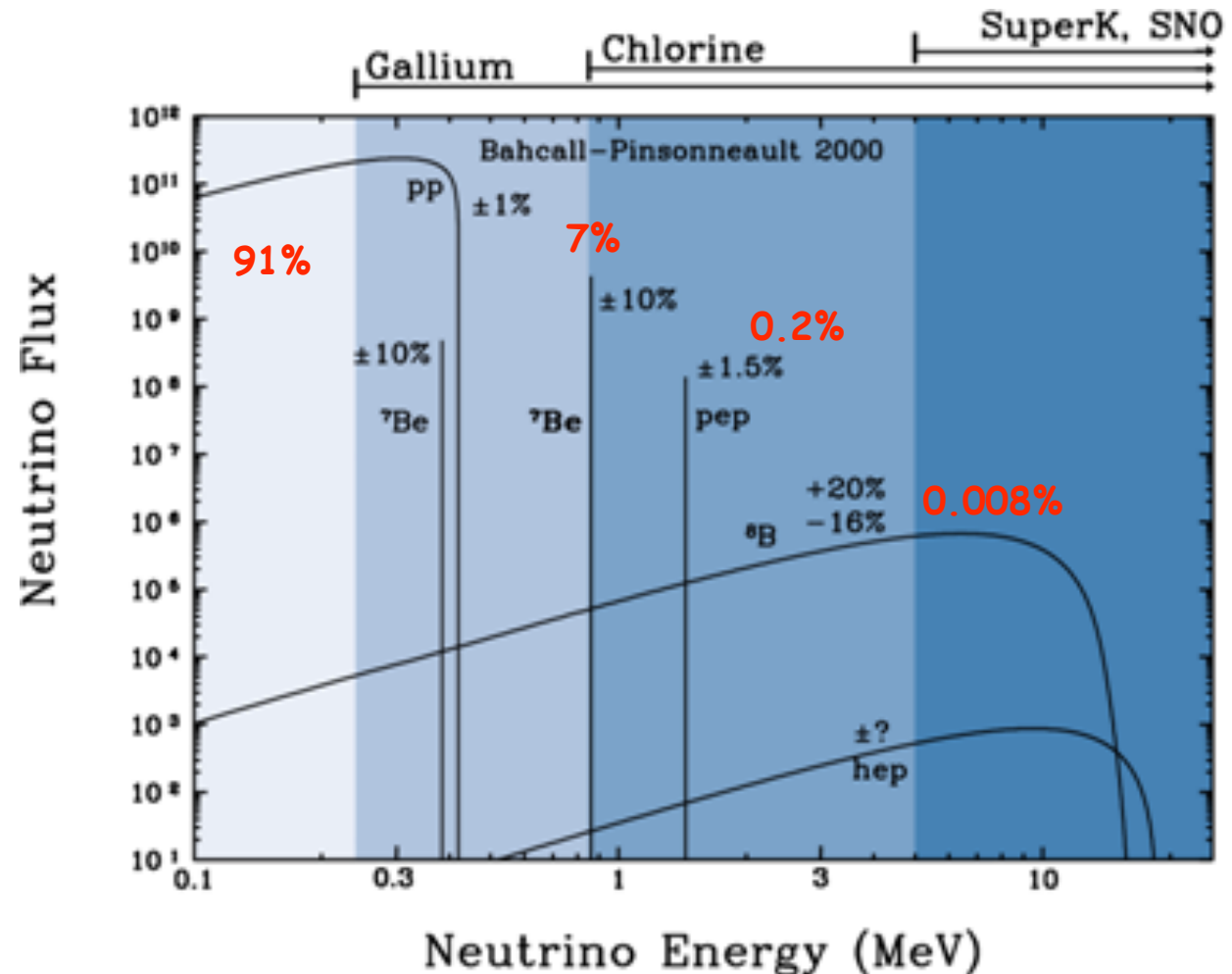


# Les sources de neutrinos

## Spectre en énergie des $\nu_{\odot}$



Il faut un modèle solaire pour les différents flux

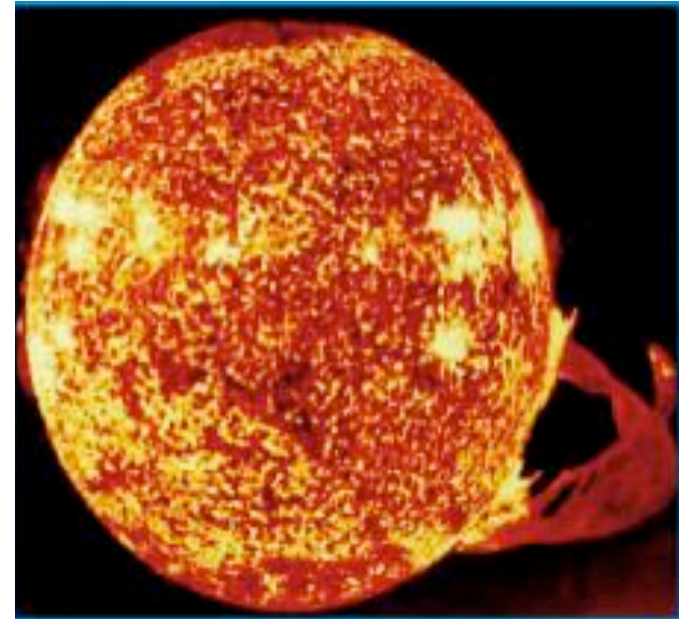


Les détecteurs sont constitués de chlore, de gallium, ou remplis d'eau (SuperK), d'eau lourde (SNO) ou de liquide scintillant (Borexino)...  
Chaque détecteur est sensible à un ou plusieurs types de neutrinos.

# Les sources de neutrinos

## Les sources naturelles de neutrinos

- 1) Les désintégrations isobariques ( $\beta^-$ ,  $\beta^+$  et c.e) : émission d'(anti)neutrinos électroniques
- 2) Les neutrinos émis par le soleil (neutrinos électroniques)

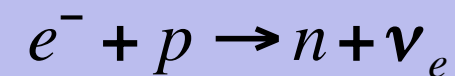


- 3) Les (anti)neutrinos issus d'explosion de supernovae et du cosmos...

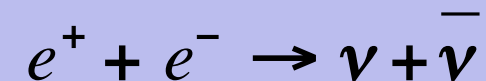


Supernova SN1987A lors de son explosion.

Neutrinos issus des supernovae



(Anti)neutrinos issus du cosmos



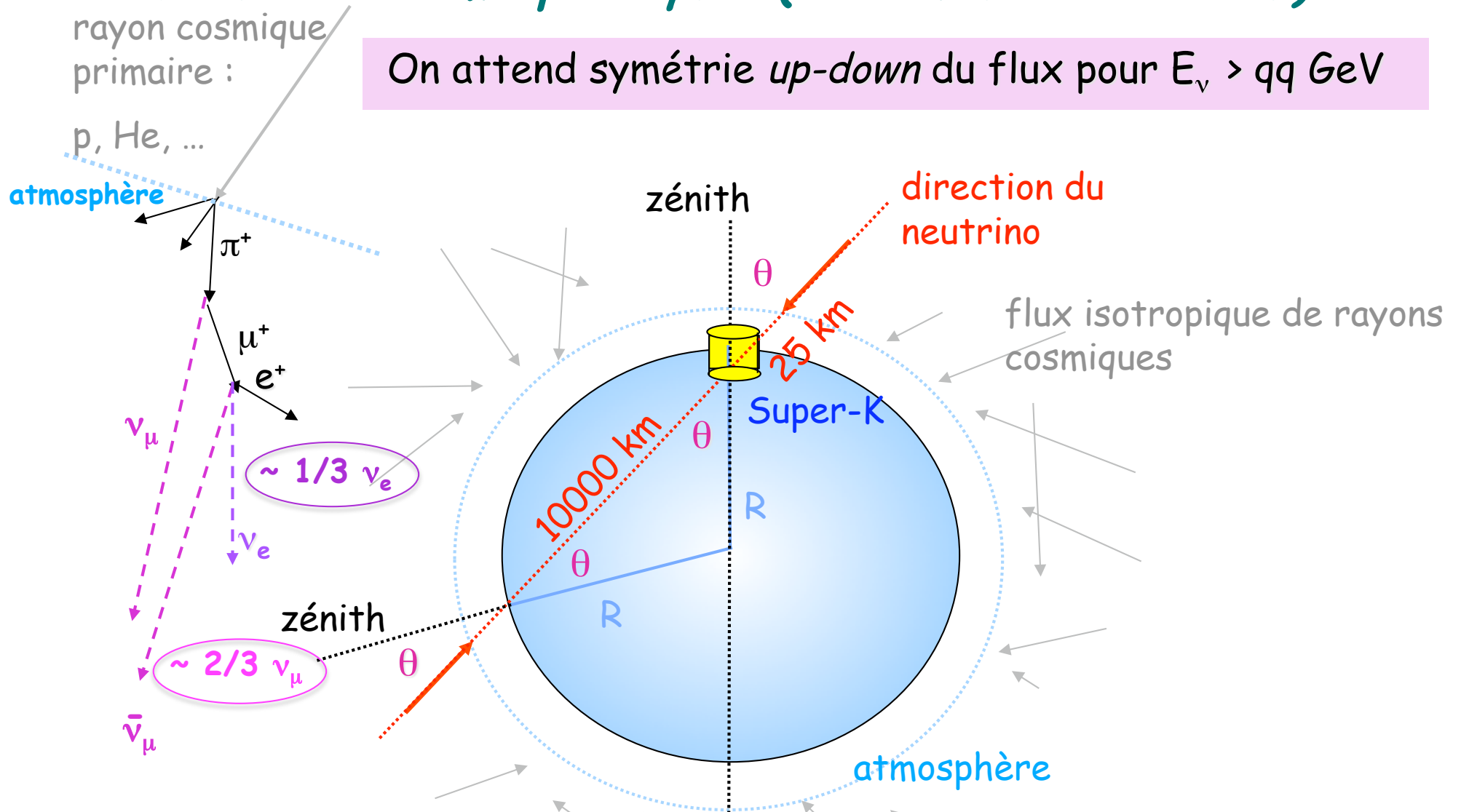
- 4) Les neutrinos atmosphériques présents dans les rayonnements cosmiques



# Les sources de neutrinos

## Neutrinos atmosphériques (500 MeV → 100 GeV)

On attend symétrie up-down du flux pour  $E_\nu > 100$  GeV



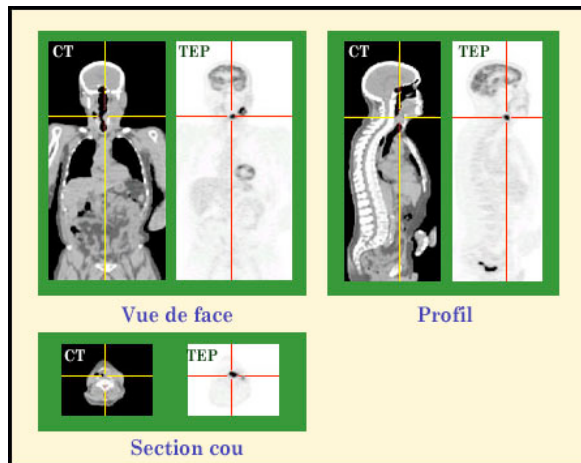
Emission de  $\nu_e$  et  $\nu_\mu$  avec taux  $\nu_\mu / \nu_e \sim 2$  pour  $E_\nu < \text{quelques GeV}$   
Les détecteurs doivent pouvoir distinguer les 2 types de neutrinos

# Les sources de neutrinos

## Les sources artificielles de neutrinos

### Les centrales nucléaires

La centrale nucléaire de Chooz, dans les Ardennes, émet  $18 \times 10^{20}$  (anti)neutrinos/s



### La médecine nucléaire

Une caméra TEP (tomographie à émission de positrons) utilise des sources radioactives  $\beta^+$  donc émission de  $\nu_e$  (puis  $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$ )

Les bombes ou les accidents nucléaires



# En résumé : quelques chiffres.... incroyables mais vrais !

Reines : « *Un neutrino, ce n'est rien, quasiment rien... C'est la quantité de réel la plus ténue jamais imaginée par un être humain !* »

Rien... d'accord ! Mais en très grande quantité car les neutrinos sont partout !!

\* En provenance de l'espace :

- **Big-Bang** :  $\sim 330 \nu/\text{cm}^3$  reliques (fin de l'absorption par les p), équilibre thermique  $T = 1.9 \text{ K}$  (source de  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$  et  $\bar{\nu}_\tau$ ), vitesse 15 000 km/s, non détectés : à comparer à  $0.5 \times 10^{-6}$  protons ou 1000 photons dans  $1 \text{ cm}^3$

- **Soleil** : énergie produite par réactions nucléaires (interaction faible) source de  $\nu_e$ .

Flux  $2 \times 10^{38} \nu \cdot \text{s}^{-1}$ . Arrivant sur la Terre :  $\sim 70 \times 10^9 \nu \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

- Explosion de **supernovae** (source de  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ ) : émission de  $\nu$  durant 1 seconde.

\* **Directement sur Terre**, nous traversant :

- **radioactivité** naturelle (roches, source de  $\nu_e$  et  $\bar{\nu}_e$ ) :  $\sim 20 \times 10^6 \nu \cdot \text{s}^{-1}$  et du corps humain :  $\sim 4000 \nu \cdot \text{s}^{-1}$  venant du potassium 40 (personne de 60 kg et surface  $1 \text{ m}^2$ )

- **réacteurs** nucléaires (source de  $\bar{\nu}_e$ ) : à 1 km, autant que venant du Soleil...

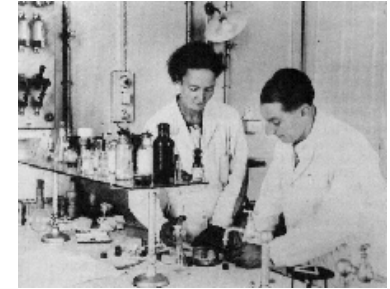
- abondant  $\left\{ \begin{array}{l} - \text{neutrinos atmosphériques de gerbes cosmiques (source de } \nu_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_e \text{ et } \bar{\nu}_\mu). \\ - \text{production dans des accélérateurs (source de } \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu \text{ et } \bar{\nu}_\tau). \end{array} \right.$

## 4- Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

1930 : Pauli **postule** le neutrino

1934 : Fermi propose sa théorie des désintégrations  $\beta$

1934 : Radioactivité  $\beta^+$  découverte par I. et F. Joliot-Curie.



1937 : Majorana suggère  $\nu = \bar{\nu}$

1953 : Introduction du nombre leptonique L par Alvarez.

1955 : Violation maximale de parité (miroir) dans les désintégrations  $\beta$

1956 : Cowan et Reines **découvrent** l'antineutrino électronique



1957 : Pontecorvo suggère l'existence **d'oscillations** entre saveurs de  $\nu$  par analogie avec  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ .

1957 : Goldhaber démontre expérimentalement que le  $\nu$  est une particule **d'hélicité gauche**.



**ATTENTION, UN PETIT MOMENT PLUS DIFFICILE :**  
**QUATRE SLIDES UN PEU PLUS ARDUES**

(voir aussi cours de Sébastien)

# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

## Quelques mots sur l'hélicité des neutrinos

hélicité  $h$  d'une particule = projection du spin dans la direction de son impulsion  
(voir aussi cours Sébastien)

$$h = \frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{\|\vec{p}\|}$$

Goldhaber (1957) :

Mesure de l'hélicité du  $\nu$  : elle est négative  
avec degré de polarisation =  $90^{+10}_{-20}$  %



Goldhaber

Si les particules sont massives on utilise la **chiralité** (gauche ou droite) plutôt que l'hélicité.

Dans la nature on observe que :

- tous les neutrinos sont gauches ou left  $\nu_L$  (correspond à hélicité négative)
- tous les antineutrinos sont droits ou right  $\bar{\nu}_R$  (hélicité positive).

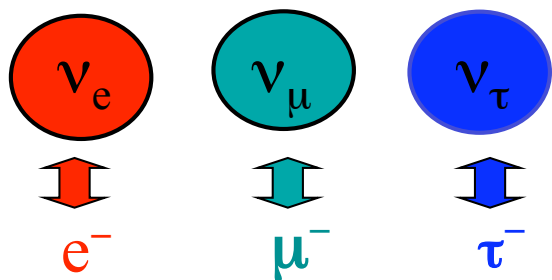
# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

## Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

### Neutrinos et Modèle Standard

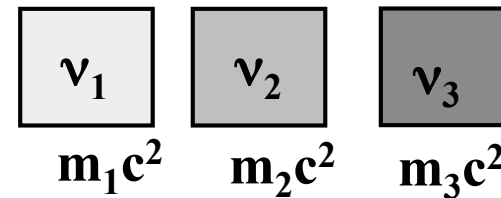
neutrino = fermion élémentaire de la matière, spin 1/2, lepton neutre  
3 saveurs pour 3 familles

Modèle standard minimal → les neutrinos sont de Dirac ( $\nu \neq \bar{\nu}$ ), et  $m_\nu c^2 = 0$ ,  
3 doublets de leptons de chiralité gauche :  
 $(e^-, \nu_e)_L$ ,  $(\mu^-, \nu_\mu)_L$  et  $(\tau^-, \nu_\tau)_L$



Mais si neutrinos massifs

→ 3 états propres de masse



**Mélange**  
(ou mixing)

Etats  
propres de  
saveur

≠

Etats  
propres  
de masse

oscillations

# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

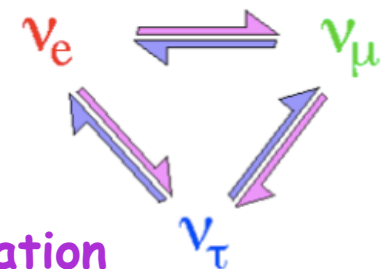
## Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

Chacun des neutrinos de saveur que l'on observe ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$ ) peut donc être un mélange de plusieurs neutrinos virtuels états propres de masse ( $\nu_1$ ,  $\nu_2$  et  $\nu_3$ ), mais dans des proportions différentes

Pontecorvo  
1957



La mécanique quantique permet de montrer qu'un neutrino d'énergie  $E_\nu$ , produit avec une saveur donnée ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$ ), peut se transformer au cours de sa propagation sur une longueur  $L$  en un neutrino d'une autre saveur.



On dit que les neutrinos oscillent au cours de leur propagation (dépend de  $E_\nu$  et de  $L_{osc}$  la longueur de propagation des neutrinos)

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

avec  $U$  = matrice de mélange des neutrinos MNSP (Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo)

Paramètres de  $U$   
3 masses  $m_1, m_2, m_3$   
3 angles de mélange :  $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$   
+ 1 phase de violation de CP  $\delta_{CP}$

23

(comme pour quarks, matrice CKM, cours Sébastien)

# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

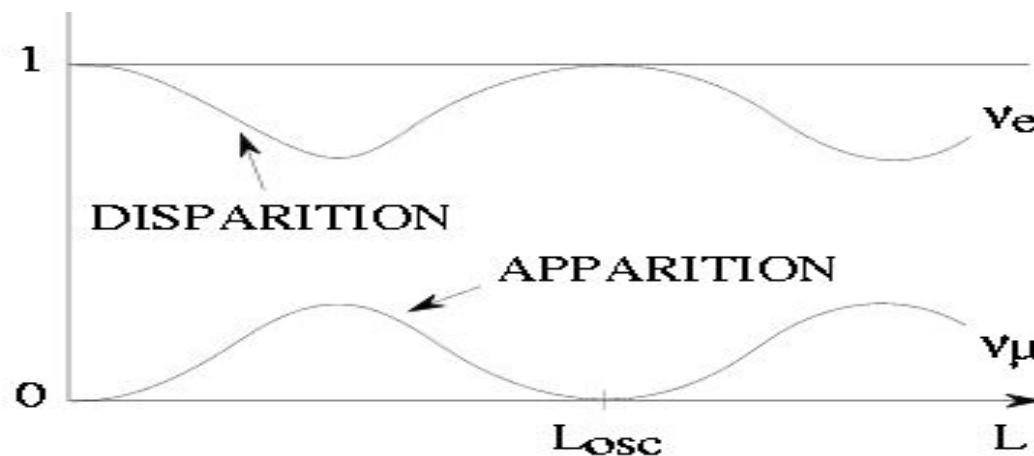
## Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

Exemple pour l'oscillation  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  (pour un mélange à deux saveurs)

À  $t = 0$ , on suppose qu'on a seulement des  $\nu_e$ , à  $t > 0$ , la propagation débute sur une longueur d'oscillation  $L_{osc}$  et la probabilité d'oscillation  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  s'écrit :

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left[ 1.27 |\Delta m_{12}^2| (\text{eV}^2) \frac{L_{osc} (\text{km})}{E_\nu (\text{GeV})} \right]$$

avec  $\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2$  et  $\theta_{12}$  = angle de mélange entre les états 1 et 2



Si on mesure  $\nu_e$  :  
disparition

Si on mesure  $\nu_\mu$  :  
apparition

On définit la longueur d'oscillation  $L_{osc} (\text{m}) = 2.5 E_\nu (\text{MeV}) / \Delta m^2 (\text{eV}^2)$



# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

**1930** : Pauli **postule** le neutrino

**1934** : Fermi propose sa théorie des désintégrations  $\beta$

**1934** : Radioactivité  $\beta^+$  découverte par I. et F. Joliot-Curie.

**1937** : **Majorana** suggère  $\nu = \bar{\nu}$ .

**1953** : Introduction du nombre leptonique  $L$  par Alvarez.

**1955** : Violation maximale de parité dans les désintégrations  $\beta$

**1956** : Cowan et Reines **découvrent** l'antineutrino électronique

**1957** : Pontecorvo **suggère** l'existence **d'oscillation** entre saveurs de  $\nu$  par analogie avec  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ .

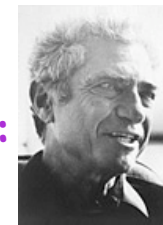
**1957** : Goldhaber démontre expérimentalement que le  $\nu$  est une particule d'hélicité gauche.



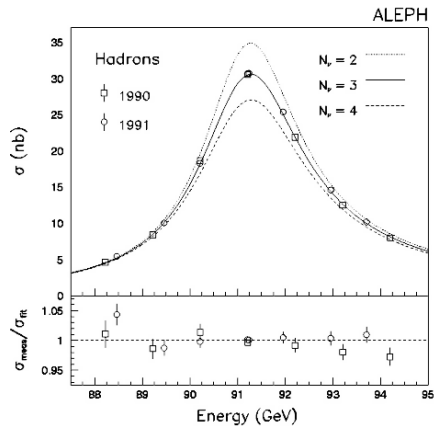
**1959** : Davis (prix Nobel 2002) montre expérimentalement que la réaction  $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$  est impossible (ce qui confirme la conservation du nombre leptonique  $L_e$ ).



**1962** : Découverte d'une **deuxième saveur de neutrinos** :  $\nu_\mu \neq \nu_e$  en détection directe par Schwartz, Steinberger et Lederman (prix Nobel 1988) (corrobore aussi le fait que  $L_e \neq L_\mu$  et la conservation de  $L$  global).



# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes



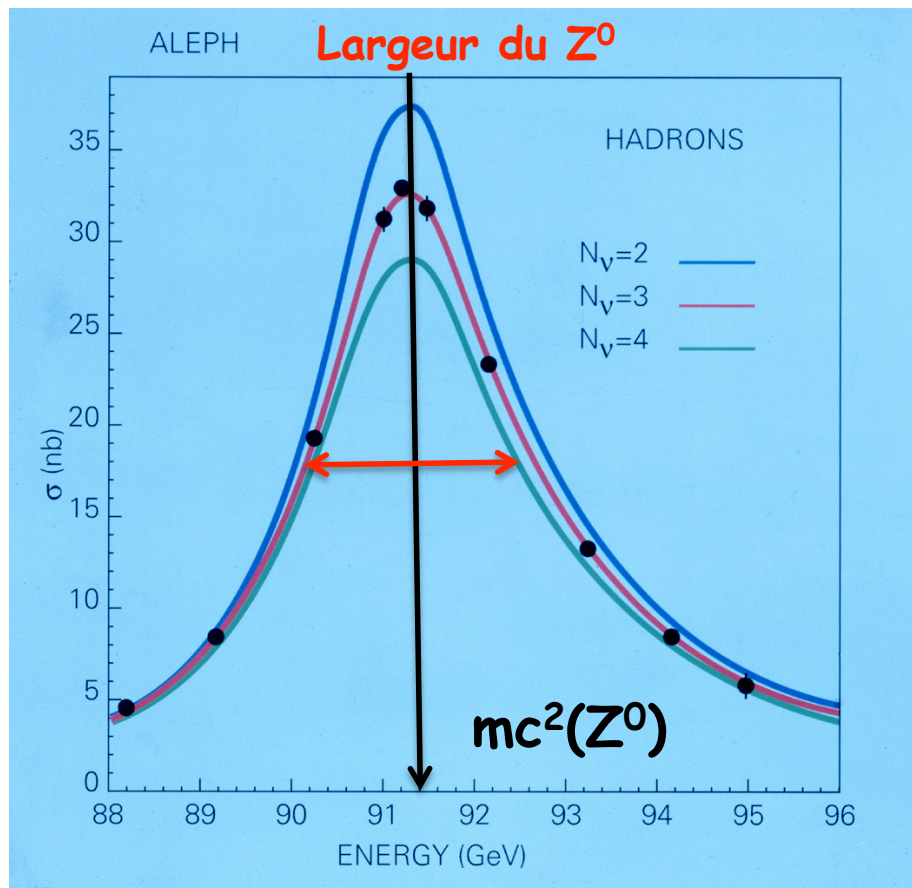
**1963** : Maki, Nakagawa et Sakata proposent l'oscillation entre saveurs  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ .

**1968** : Premières mesures du flux de  $\nu_\odot$  par Davis (Homestake) montrent déficit d'1/3 des  $\nu_e$  attendus.

**1989** : LEP mesure le nombre de familles dans le Modèle Standard : il est de 3.

# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

## 3 saveurs de neutrinos légers...



Accélérateur  $e^+e^-$  LEP au CERN :

Phase 1 (1989-1995) avec  $\sqrt{s}$  = énergie disponible =  $M_Z c^2 = 91$  GeV

$16 \times 10^6$   $Z^0 \rightarrow f \bar{f}$  collectés dans 4 détecteurs (ALEPH, DELPHI, L3, OPAL) pour mesurer les propriétés du boson  $Z^0$

1989 : mesure du nombre de saveurs de  $\nu$  tels que  $m_\nu < m_Z/2$  par mesure de la largeur totale  $\Gamma_Z$  et des largeurs de désintégration partielles du  $Z^0$  en leptons et quarks :  $N_\nu = (2,984 \pm 0,008)$

Conclusion : 3 familles de fermions élémentaires dans le M.S.

Preuve expérimentale que 3 et seulement 3 neutrinos se couplent au  $Z^0$  mais n'exclut pas la possibilité de neutrino hyper-lourd ou stérile.

→ 3 saveurs connues  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  (nombre mesuré en 1989) et toutes ont été observées expérimentalement (depuis 2000)

# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

**1963** : Maki, Nakagawa et Sakata proposent l'oscillation entre saveurs  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ .

**1968** : Premières mesures du flux de  $\nu_\odot$  par Davis (Homestake) montrent déficit d'1/3.

**1989** : LEP mesure le nombre de familles dans le Modèle Standard : il est de 3.

**1970-1990** : Utilisation intensive des neutrinos pour sonder la structure nucléaire

**1998** : Observation des oscillations  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\chi$  des  $\nu_{\text{atm}}$  par SuperKamiokande au Japon.

**2000** : Découverte  $\nu_\tau$  par DONUT au FNAL.

**2001** : SNO au Canada détecte des  $\nu$  non électroniques parmi les  $\nu_\odot$  démontrant l'oscillation des  $\nu_e$ .

**2002** : KamLand (Japon) trouve un flux déficitaire de  $\bar{\nu}$  de réacteurs nucléaires par rapport aux  $\nu_\odot$ .

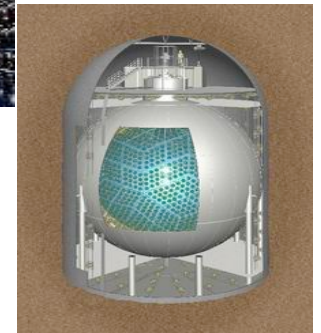
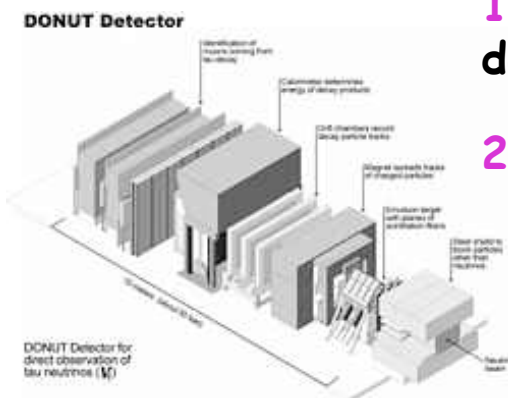
**Entre 2002 et 2010** : nombreuses expériences et résultats : ça oscille...

**2010** : Apparition de  $\nu_\tau$  dans OPERA (faisceau de  $\nu_\mu$  du Cern vers le Gran Sasso sur ~730 km) : preuve d'oscillations  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$

**2011-2012** : Indication d'oscillations  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$  par T2K, puis Double Chooz, ...  $\theta_{13}$  non nul... ouvrant la voie aux recherches sur la violation de CP dans le secteur leptonique

**2011-2012** : OPERA... des neutrinos supraluminiques... ou plutôt non !

**1998-2013** : Oscillations de saveur des neutrinos → Les neutrinos sont massifs !!



## 5- Neutrinos : une question de masse et de nature ?

- Mais quelle est la masse du neutrino ?

Masse nulle dans le modèle standard mais oscillations observées !

Question : si les  $\nu$  ont une masse non nulle, pourquoi est-elle si faible ?

Limites actuelles

$$m(\nu_e)c^2 < 2.2 \text{ eV (Mainz, Troitsk, désintégration } \beta^- \text{ du tritium)}$$

$$m(\nu_\mu)c^2 < 170 \text{ keV (SIN, } p_\mu \text{ dans } \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$$

$$m(\nu_\tau)c^2 < 18.2 \text{ MeV (ALEPH, } \tau \rightarrow 5\pi(\pi^0)\nu_\tau)$$

Rq. Les neutrinos sont tellement nombreux que si on avait  $m_\nu c^2 \sim 10^{-6} m_e c^2$  alors la masse de l'Univers serait dominée par les neutrinos !

- Existe-t-il une échelle de masse absolue pour les neutrinos ?

Les oscillations donnent des écarts sur les carrés des masses de  $\nu$

→ insuffisant car une échelle de masse absolue est fondamentale pour la cosmologie et pour obtenir une théorie unifiée des interactions

# Neutrinos : une question de masse et de nature ?

- Le neutrino a-t-il un moment magnétique ?

Si oui alors il existe une interaction électromagnétique entre  $e^-$  et  $\nu_e$

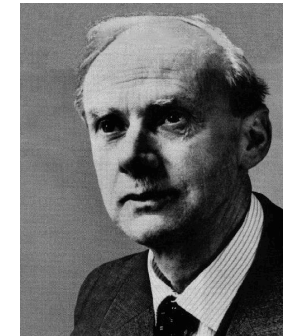
- Quelle est la nature du neutrino ?

→ Dans le MS, les neutrinos sont gauches et les antineutrinos sont droits, et ce sont deux particules différentes (Dirac)

→ A-t-on  $\nu \equiv \bar{\nu}$  ?



⇔ neutrino de Majorana  
→ un seul état de neutrino,  
avec deux états de chiralité  $\nu_L, \nu_R$



Si masse et  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Dirac} \\ \text{ou} \\ \text{Majorana} \end{array} \right.$  ⇔ oscillations possibles

# Neutrinos : une question de masse et de nature ?

## Quelles expériences peut-on utiliser ?

### 1- moment magnétique

Diffusion neutrino-électron à basse énergie

### 2- échelle de masse absolue

Temps de vol des neutrinos - Explosion de SN  $m_\nu < 20 \text{ eV}$

Fin du spectre  $\beta$  du Tritium  $m_\nu < 2.2 \text{ eV}$

Fluctuations du CMB (fond diffus cosmologique)

Mesures cosmologiques

### 3- nature Dirac/Majorana

Recherche de la double désintégration sans neutrinos  $\beta\beta 0\nu$  (qui peut être reliée à l'échelle de masse absolue)

### 4- matrice de mélange des neutrinos, violation de CP, hiérarchie de masse

Les oscillations de saveur avec neutrinos solaires, atmosphériques, de réacteur et d'accélérateurs

# Neutrinos : une question de masse et de nature ?

## Caractéristiques pour la détection

Il faut utiliser toutes les sources possibles de neutrinos : radioactivité naturelle, soleil, réacteurs,  $\nu$  atmosphériques, accélérateurs à  $\neq E$   
+ astronomie neutrino (ANTARES dans l'eau, IceCube avec 1 km<sup>3</sup> de glace) ...  
+ différentes méthodes de détection

avec

un neutrino créé = énergie ou impulsion manquante

ou

un neutrino qui interagit = mesuré par ses produits de réaction

Il faut **une très grande quantité de matière** pour augmenter la probabilité d'interaction avec les neutrinos

Problème du **bruit de fond radioactif** si énergie du neutrinos jusqu'à quelques MeV

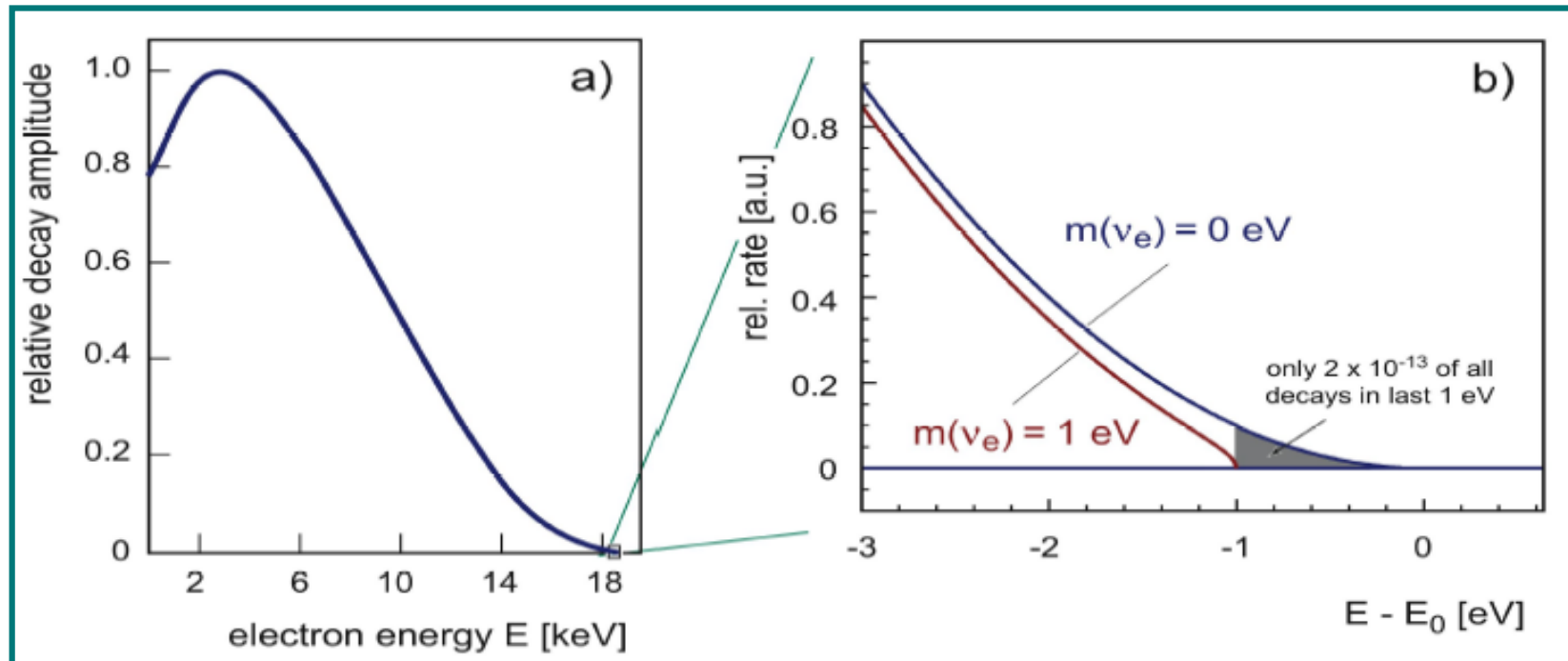
→ **Laboratoire Souterrain** pour protections contre les rayons cosmiques + **blindages** + sélection rigoureuse des matériaux les plus **radiopurs**



## Mesures directes

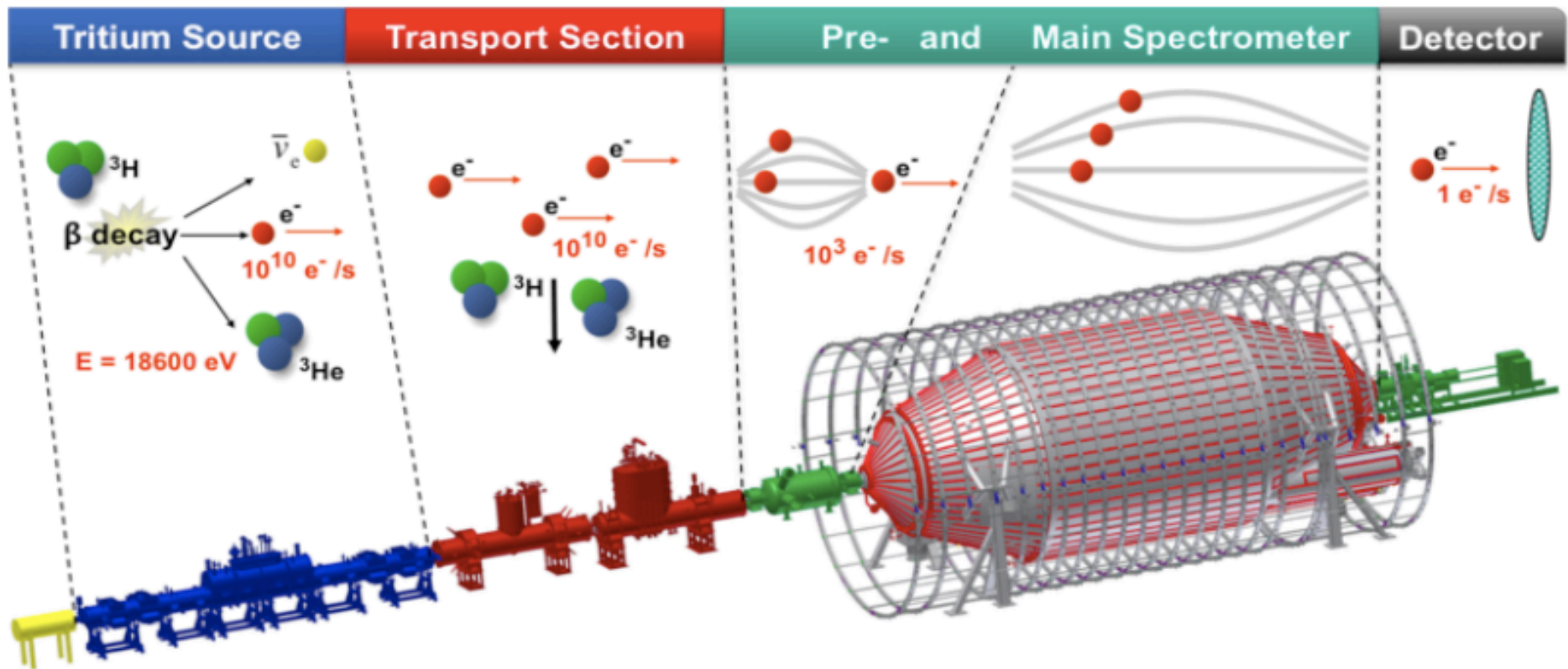
Désintégration bêta du tritium  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$  à  $Q = 18,57 \text{ keV}$

Spectre en énergie de l'électron (a), et région proche de la fin du spectre (b), pour une masse nulle de neutrino et pour  $m_{\nu}c^2 = 1 \text{ eV}$



MAINZ :  $m_{\nu_e}c^2 < 2.3 \text{ eV}$  (95% C.L.) et TROITSK :  $m_{\nu_e}c^2 < 2.05 \text{ eV}$  (95% C.L.)

2013 : détecteur KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino) en finalisation  
 d'assemblage à Karlsruhe pour mesurer  $m_{\nu_e}c^2$  avec une sensibilité de 0.35 eV  
 (ou limite  $< 0.2$  eV)



Tritium decays, releasing an electron and an anti-electron-neutrino. While the neutrino escapes undetected, the electron starts its journey to the detector.

Electrons are guided towards the spectrometer by magnetic fields. Tritium has to be pumped out to provide tritium free spectrometers.

The electron energy is analyzed by applying an electrostatic retarding potential. Electrons are only transmitted if their kinetic energy is sufficiently high.

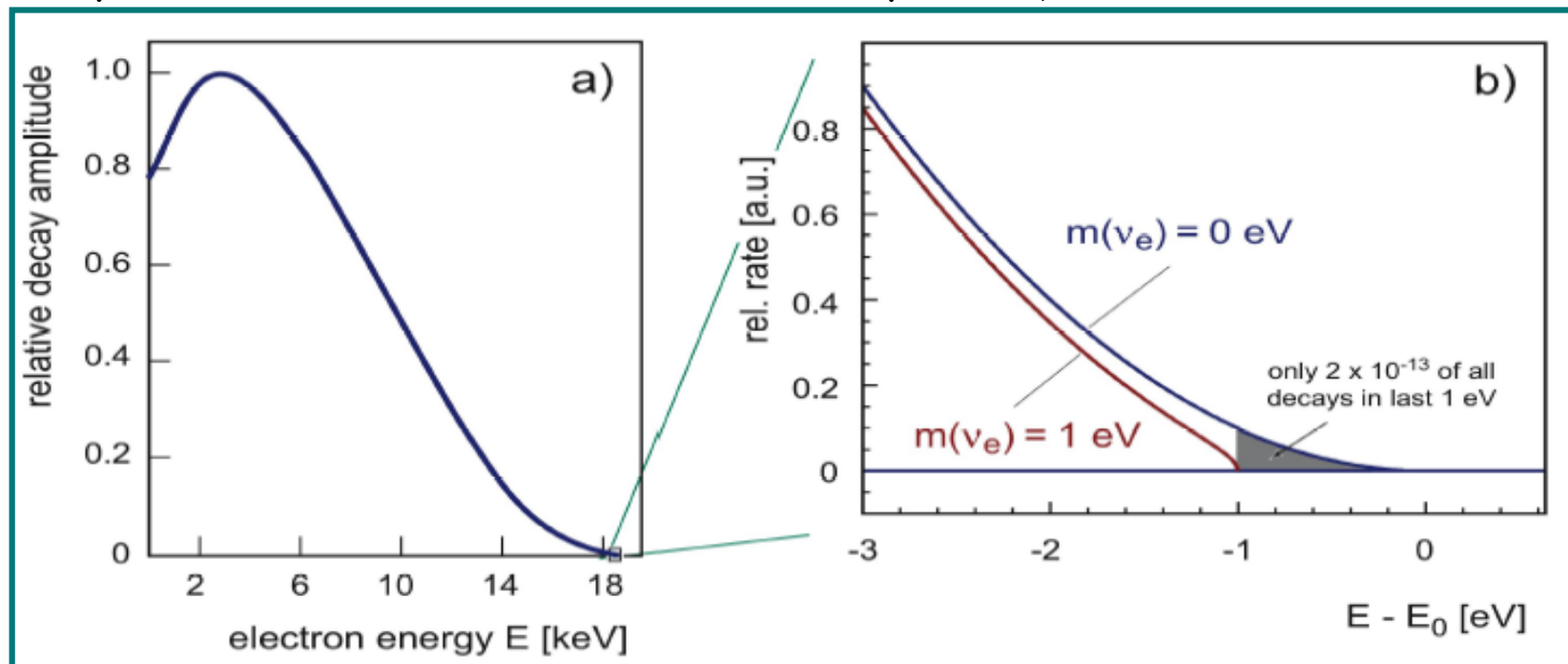
At the end of their journey, the electrons are counted at the detector. Their rate varies with the spectrometer potential and hence gives an integrated  $\beta$ -spectrum.

<http://www.katrin.kit.edu/>

## Mesures directes

Désintégration bêta du tritium  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$  à  $Q = 18,57 \text{ keV}$

Spectre en énergie de l'électron (a), et région proche de la fin du spectre (b), pour une masse nulle de neutrino et pour  $m_{\nu}c^2 = 1 \text{ eV}$



MAINZ :  $m_{\nu_e}c^2 < 2.3 \text{ eV}$  (95% C.L.) et TROITSK :  $m_{\nu_e}c^2 < 2.05 \text{ eV}$  (95% C.L.)

2013 : détecteur KATRIN pour mesurer  $m_{\nu_e}c^2$  avec une sensibilité de 0.35 eV (ou limite  $< 0.2 \text{ eV}$ )

Cosmologie : densité de matière combinée - WMAP et PLANCK-HFI

2009 :  $\sum_i m_i < 0,5 \text{ eV} \Rightarrow m_i < 0,17 \text{ eV}$  si  $m_1 = m_2 = m_3$

35

2013 :  $\sum_i m_i < 0,23 \text{ eV}$  et aucun élément en faveur d'un 4<sup>ème</sup> neutrino stérile

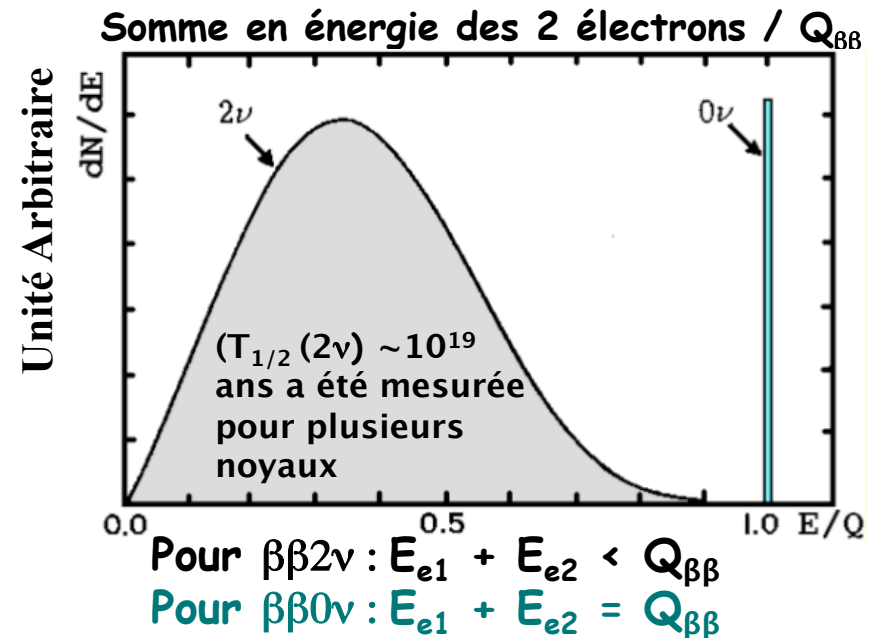
# Double désintégration bêta sans émission de neutrinos : si le neutrino est une particule de Majorana massive



Une découverte impliquerait  $\Delta L = 2$  (violation du nombre leptonique) et neutrino de Majorana ( $\nu \equiv \bar{\nu}$ ) massif

→ physique au-delà du Modèle Standard

Si le processus se produit par échange d'un neutrino massif léger



Période  $\beta\beta 0\nu$  
$$T_{1/2}^{0\nu} = \frac{1}{G(Q_{\beta\beta}^5, Z) |M|^2 \langle m_\nu \rangle^2} > 10^{25} \text{ années...}$$

$G$  : facteur d'espace de phase (calculable de façon exacte)

$|M|$  : élément de matrice nucléaire (NME), difficile à calculer

$\langle m_\nu \rangle$  : masse effective du neutrino

$$\langle m_\nu \rangle = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right|$$

$m_i$  : masse des états propres de neutrinos  
 $U_{ei}$  : éléments de la matrice de mélange  $U$

$\langle m_\nu \rangle$  pourrait donner une échelle absolue pour la masse des neutrinos

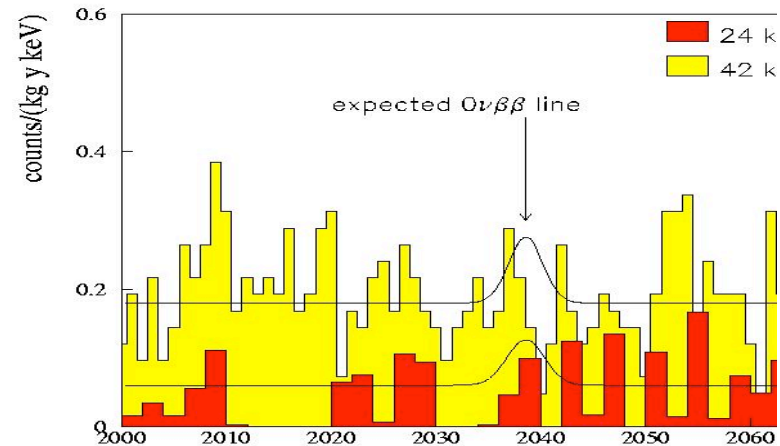
# Double désintégration bêta sans émission de neutrinos

## Expérience NEMO3

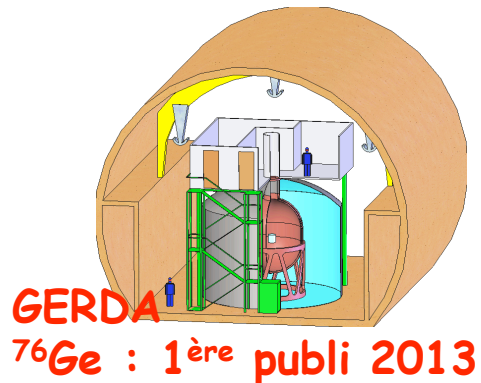
Neutrino Ettore Majorana Observatory  
 Laboratoire Souterrain de Modane (tunnel  
 du Fréjus) - finie en 2011



Meilleure limite en  $^{76}\text{Ge}$   
 (Heidelberg-Moscou / IGEX) au LNGS  
 $m_{\text{eff}} < 400-800 \text{ meV}$

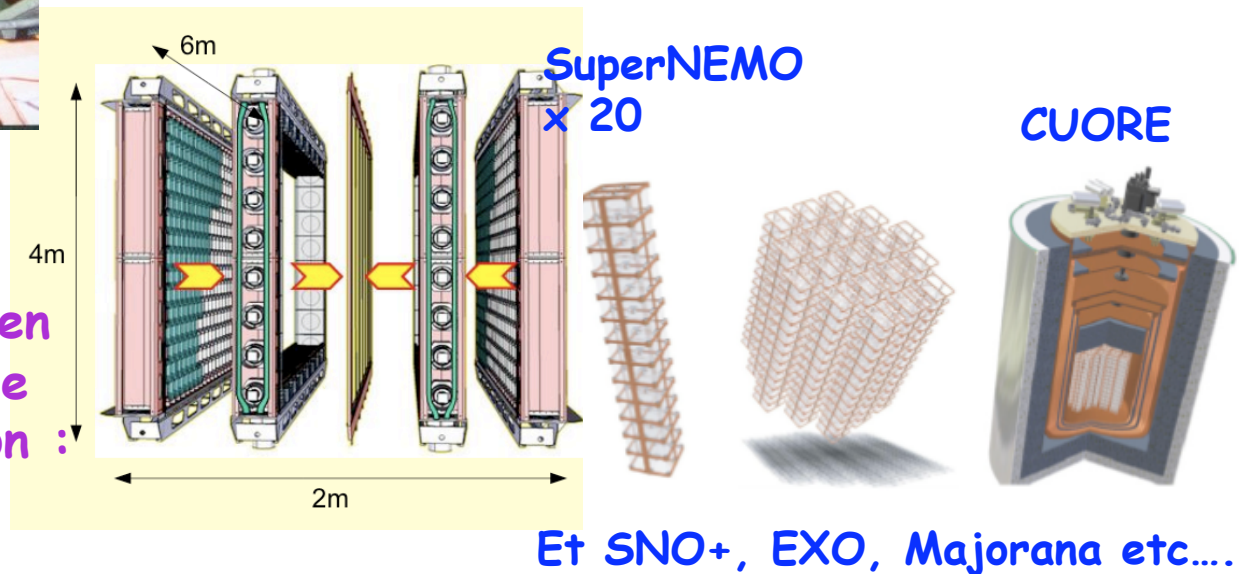


→ vers une masse effective  $< 50 \text{ meV}$  ?



GERDA  
 $^{76}\text{Ge}$  : 1<sup>ère</sup> publi 2013

Projets en  
 cours de  
 réalisation :

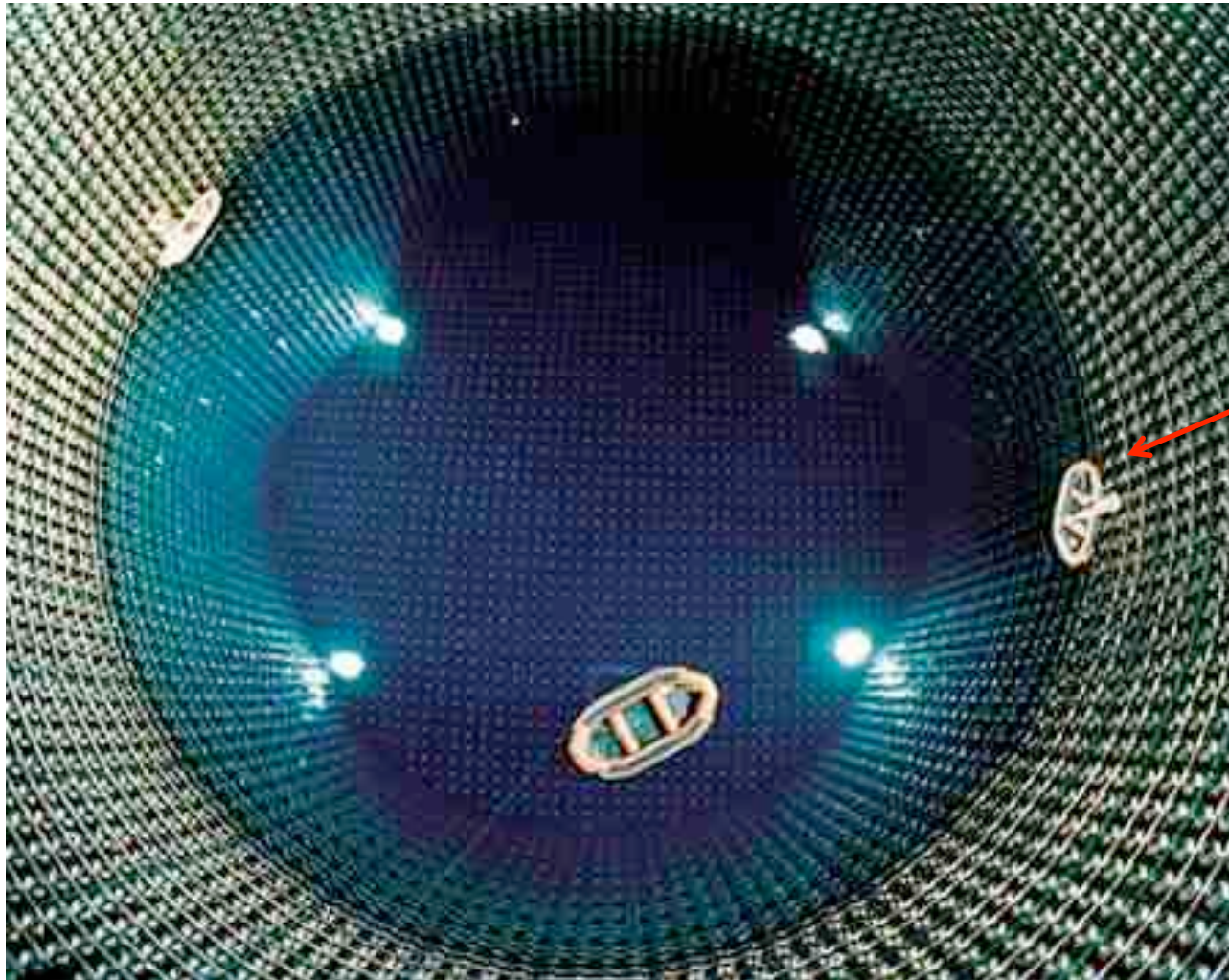


## Oscillations de saveur

### SK = SuperKamiokande (Japon)

Détection des neutrinos solaires et neutrinos atmosphériques

Piscine remplie de 50000 tonnes d'eau ultra-pure, située dans la mine de zinc Kamioka (Japon) à 1000 m sous terre, avec les parois tapissées de capteurs de lumière de type photomultiplicateurs, pour détecter les muons produits par des neutrinos mu



Physiciens sur  
bateau gonflable  
inspectant les  
capteurs

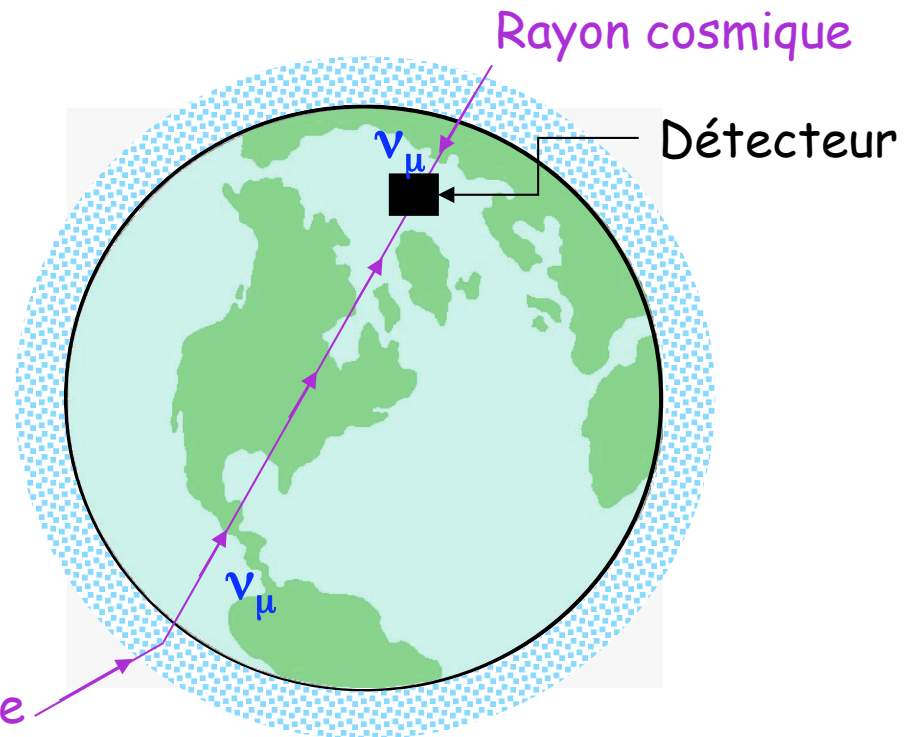
## Oscillations de saveur

SK = SuperKamiokande (Japon)

Exemple de résultats sur les neutrinos atmosphériques

Neutrinos e et mu détectés par interactions des électrons ou des muons dans le détecteur

Rayon cosmique



Pour des rayons cosmiques de plus de 2 GeV sans disparition de  $\nu_\mu$  (c'est-à-dire sans oscillations), on attend

$$\Rightarrow \frac{\phi_{\nu_\mu}(\text{up})}{\phi_{\nu_\mu}(\text{down})} = 1$$

mais Super-Kamiokande a montré que pour  $E_\nu > 1.3 \text{ GeV}$

$$\frac{\phi_{\nu_\mu}(\text{up})}{\phi_{\nu_\mu}(\text{down})} = 0.54 \pm 0.04 \quad \text{déficit de neutrinos mu}$$

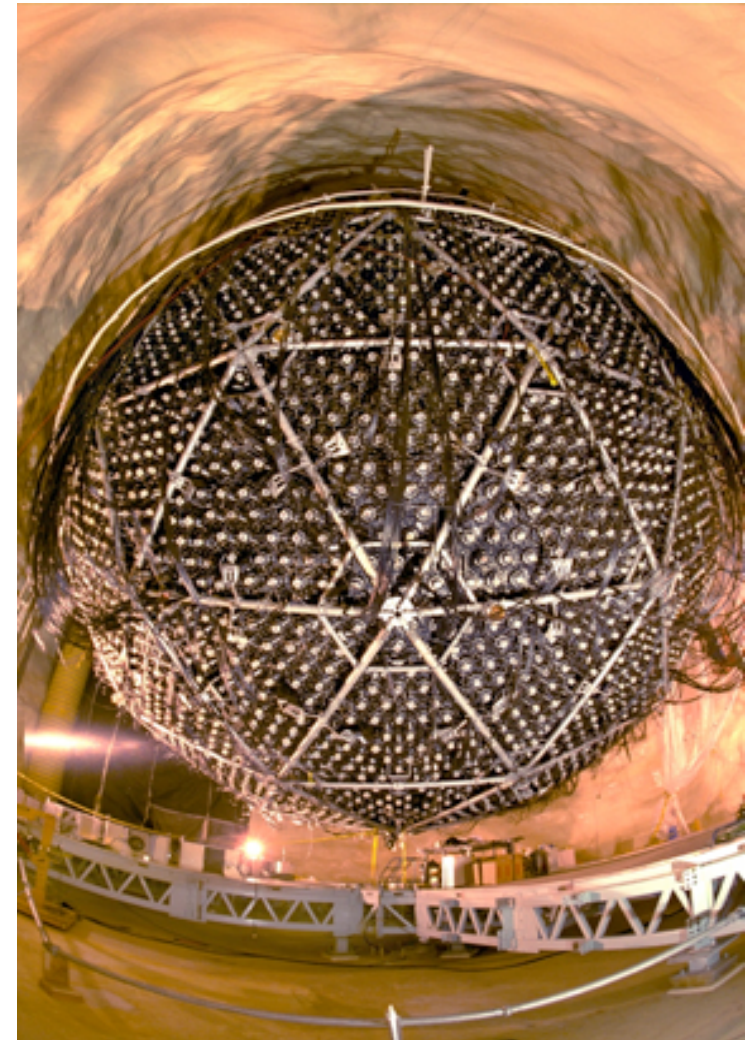
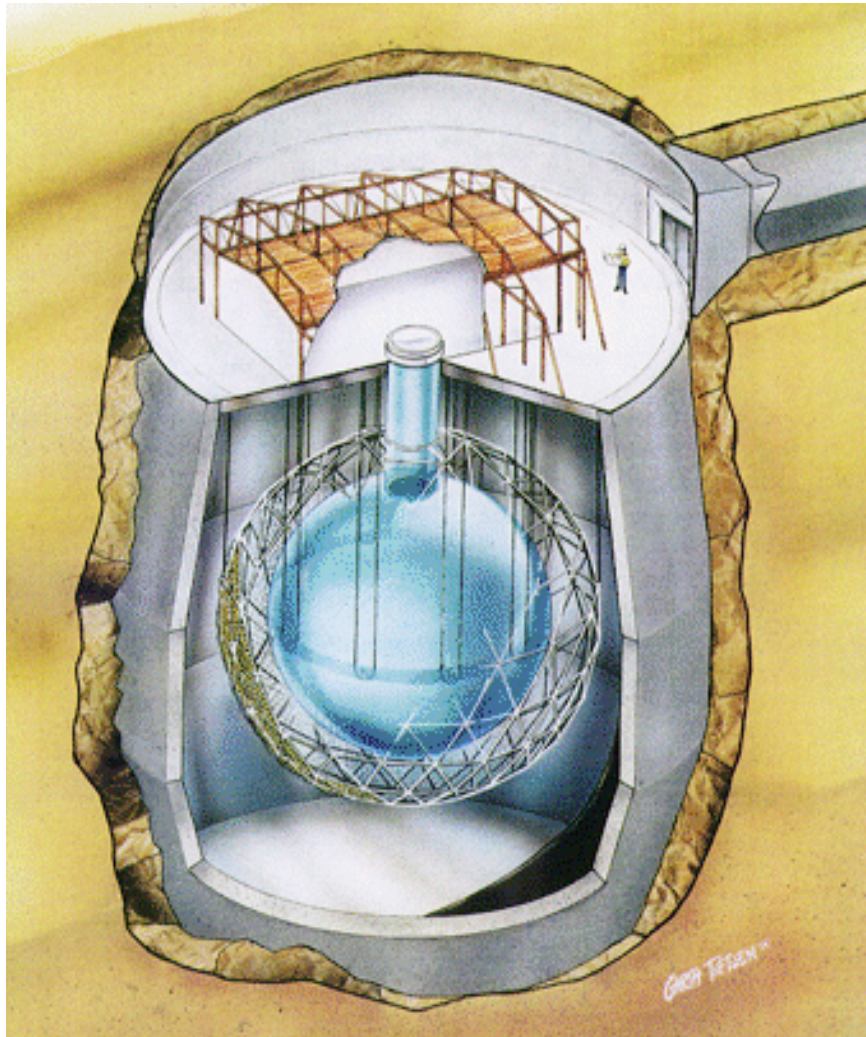
Asymétrie up/down  $\Rightarrow$  oscillation des neutrinos mu à travers la Terre

## Oscillations de saveur

# SNO = Sudbury Neutrino Observatory (Canada)

Détection de tous les neutrinos - Etude des neutrinos solaires

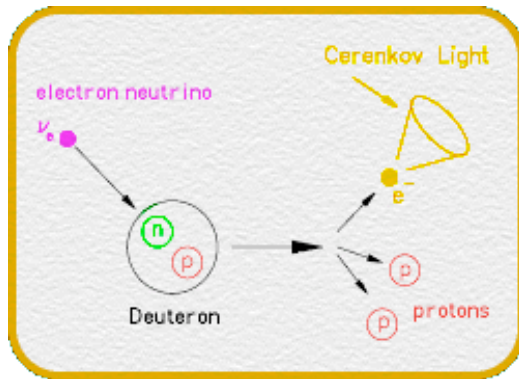
Détecteur rempli de 1000 tonnes de deutérium = eau lourde, à une profondeur de 2000 m sous terre. Cylindre de 12 m de diamètre et 9600 PM pour la mesure





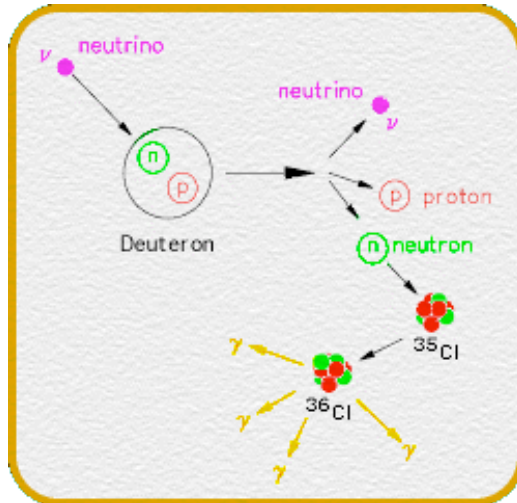
# Oscillations de saveur

## SNO = Sudbury Neutrino Observatory (Canada)



C.C. = courants chargés :  $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$  (sensible seulement à  $\nu_e$ )

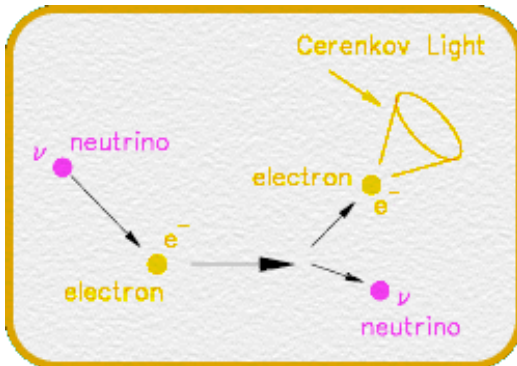
Flux déficitaire en  $\nu_e \rightarrow$  Oscillations de  $\nu_e$



N.C. = courants neutres :  $\nu_x + p(n) \rightarrow p(n) + \nu_x$  (sensible aux trois saveurs)

Flux des 3 saveurs de  $\nu$  conformes aux prédictions

(confirme le modèle solaire SSM)

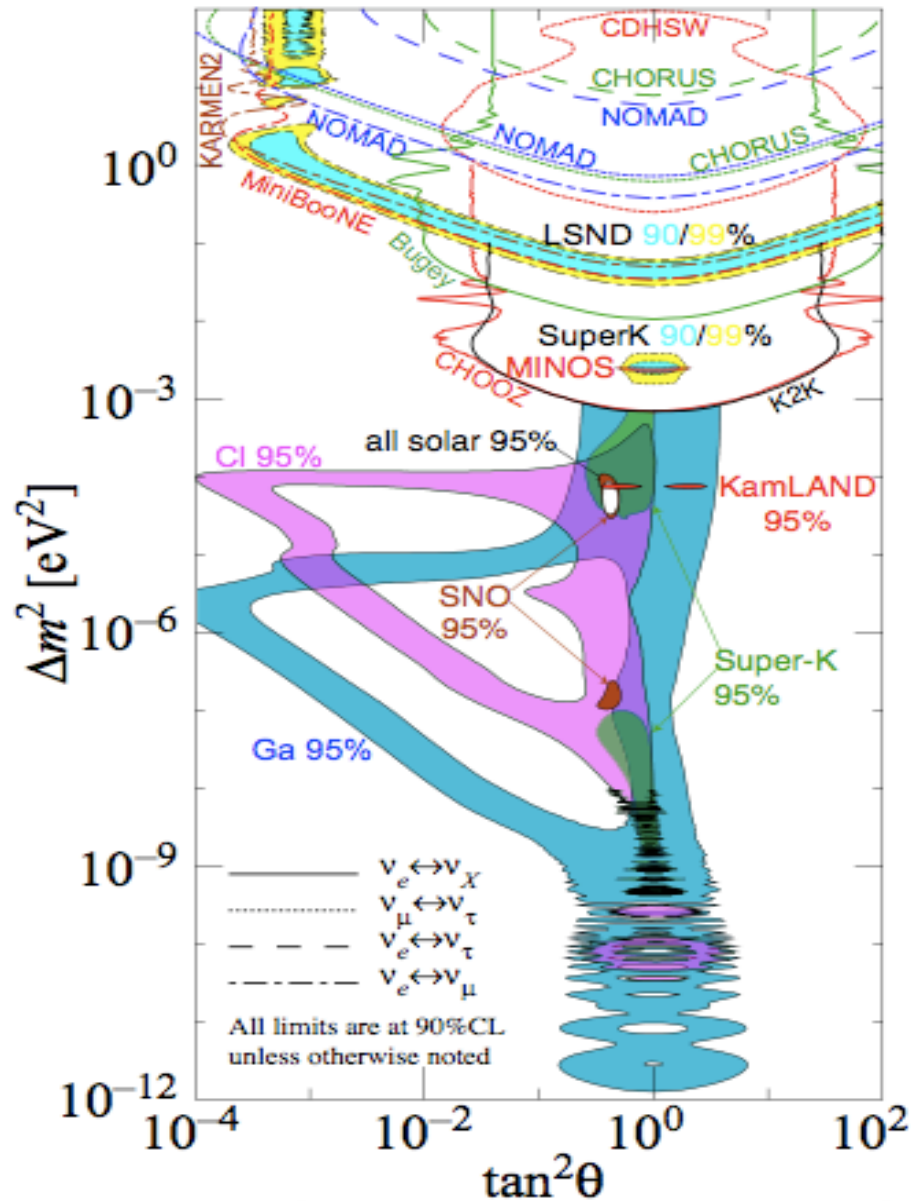


E.S. = diffusion élastique :  $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$  (sensible aux trois saveurs)

Il existe des  $\nu$  non électroniques sortant du soleil ! (Flux  $\nu_x - \text{Flux } \nu_e \neq 0$ )

## Oscillations de saveur

En résumé sur les différentes expériences avec neutrinos solaires, atmosphériques, réacteurs et accélérateurs : oscillations donc masse !



Les résultats de l'ensemble des expériences permettent d'obtenir des informations sur :

les deux différences de masse

$$\Delta m_{23}^2 = m_2^2 - m_3^2 ;$$

$$\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2$$

et les trois angles de mélange

$$\theta_{12} ; \theta_{13} ; \theta_{23}$$

donc sur les paramètres de la matrice de mélange  $U$  des neutrinos (matrice MNSP)

Figure 13.9: The regions of squared-mass splitting and mixing angle favored or excluded by various experiments based on two-flavor neutrino oscillation analyses. The figure was contributed by H. Murayama (University of California, Berkeley, and IPMU, University of Tokyo). References to the data used in the figure can be found at <http://hitoshi.berkeley.edu/neutrino>.

## Oscillations de saveur

En résumé sur les différentes expériences avec neutrinos solaires, atmosphériques et de réacteurs : oscillations observées donc masse !

- Toutes les expériences solaires (**Homestake**, **GALLEX**, **SAGE**, **SNO**, **SuperK**) ont trouvé un **important déficit du flux de  $\nu_e$  solaires** (interprété comme dû à des **oscillations  $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu\tau}$** ) + forte indications d'effets de matière dans le Soleil
- **KamLAND** a montré une disparition **d'anti- $\nu_e$**  provenant de réacteurs situés à  $\sim 180$  km, avec des paramètres en accord avec oscillations de neutrinos solaires.
- **SNO** a aussi mesuré le **flux total de neutrinos solaires** en accord avec le **SSM** (Standard Solar Model)  $\rightarrow$  **aucun déficit et SSM est ok**
- **SuperK** a trouvé un déficit du flux de  **$\nu_{\mu}$  et anti- $\nu_{\mu}$  atmosphériques**
- **K2K** (faisceau de  **$\nu_{\mu}$  d'accélérateur** à  $L \sim 250$  km) a aussi trouvé déficit
- **Mini-Boone** n'a pas confirmé l'oscillation  **$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  (ni avec les anti- $\nu_{\mu}$ )** annoncée par **LSND** en 2001  $\rightarrow$  seulement les 3 neutrinos légers du MS (pas de neutrino stérile)

**2010** : **OPERA** apparition de  **$\nu_{\tau}$**  dans faisceau de  **$\nu_{\mu}$**  ( $L \sim 730$  km) : **interprété comme oscillations  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$**

**2013** : l'expérience a observé au total 3 evts  **$\nu_{\tau}$**

**2011** : **T2K** apparition de  **$\nu_e$**  dans faisceau de  **$\nu_{\mu}$**  à  $L \sim 295$  km ; **MINOS** (faisceau de  **$\nu_{\mu}$  d'accélérateur** : disparition de  **$\nu_{\mu}$**  à  $L \sim 735$  km) ; disparition de **anti- $\nu_e$**  de réacteur par **Double Chooz** ( $L \sim 1000$  m) : **oscillations  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  et valeur de  $\theta_{13}$**

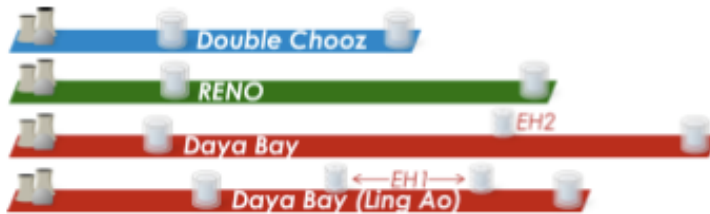
# Oscillations de saveur

En résumé sur les différentes expériences avec neutrinos solaires, atmosphériques et de réacteurs : oscillations observées donc masse !

2012 : L'état se resserre :  $\theta_{13} \neq 0$

25<sup>e</sup> conférence internationale bisannuelle de physique des neutrinos, Kyoto, Japon, juin 2012.

Disparition de  $\text{anti-}\nu_e$  de réacteur par Double Chooz (L ~1000 m), Daya Bay (L ~1650 m), et RENO (L ~1380 m) + T2K + MINOS



Résultats combinés :  $\sin^2(2\theta_{13}) \sim 0.105$   
 ( $\theta_{13} \sim 9^\circ$  : faible mais non nul !!!)

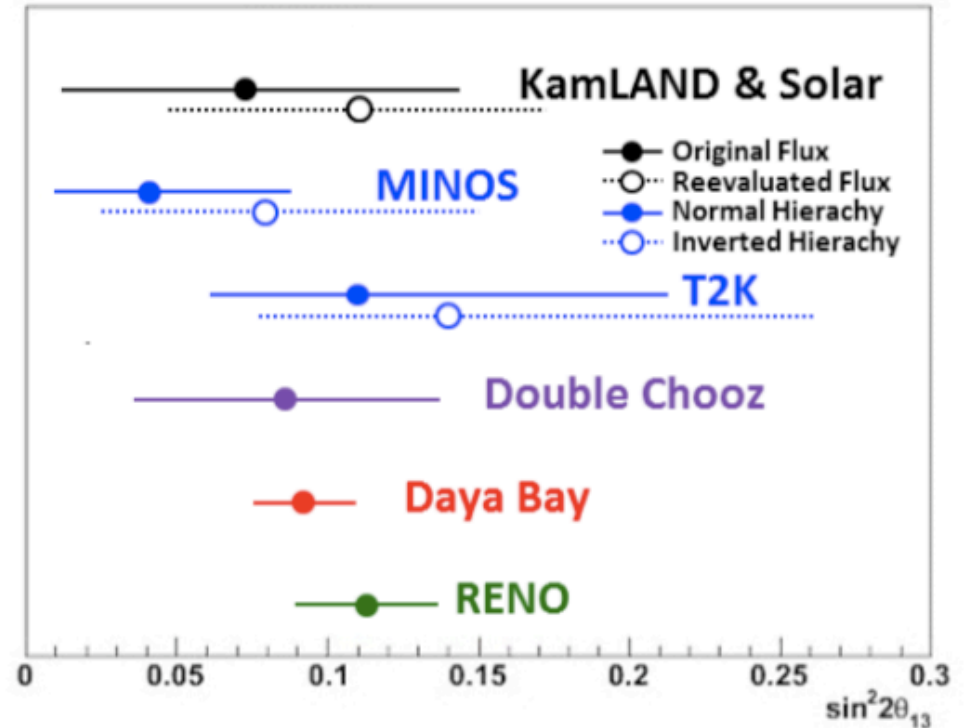


Figure résumée mai 2012, adaptée de la présentation de Y. Nakajima (Daya Bay)

## Paramètres de la matrice de mélange

3 masses  $m_1, m_2, m_3$

3 angles de mélange :  $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$

+ 1 phase de violation de CP  $\delta_{CP}$

→ Les  $\neq$  de masse sont connues mais pas les masses

→ Les 3 angles de mélange sont connus, à améliorer

→ phase de violation de CP  $\delta_{CP}$  ???????

## Oscillations de saveur

En résumé sur les différentes expériences avec neutrinos solaires, atmosphériques et de réacteurs : oscillations observées donc masse !

**2013** : T2K, étude et mesure de  $\theta_{23}$

Confirmation avec meilleure précision de la valeur de  $45^\circ$  donc angle de mélange maximal avec seulement 4% de la statistique accumulée

Indication d'une symétrie entre neutrino mu et neutrino tau.

→ Possibilité de mesurer la violation de la symétrie CP dans le secteur des neutrinos, le phénomène le plus important qu'il reste à mettre en évidence dans un modèle à trois types de neutrinos.

→ Si asymétrie entre oscillation des neutrinos et celle des antineutrinos : rôle majeur des neutrinos pour expliquer la surabondance extrême de matière sur l'antimatière dans l'Univers ? A suivre....

## 6- En conclusion sur les neutrinos aujourd'hui

Depuis près de 15 ans, résultats expérimentaux indiquent neutrinos massifs ( $\nu$  solaires,  $\nu$  atmosphérique,  $\nu$  de réacteurs et d'accélérateurs) car oscillations observées et confirmées

Mais relation entre états propres de saveur et états propres de masse n'est que partiellement connue (paramètres de la matrice de mélange  $U$  des neutrinos).

$L_e$ ,  $L_\mu$  et  $L_\tau$  ne semblent pas conservés pendant le phénomène d'oscillation mais ils le sont, avec le nombre leptonique global  $L$ , dans le MS.

Juin 2013 : publi IceCube, 2 evts neutrinos d'énergie 1,04 et 1,14 PeV ( $10^{15}$  eV) : 1ère indication d'un flux de neutrinos astrophysiques ?

### Questions ouvertes sur les neutrinos

Les neutrinos sont-ils stables ?

Echelle de masse absolue de neutrino ?

Nature du neutrino ? (Dirac ou Majorana)

Y a-t-il violation de CP dans le secteur des neutrinos ?

(c'est-à-dire leptogénèse pour expliquer matière vs antimatière)

Physique au-delà du MS ?

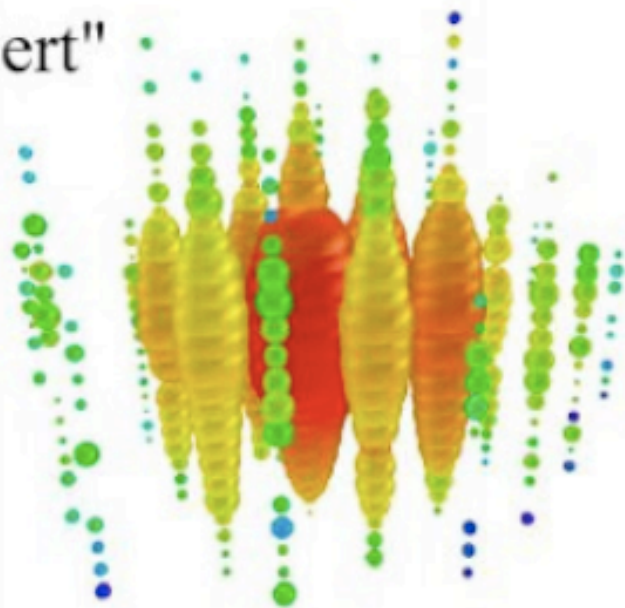
(si  $\beta\beta 0\nu$  alors  $\Delta L = 2$ )

Existe-t-il des neutrinos droits stériles ?

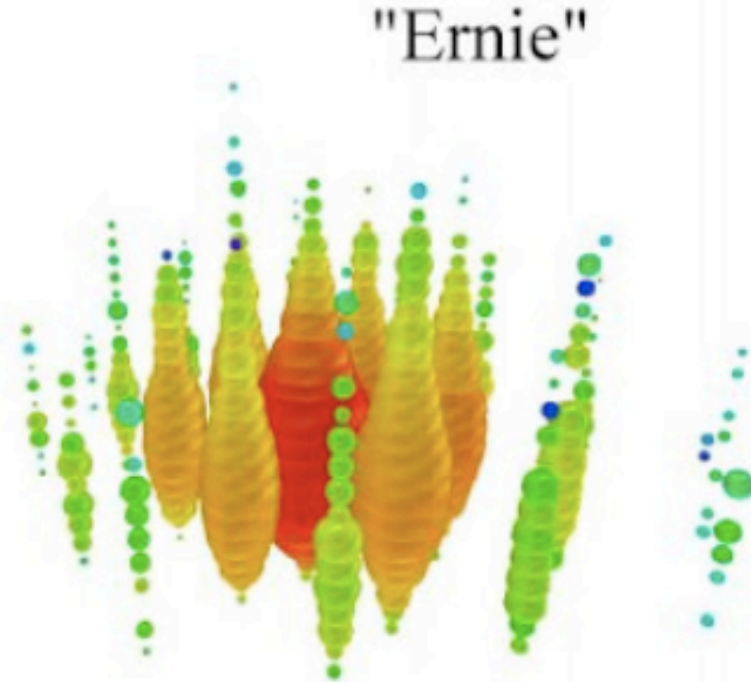
# Merci de votre attention !!

## Les deux neutrinos de la « rue Sésame » d'IceCube...

"Bert"



"Ernie"



## 26 autres à étudier... à suivre !!!

Les deux événements observés en août 2011 (à gauche) et en janvier 2012 (à droite). Chaque sphère représente un module photomultiplicateur, les couleurs représentent le délai d'arrivée des photons de lumière, la taille des sphères figure l'énergie correspondante (arXiv:1304.5356 [astro-ph.HE])

De fait, ces deux neutrinos *Bert* et *Ernie* sont très probablement les premiers depuis 1987 à être détectés en provenance de l'extérieur de notre système solaire, les précédents étant les neutrinos produits lors de l'explosion de la supernova SN 1987A dans le grand nuage de Magellan, galaxie voisine de la nôtre.

# Pour en savoir plus

- <http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/documents/numero5/numero5.pdf>

Numéro 5 de la revue Elementaire sur les neutrinos

- [http://www-physique.u-strasbg.fr/cours/m1/phys\\_particules\\_ripp/neutrino.ppt](http://www-physique.u-strasbg.fr/cours/m1/phys_particules_ripp/neutrino.ppt)

Les neutrinos

- <http://195.221.120.247/integration/BMIU/pages/vie-culturelle/archives/MercredisSciences/Physique/Rosnet/Rosnet%20.htm>

Cours sur les neutrinos par Philippe Rosnet

- <http://lappweb.in2p3.fr/neutrinos/neut.html>

Toute l'histoire des neutrinos par Didier Verkindt

- <http://www.bibnum.education.fr/files/analyse-76-v2.pdf>

La saga des neutrinos par Marie-Christine de La Souchère

- <http://pdg.lbl.gov/2012/reviews/rpp2012-rev-neutrino-mixing.pdf>

Résultats des différentes expériences sur les neutrinos - Revue 2012 du Particle Data Group

- Les sites des différentes expériences présentées (Homestake, SuperK, SNO, KamLand, OPERA, T2K, Mainz, Troitsk, KATRIN, NEMO3, SuperNEMO, Cuore, Gerda, etc....)

- Le livre « Passeport pour les deux infinis » (Dunod)

*Toutes les figures sont tirées des sites de l'IN2P3 et du CEA, d'un de mes cours donné pour les M1 d'Orsay, des fichiers cités ci-dessus, des articles publiés sur les neutrinos.*