

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

Promotion B. Pontecorvo - 11-22 juillet 2016

## Cours « Comprendre l'infiniment petit » (4)

### Les neutrinos, des particules encore bien mystérieuses...

*Corinne Augier, UCB Lyon 1 – IPNL – IN2P3/CNRS – [augier@ipnl.in2p3.fr](mailto:augier@ipnl.in2p3.fr)*

*Lundi 18 juillet 2016 - LLR*

# PLAN

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

1- Un peu d'histoire des neutrinos : origine et propriétés connues

2- Les sources de neutrinos

En résumé : quelques chiffres

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

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

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  $\frac{1}{2}$ )

# Rappel : 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**

	MATIERE	ATOME	NOYAU	PROTON
<b>FERMIONS</b>	LEPTONS <b>Spin 1/2</b>		QUARKS	
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			
	Q/e=-1	<b>Q/e=0</b>	Q/e=-1/3	Q/e=+2/3
	faible, emgt		faible, emgt et forte	

- 4 interactions fondamentales :
- forte
  - électromagnétique
  - faible
  - gravitationnelle (pour tous mais pas dans MS)

Bosons d'interaction (manque gravitation)

**Force Carriers**

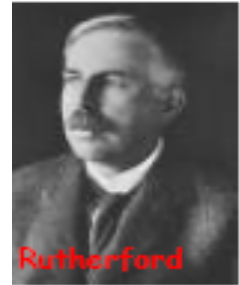
- I.Emgt. {  $\gamma$  photon
- I.Forte {  $g$  gluon
- I.faible {  $Z$  boson,  $W$  boson

+ boson de Higgs

# 1- Un peu d'histoire des neutrinos : origine et propriétés connues

**1913** : Les expériences de Rutherford (diffusion de particules  $\alpha$  sur feuille d'or) conduisent à une première image (fausse) de l'atome, avec :

- un noyau massif entouré de  $Z$  électrons,
- un 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, alors que spectre discret attendu pour une désintégration à deux corps.

Il écrit à Rutherford : « there is probably some silly mistake somewhere ».

Mais effectivement : la particule  $\beta$  n'emporte qu'une partie de l'énergie de la désintégration.

Problème...

**1928** : Autre problème lié au spin entier mesuré pour le noyau  $^{14}\text{N}$  (avec  $A = 14$  protons et  $A-Z = 14-7 = 7$  électrons dans le noyau, soit 21 fermions donc spin  $\frac{1}{2}$  entier prévu). 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 : origine

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

Il soumet par **lettre le 4 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.**

Chers Mesdames, chers Messieurs les Radioactifs

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. [...]

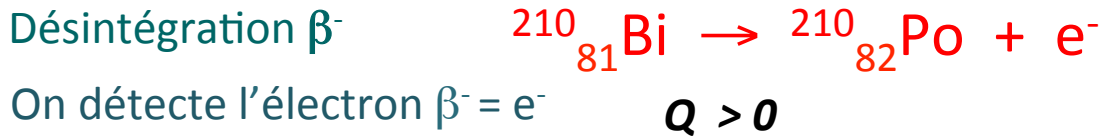
Votre très dévoué,

W. Pauli

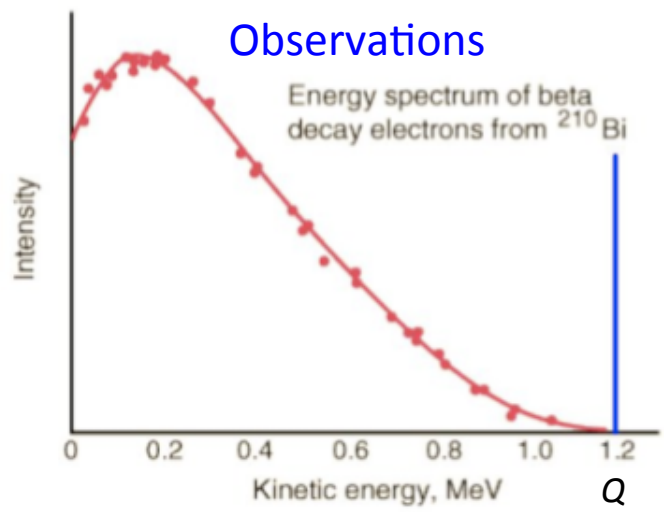
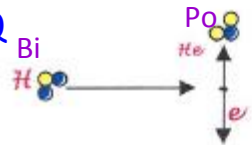
*(traduction Claude Maillard – Wolfgang Pauli, Physique moderne et philosophie, Albin Michel, Paris, 1999)*

# Un peu d'histoire des neutrinos : origine

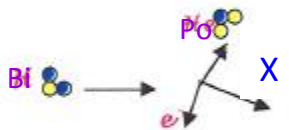
Explication du spectre continu ? (voir cours Sébastien)



Spectre à 2 corps attendu donc 1 raie à Q



Spectre continu observé : correspond à spectre à 3 corps !!

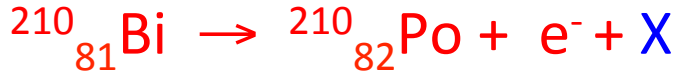


**Pour satisfaire conservation de l'énergie et du moment cinétique et comprendre spectre observé**

⇒ **il faut une 3<sup>ème</sup> particule dans la désintégration (X)**

- **de spin 1/2**
- **de masse très petite (~ 0,01 m<sub>p</sub>)**
- **emportant une partie de l'énergie disponible**

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



# Un peu d'histoire des neutrinos : origine

La crise du spin et de l'énergie est donc résolue...

▪ Pour noyau  $^{14}\text{N}$  :

(A protons + 1 « neutron de Pauli » + (A-Z) électrons) x spin 1/2 = 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 la particule neutrino

**1932** : Chadwick (prix Nobel 1935) découvre **notre neutron**, de masse environ celle du proton mais sans charge électrique : cette découverte soulage le monde scientifique...

Heisenberg sur une idée de Majorana propose :

**Noyau = Z protons + (A-Z) neutrons** (il n'y a plus d'électrons - OK)

**1933** : Fermi propose sa **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 : propriétés connues

**Origine** : pour expliquer 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 nulle, pas de charge de couleur**

**fermion élémentaire de la matière**

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





# Un peu d'histoire des neutrinos : propriétés connues

**Origine** : pour expliquer 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 nulle, pas de charge de couleur**

**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 la gravitation)**

→ **difficile à détecter et à étudier car un neutrino peut traverser la Terre entièrement sans être arrêté !!**

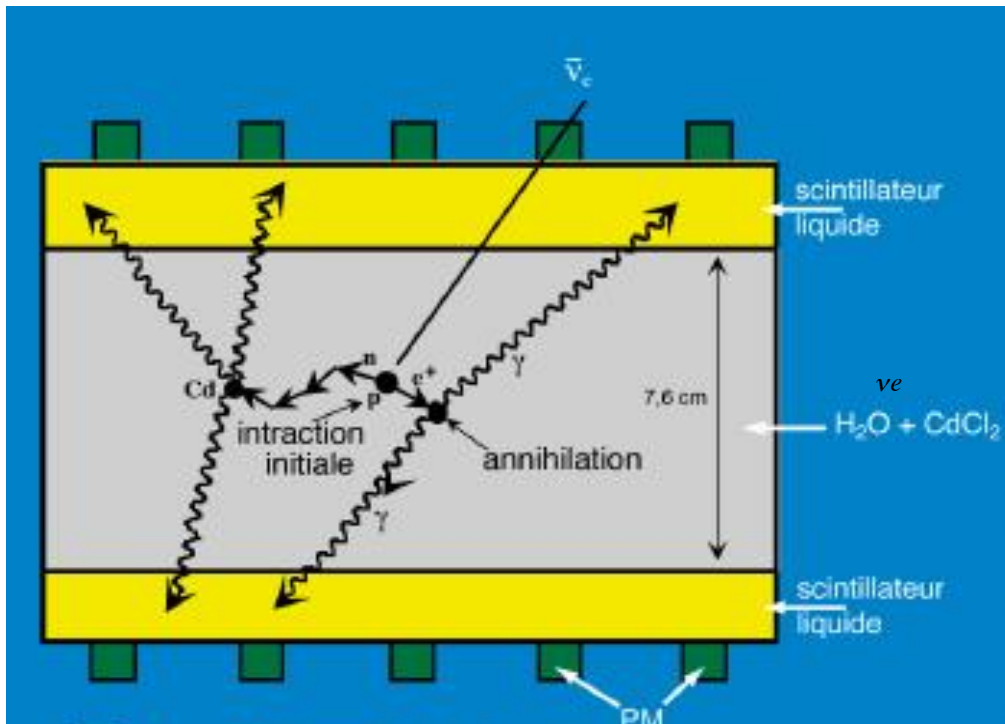
**Exemple : section efficace de capture d'un neutrino  $\nu_e$  par un nucléon :**

→  $\sim 10^{-47} \text{ m}^2$  pour  $\nu$  de quelques MeV, augmente avec  $E_\nu$  ( $\sim 10^{-42} \text{ m}^2$  à 1 GeV)

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

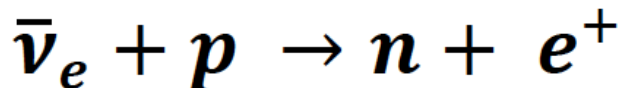


Taux d'interaction avec la matière très faible  $\Rightarrow$  il faut attendre **1956** pour la 1<sup>ère</sup> observation expérimentale d'antineutrinos électroniques issus du réacteur nucléaire de Savannah River (USA) par **Cowan et Reines** (prix Nobel 1995) : réaction bêta inverse



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.



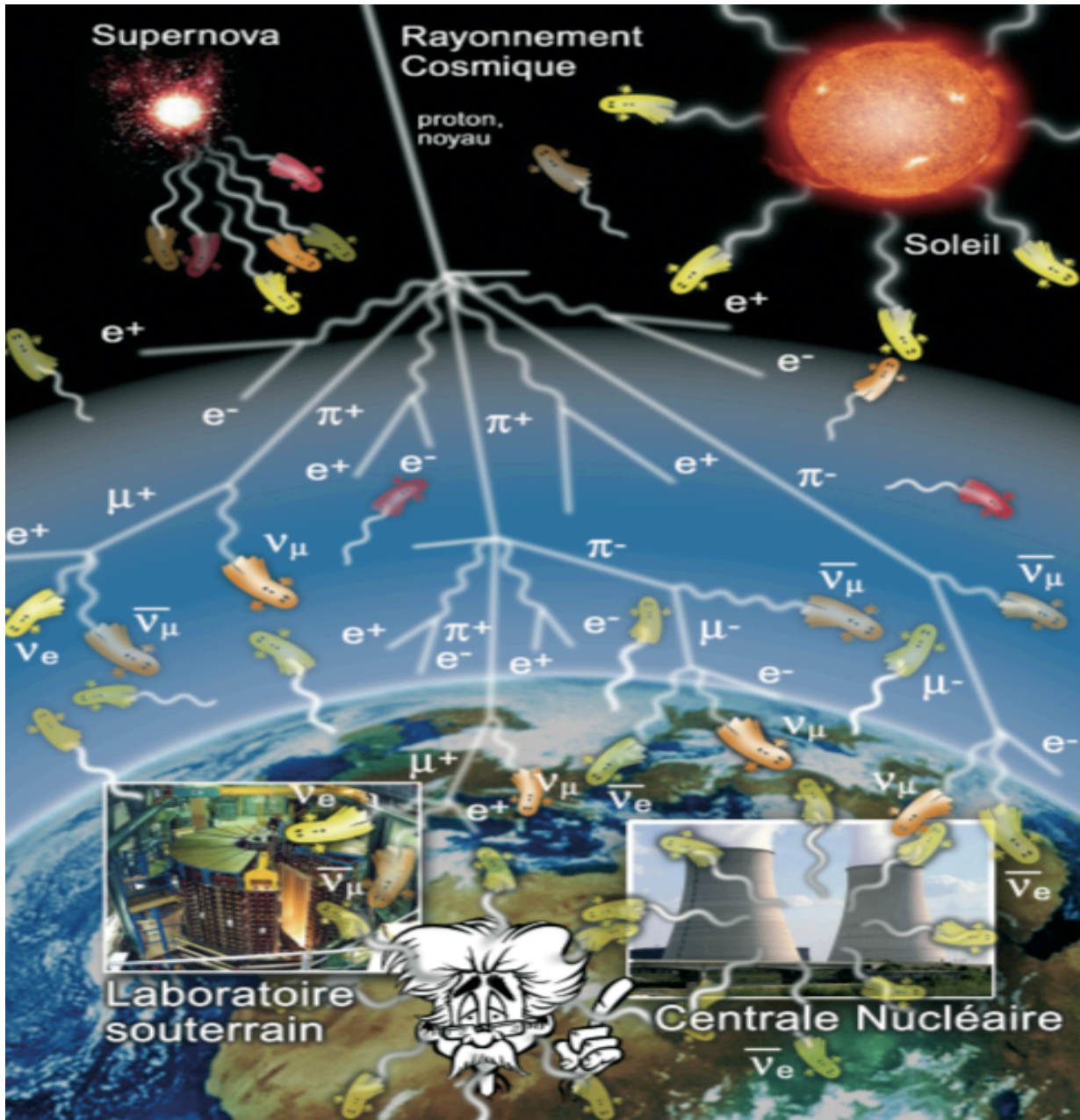
400 L d'un mélange d'eau et de chlorure de cadmium ;

Détection des 5 gammas

Sur  $5 \times 10^{13}$  antineutrinos électron émis/s.cm<sup>2</sup> par le réacteur, seulement 3 événements/h détectés

## 2- Les sources de neutrinos

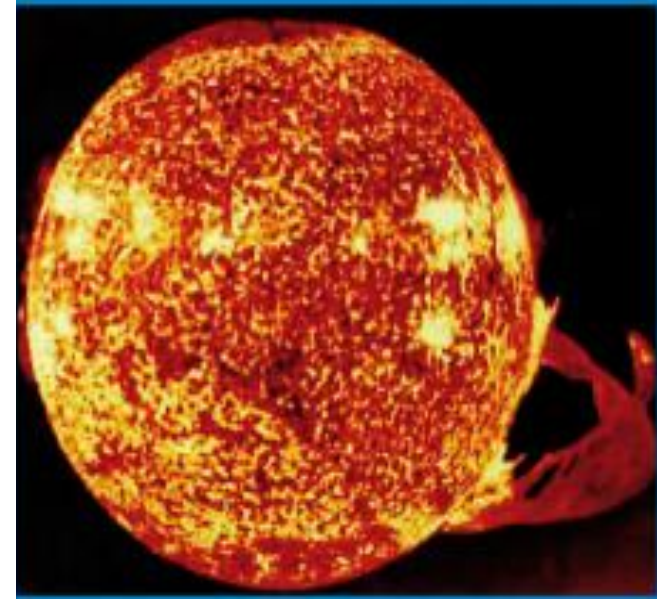
Sources naturelles ou artificielles : des neutrinos en provenance de l'espace ou de la Terre...



# Les sources de neutrinos

## Les sources naturelles de neutrinos

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

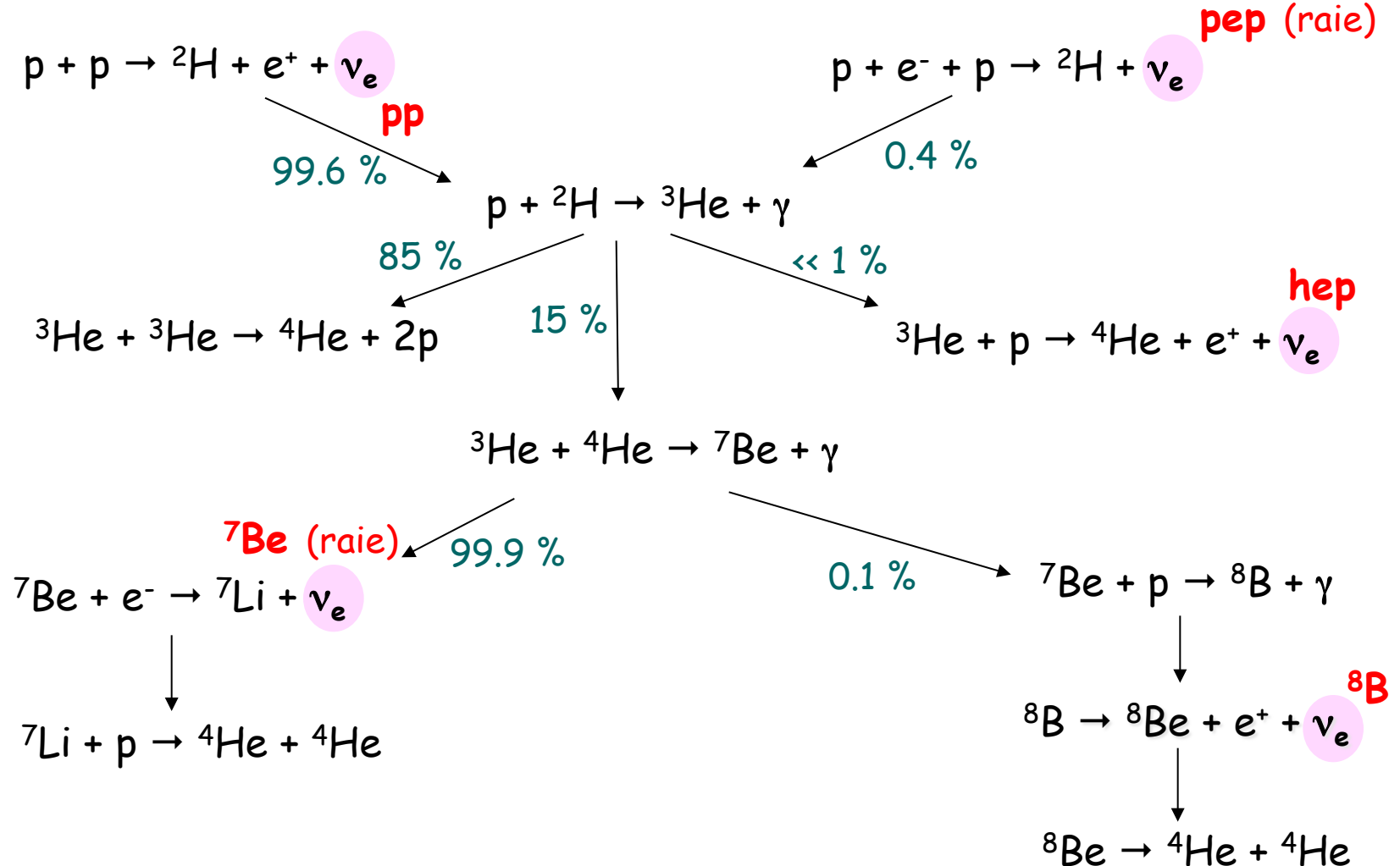


# Les sources de neutrinos

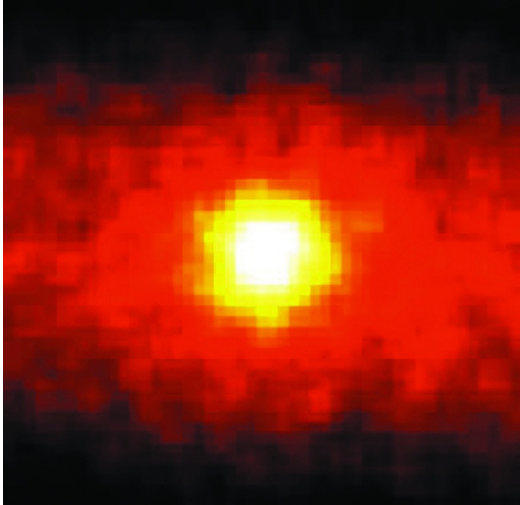
## Les neutrinos solaires : exemple du cycle pp

Réactions nucléaires au sein du soleil = source de **neutrinos électroniques**.

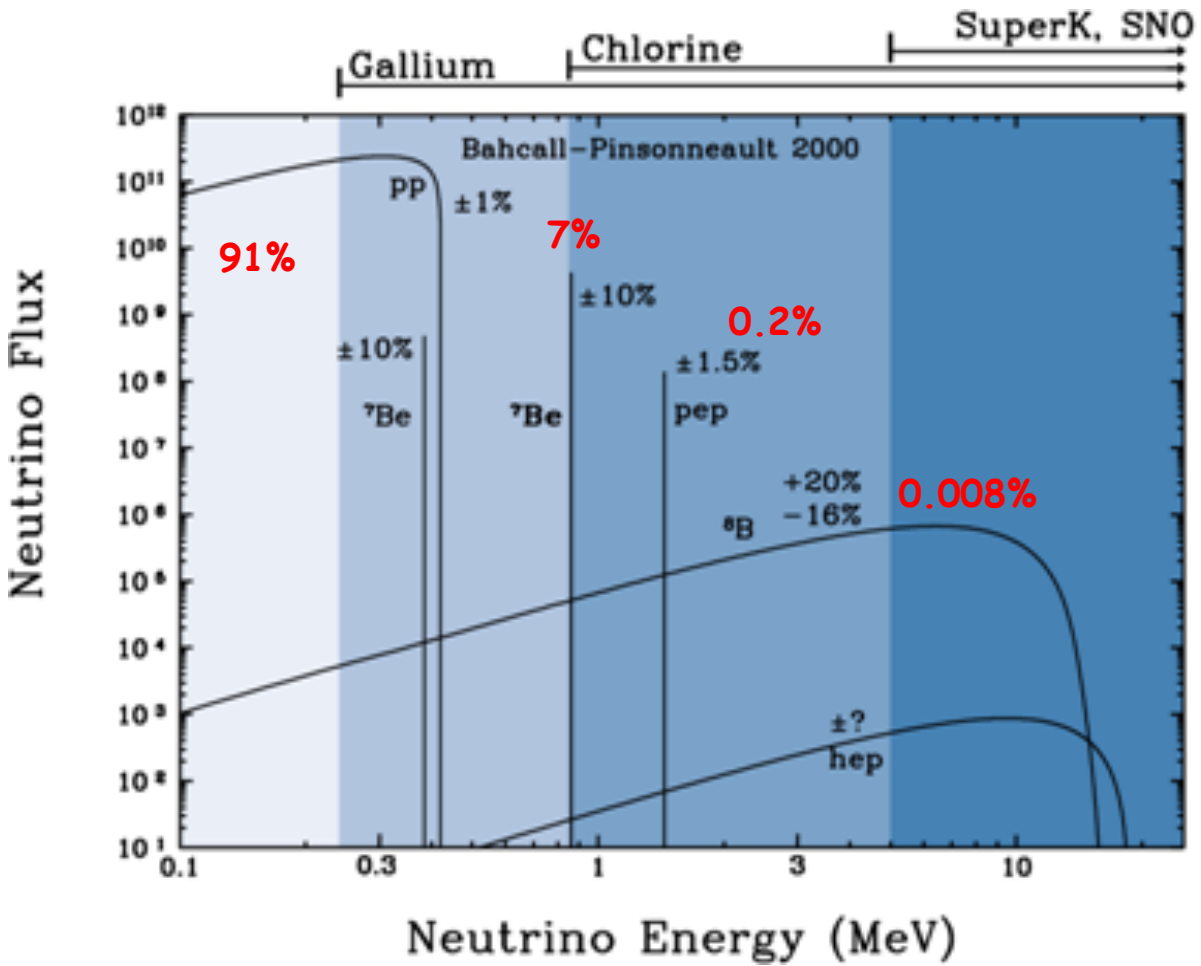
Exemple du **cycle pp (98% de l'énergie émise par le soleil)** :  $\nu_e$  de différentes énergies (raies ou spectres continus) et d'abondances très variées.



# Les sources de neutrinos



## Spectre en énergie des $\nu_{\odot}$ ( $< 20$ MeV)



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 à plusieurs types de neutrinos.

# Les sources de neutrinos

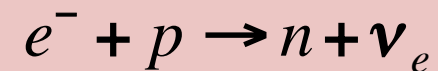
## Les sources naturelles de neutrinos

3) Les explosions de supernovae, le cosmos... :  
émission d'(anti)neutrinos

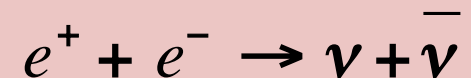


*Supernova SN1987A lors de son explosion.*

Neutrinos issus des supernovae



(Anti)neutrinos issus du cosmos



4) Les neutrinos atmosphériques présents dans les rayonnements cosmiques : (anti)neutrinos électroniques et muoniques

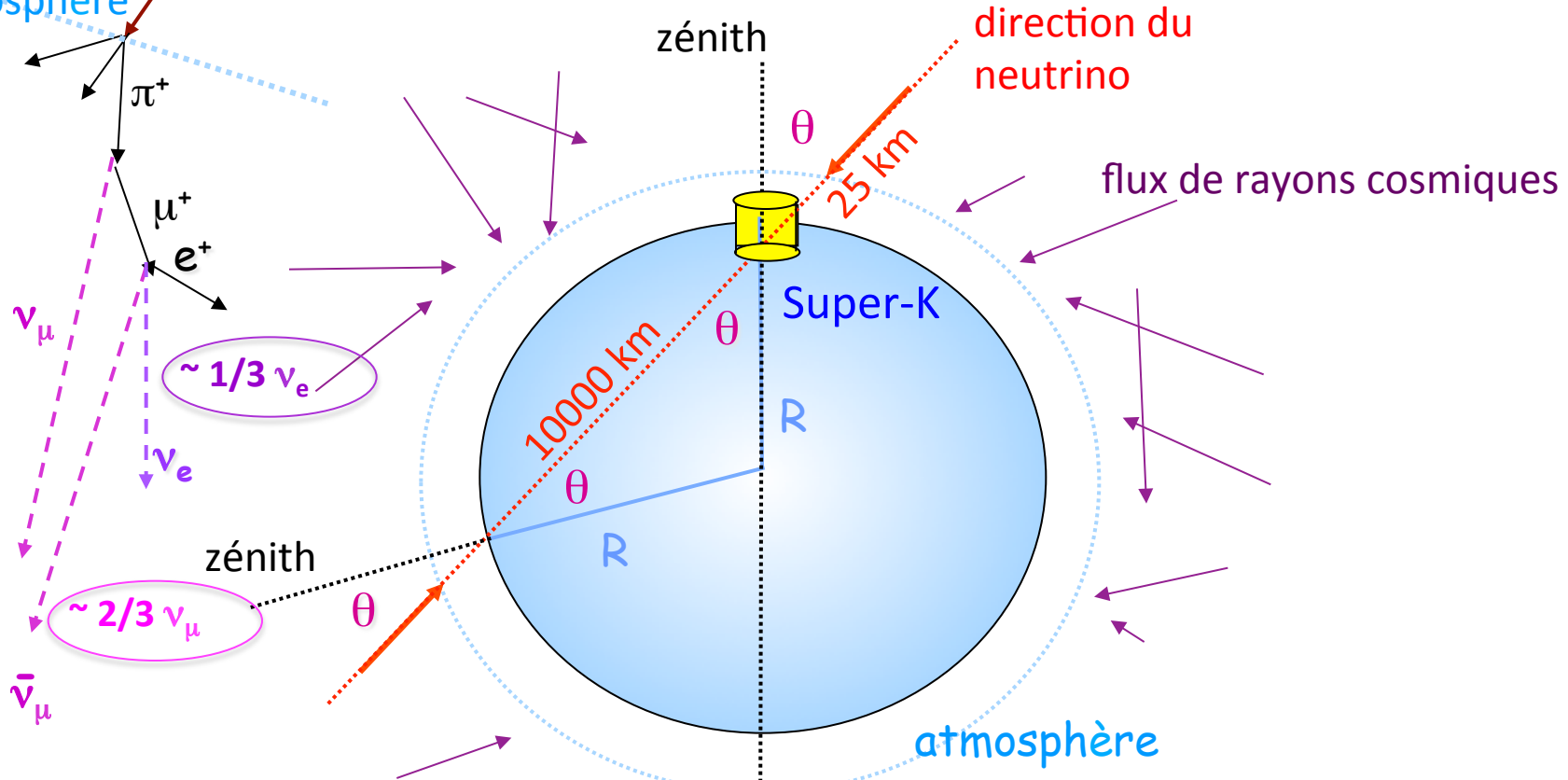
# Les sources de neutrinos

## Neutrinos atmosphériques (500 MeV → 100 GeV)

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

rayon cosmique  
primaire : p, He, ...

atmosphère



$\sim 1/3 \nu_e$

$\sim 2/3 \nu_\mu$

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

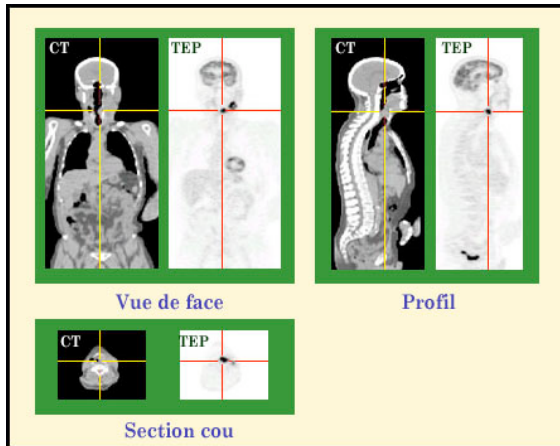


# Les sources de neutrinos

## 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... mais en très grande quantité car les neutrinos sont partout !!

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

Reines : « *Un neutrino, ce n'est rien, quasiment rien...*

*C'est la quantité de réel la plus tenue jamais imaginée par un être humain ! »*

Rien... mais en très grande quantité car les neutrinos sont partout !!

### \* En provenance de l'espace, nous traversant :

- **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  $\sim 1 \text{ s}$ .

### \* Directement sur Terre, très abondants aussi :

- **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 :  $\sim 7000 \nu \cdot \text{s}^{-1}$  venant du potassium 40, du carbone 14, ... (personne 60 kg et surface  $1 \text{ m}^2$ )

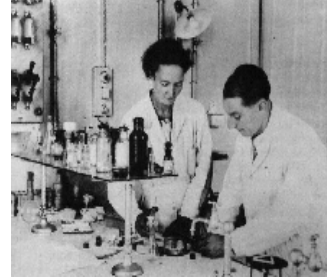
- **réacteurs** nucléaires (source de  $\bar{\nu}_e$ ) : à 1 km, **autant que venant du Soleil...**

- **neutrinos atmosphériques** issus de gerbes cosmiques (source de  $\nu_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_e$  et  $\bar{\nu}_\mu$ ).

- production par les **accélérateurs** (source de  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ ).

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

**1934** : Radioactivité  $\beta^+$  découverte par Irène et Frédéric 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.



# 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 neutrino : elle est négative** avec degré de polarisation =  $90 \text{ }^{+10}_{-20} \%$



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).

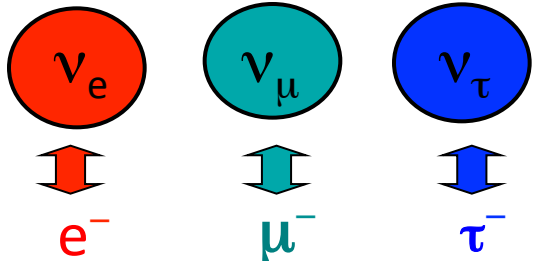
# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

## Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

### Neutrinos et Modèle Standard

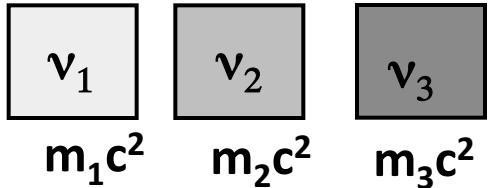
neutrino = fermion élémentaire de la matière, spin 1/2, lepton neutre  
3 saveurs pour 3 familles

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  $(\tau^-, \nu_\tau)_L$

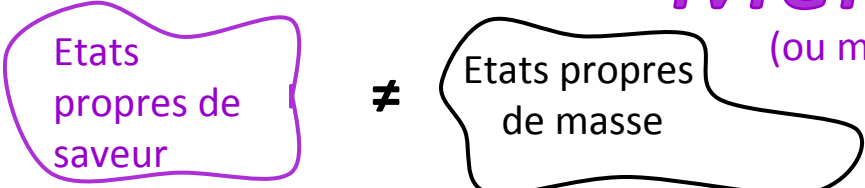


Mais si neutrinos massifs

→ 3 états propres de masse



Mélange  
(ou mixing)

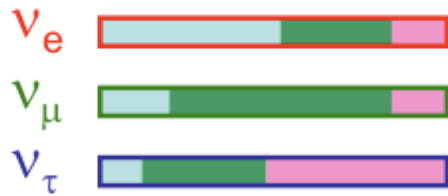


oscillations

# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

## *Quelques mots sur les oscillations de neutrinos*

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



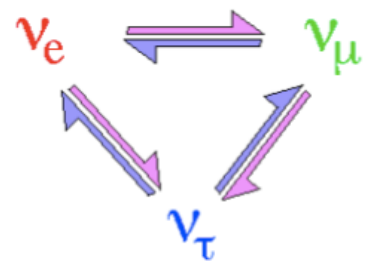
# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

## Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

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



La mécanique quantique permet de montrer qu'un neutrino d'énergie  $E_\nu$  produit avec une saveur donnée ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  ou  $\nu_\tau$ ), 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 la 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  $\delta_{CP}$

(comme pour les quarks, matrice CKM)



# 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)

A  $t = 0$ , on suppose qu'on a seulement des  $\nu_e$

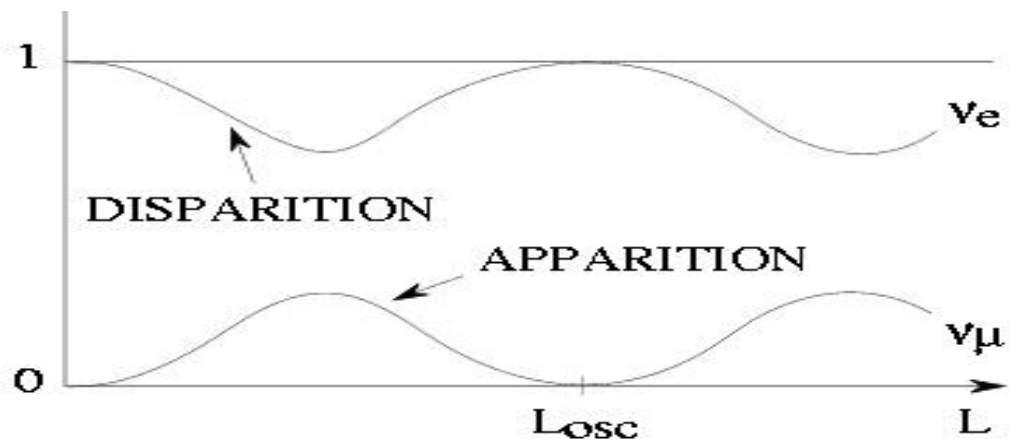
A  $t > 0$ , la propagation débute sur une longueur d'oscillation  $L_{osc}$

La probabilité d'oscillation à 2 saveurs  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  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  $\theta_{12}$  = angle de mélange entre les états 1 et 2 et  $\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2$

**Pas directement masse absolue des neutrinos mais différence de masse carrée**



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



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

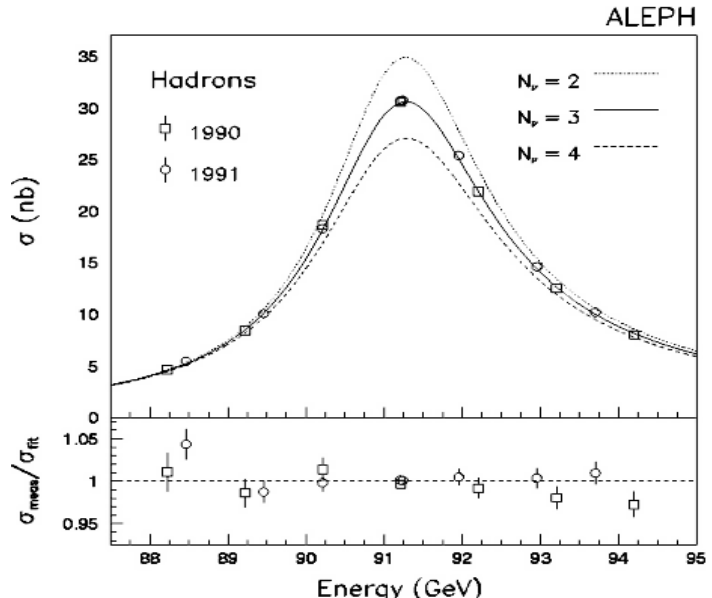


**1962 :** Découverte de la **deuxième saveur de neutrinos :**  
 $\nu_\mu \neq \nu_e$  par Schwartz, Steinberger et Lederman (prix Nobel 1988).  
 Confirme  $L_e \neq L_\mu$  et conservation de L global.



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

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

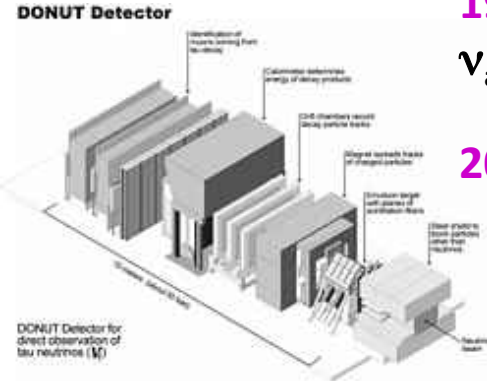


**1989 :** Les 4 expériences de LEP (ici ALEPH) mesurent le nombre de neutrinos de saveur dans le cadre du Modèle Standard (i.e. couplés au  $Z^0$  et de masse inférieure à  $M_Z/2$ ) : il vaut 3.

**Donc seulement 3 familles de constituants élémentaires quarks et leptons.**

# Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

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

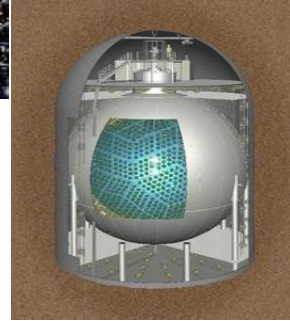


**1998** : Observation des oscillations  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$  des  $\nu_{\text{atm}}$  par SuperKamiokande au Japon.



**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  $\nu_e$  et modèle solaire standard compris.



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

**Depuis 2002** : expériences d'oscillations partout dans le monde

De 1968 et Homestake à nos jours : de nombreuses expériences !

Résultat : ça oscille encore et toujours...

Les neutrinos sont définitivement massifs !!

**2015** : le prix Nobel de physique est attribué à Takaaki Kajita (SuperK, université de Tokyo, Japon) et Arthur B. McDonald (SNO, université de Queens, Canada)

## 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 !

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

Limites actuelles

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

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

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

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  $\nu_e$  (expérience MUNU, seulement limite, pas de mesure)

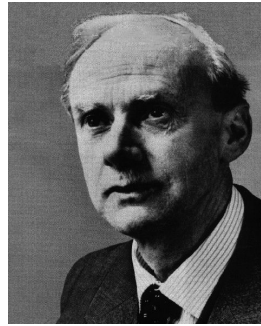
- **Quelle est la nature du neutrino ? Particule de Dirac ou de Majorana ?**

→ Dans le MS, les neutrinos sont gauches et les antineutrinos sont droits, et ce sont deux particules différentes (neutrino de 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 ?

## 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 faible énergie du neutrino (jusqu'à quelques MeV)

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

# Neutrinos : une question de masse et de nature ?

## Quelles expériences peut-on utiliser ?

### Moment magnétique

- Diffusion neutrino-électron à basse énergie

### Echelle de masse absolue

- Temps de vol des neutrinos – Explosion de SN  $m_\nu < 20$  eV (*pas souvent...*)
- Fin du spectre  $\beta$  du tritium  $m_\nu < 2.2$  eV (*seule mesure directe individuelle actuelle*)

**futur = KATRIN en 2017 pour limite 0.2 eV**

- Fluctuations du CMB (fond diffus cosmologique) : PLANCK HFI (*somme des masses*)

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

### Nature Dirac/Majorana

- Recherche de la double désintégration sans émission de neutrinos  $\beta\beta 0\nu$

### Matrice de mélange des neutrinos, violation de CP, hiérarchie de masse

- Etude des oscillations de saveur avec neutrinos solaires, atmosphériques, de réacteurs et d'accélérateurs

# La double désintégration beta sans émission de neutrinos

En cas de découverte → Le neutrino est massif et il est sa propre antiparticule (Majorana)



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  $\beta\beta 0\nu$

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

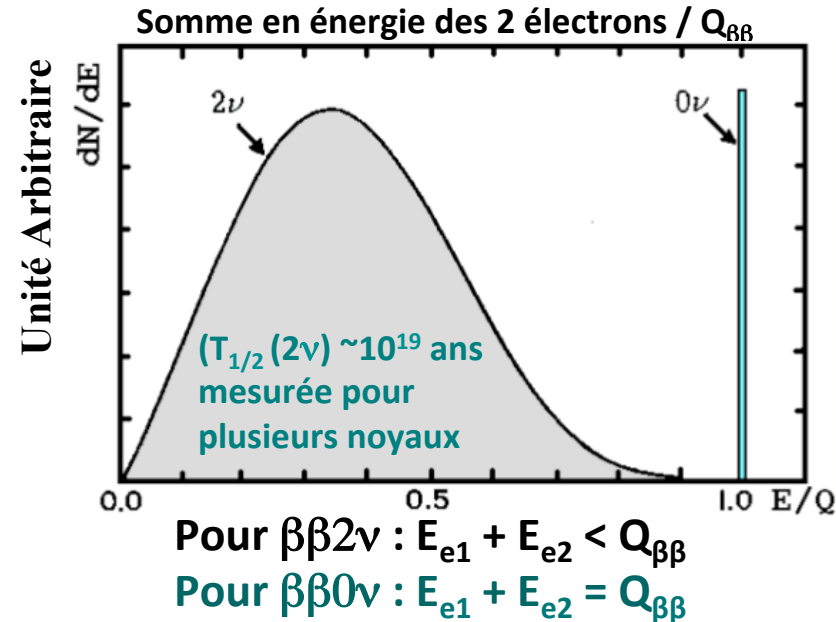
$G$  : facteur d'espace de phase

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

$\langle m_{\nu} \rangle$  : masse **effective** du neutrino (pas directement la masse du neutrino électron)

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

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



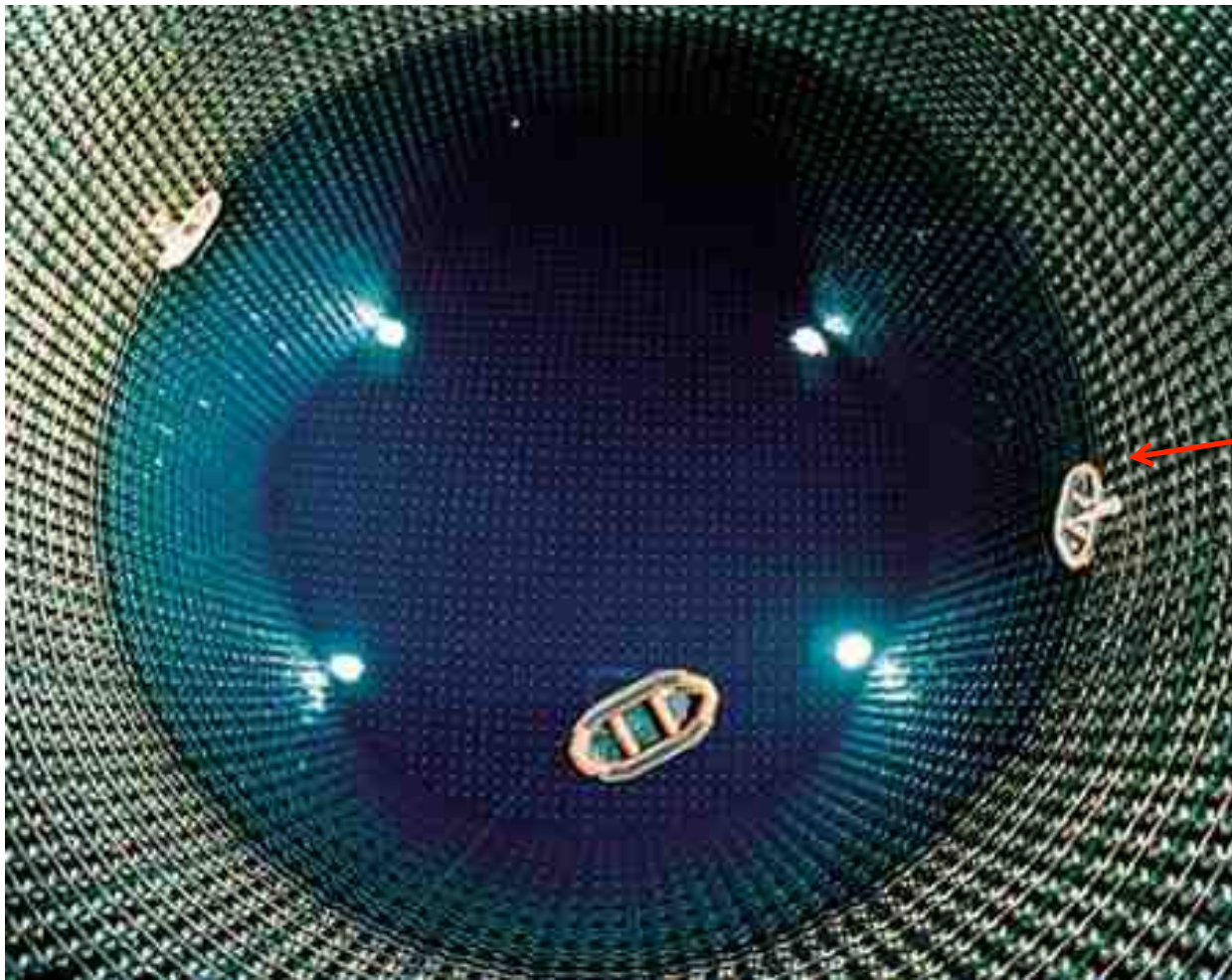
Gerda, Cuore, Exo, Majorana, SuperNEMO, Lucineu : vers  $\langle m_{\nu} \rangle < 50 \text{ meV}$



## SK = SuperKamiokande (Japon) : Prix Nobel 2015

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**



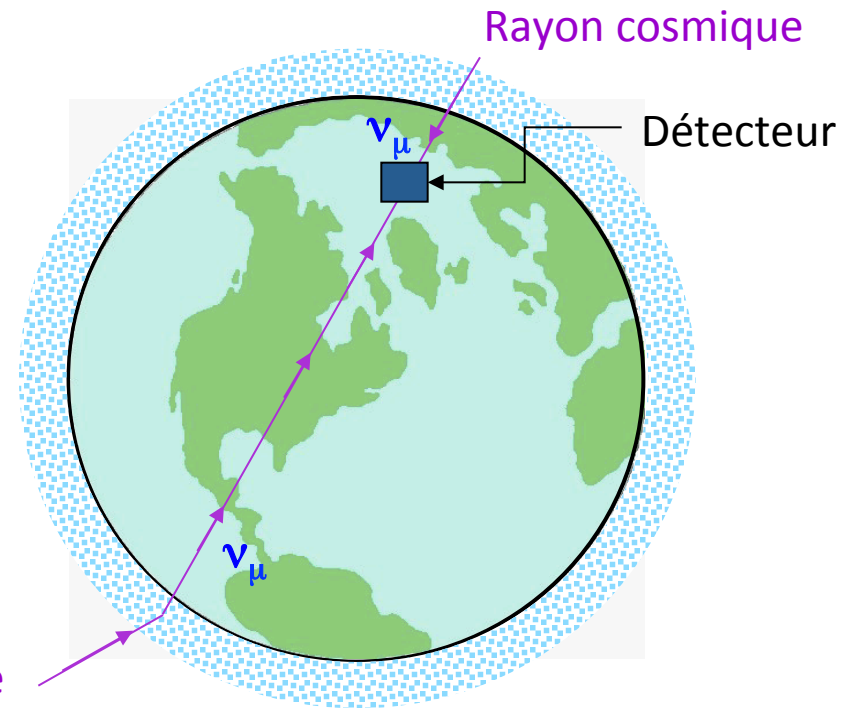
Physiciens sur  
bateau  
gonflable  
inspectant les  
capteurs

## 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



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  $E_\nu > 1.3 \text{ GeV}$

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

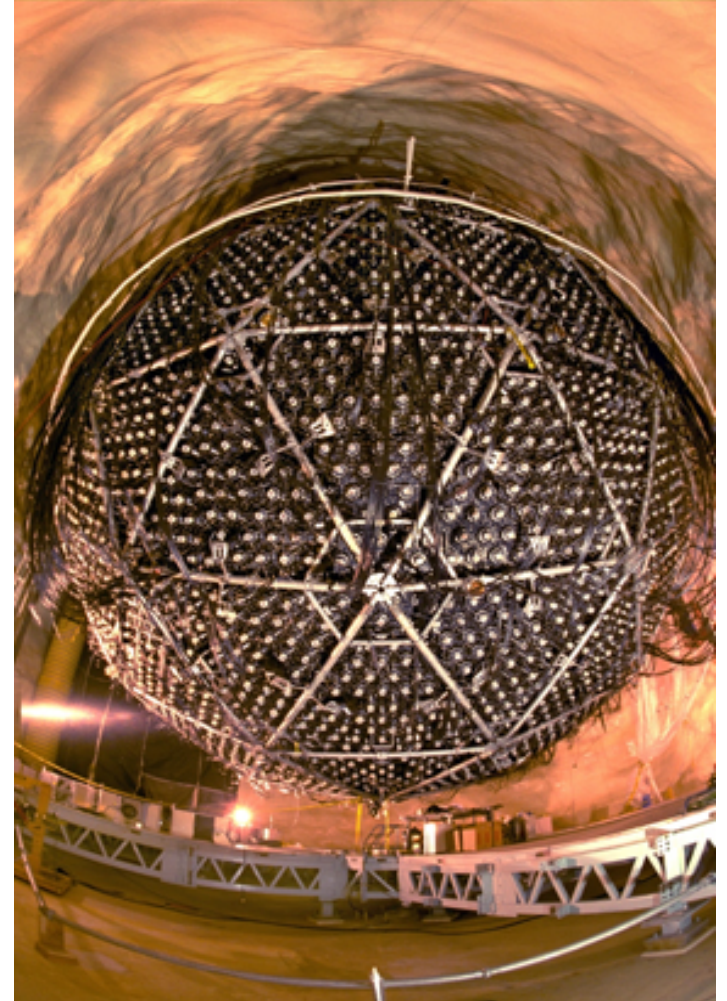
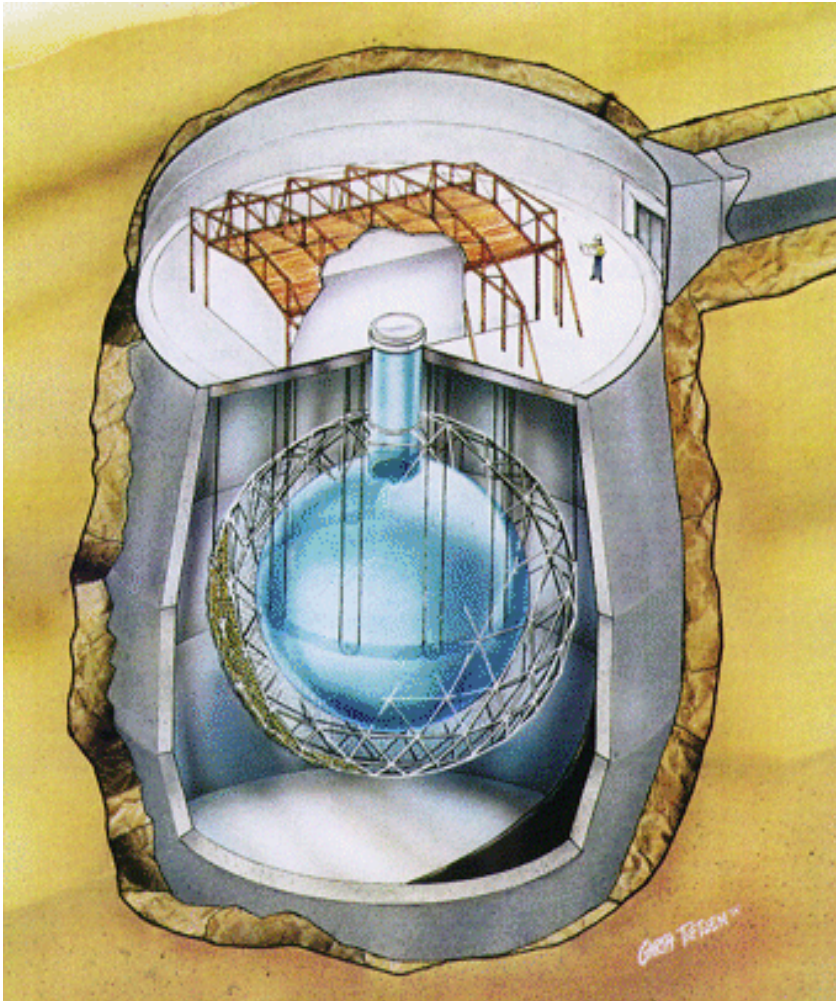
Asymétrie up/down  $\Rightarrow$  oscillation des neutrinos mu à travers la Terre

## Oscillations de saveur

# SNO = Sudbury Neutrino Observatory (Canada) : Prix Nobel 2015

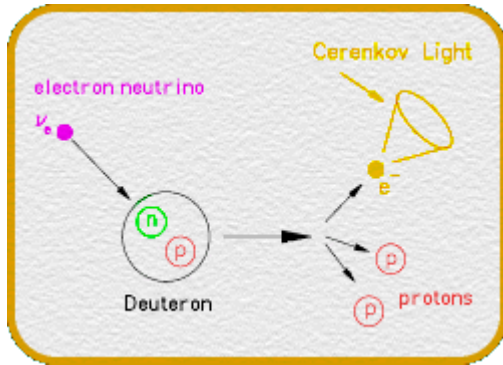
Détection de tous les neutrinos – Etude des neutrinos solaires

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



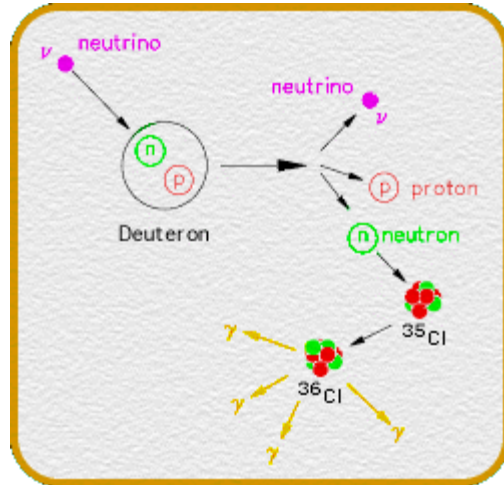
# Oscillations de saveur

## SNO = Sudbury Neutrino Observatory (Canada)



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

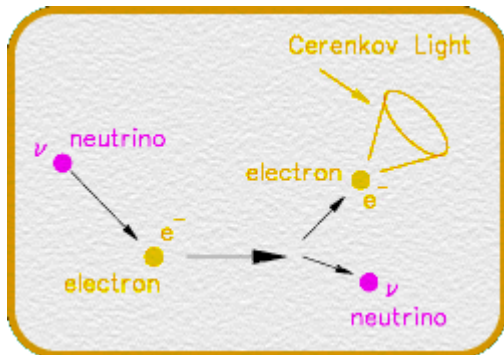
**Flux déficitaire en  $\nu_e \rightarrow$  Oscillations de  $\nu_e$**



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 de neutrinos donc masse !**

- Toutes les expériences solaires (**Homestake, GALLEX, SAGE, SNO, SuperK**) ont trouvé un **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 confirmé le déficit
- **Mini-Boone** n'a pas confirmé l'oscillation  **$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$**  annoncée par **LSND** en 2001 pour toutes les énergies mais il existe toujours une anomalie  $\rightarrow$  faut-il un 4<sup>ème</sup> neutrino stérile ?

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

**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  $\theta_{13}$**

**2012-2016** : **L'étai se resserre** :  **$\theta_{13} \neq 0$**  ; disparition de **anti- $\nu_e$**  de réacteur par **Double Chooz** ( $L \sim 1000$  m), **Daya Bay** ( $L \sim 1650$  m), et **RENO** ( $L \sim 1380$  m) + **T2K** + **MINOS** : Résultats combinés :  **$\sin^2(2\theta_{13}) \sim 0.105$**  ( **$\theta_{13} \sim 9^\circ$**  : faible mais non nul !!!)

## Oscillations de saveur

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

### Paramètres de la matrice de mélange (2016)

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

**les deux différences de masse restantes** :  $\Delta m_{23}^2 = m_2^2 - m_3^2$  ;  $\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2$

**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)**

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

→ Les 3 angles de mélange sont connus, précision à améliorer

→ **Que vaut la phase de violation de CP  $\delta_{CP}$  ???????**

→ **Possibilité de mesurer la violation de la symétrie CP dans le secteur des neutrinos car  $\theta_{13} \sim 9^\circ$  suffisamment grand. C'est le phénomène le plus important restant 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 (leptogénèse) ? A suivre....**

# En conclusion sur les neutrinos aujourd'hui

Depuis plus de 15 ans, résultats expérimentaux indiquent neutrinos massifs (solaires, atmosphériques, 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.

Les futures expériences seront LBL (long baseline) avec très grands détecteurs

## Questions ouvertes sur les neutrinos

Les neutrinos sont-ils stables ?

Echelle de masse absolue des neutrinos ?

Nature du neutrino ? (Dirac ou Majorana)

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

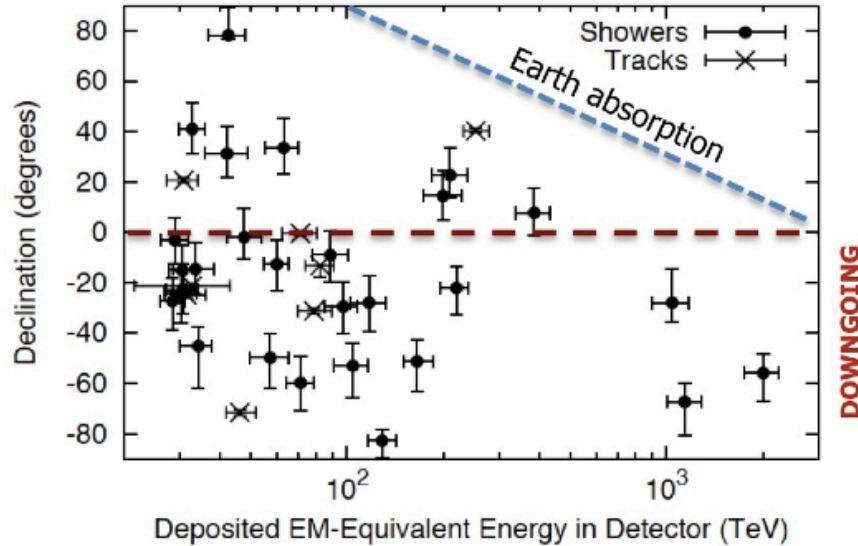
Si  $\beta\beta 0\nu$  alors  $\Delta L = 2$  et physique au-delà du MS ?

Existe-t-il des neutrinos stériles ?

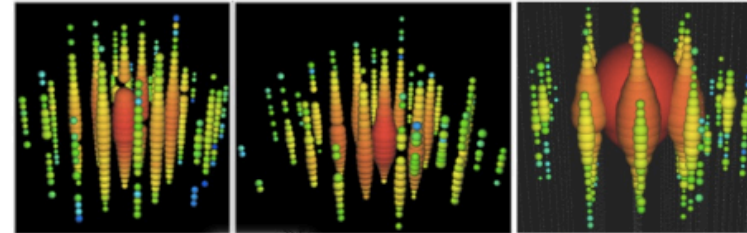
# Merci de votre attention !!

## Conférence WIN2015 IceCube:events

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



DOWNGOING



"Bert"  
1.04 PeV  
Aug. 2011



"Ernie"  
1.14 PeV  
Jan. 2012

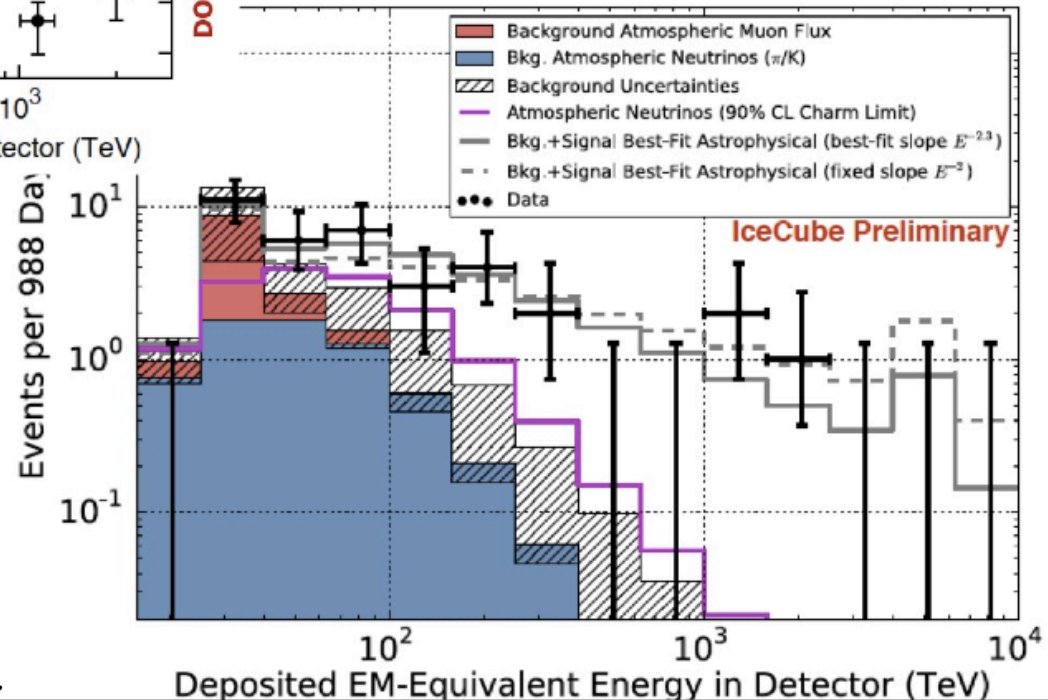


"Big Bird"  
2 PeV  
Dec. 2012

1 PeV =  $10^{15}$  eV !!!

3yrs: 37 events in 988 days  
5,7 sigma PRL (14)

Des neutrinos en  
provenance de l'extérieur  
de notre système solaire...





# Pour en savoir plus

- <http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/documents/numero5/numero5.pdf>  
Numéro 5 de la revue Élémentaire 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, de mes cours au M1 d'Orsay et au M2 de Lyon, des fichiers cités ci-dessus, des articles publiés sur les neutrinos.*