

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

18-29 juillet 2011

Promotion Georges Charpak

Les neutrinos,
des particules encore bien
mystérieuses...

Corinne Augier, UCBL Lyon 1 - IPNL

Cours « Comprendre l'infiniment petit » n° 4 - Lundi 25 juillet 2011

PLAN

- 1- En introduction : les particules élémentaires aujourd'hui
- 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

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 ;
- Sections efficaces, caractérisant la probabilité d'une réaction à se produire, en unité de surface m^2 ou 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

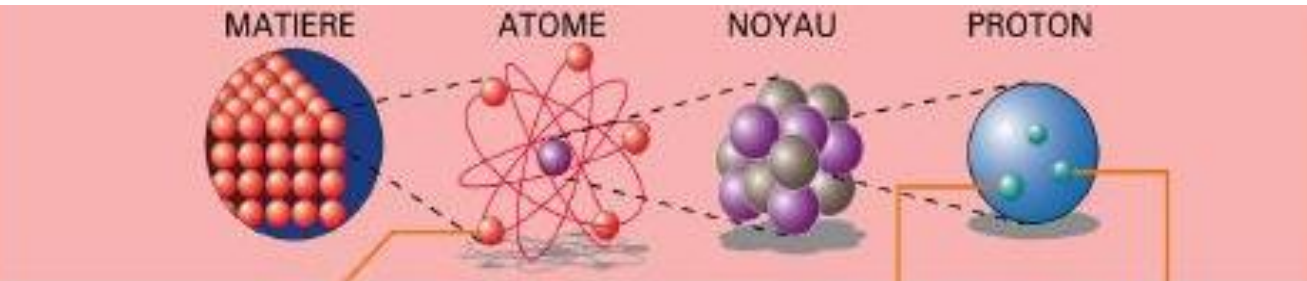
Les fermions de la matière : 3 familles

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



Modèle Standard

Les bosons d'interaction



FERMIONS	LEPTONS		QUARKS	
1 ^{ère} famille (matière stable)	$L_e = 1$ électron	$L_e = 1$ neutrino électron	bas (down)	haut (up)
2 ^{ème} famille	$L_\mu = 1$ muon	$L_\mu = 1$ neutrino muon	étrange (strange)	charme (charm)
3 ^{ème} famille	$L_\tau = 1$ tau	$L_\tau = 1$ neutrino tau	beauté (beauty)	sommet (top)



$Q/e = -1$	$Q/e = 0$	$Q/e = -1/3$	$Q/e = +2/3$
faible, emgt		faible, emgt et forte	

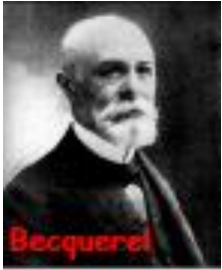
I. Emgt. { γ photon

I. Forte { g gluon

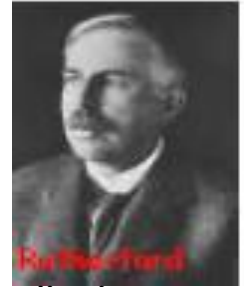
I. faible { Z boson, W boson

Force Carriers

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 α sur feuille d'or) conduisent à une première image de l'atome, avec un noyau massif (contenant $2Z$ protons et Z électrons) entouré de Z électrons

Crise du spin et de l'énergie



1914 : Chadwick mesure le spectre en énergie des rayons β issus de la désintégration du ^{210}Bi : le spectre est continu, contrairement aux spectres α et γ 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 β n'emporte qu'une partie de l'énergie de la désintégration.

1928 : nouveau problème lié au spin (= 1) entier mesuré pour le noyau d'azote 14 (or 14 protons + 7 électrons correspond à un nombre impair de fermions).

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,

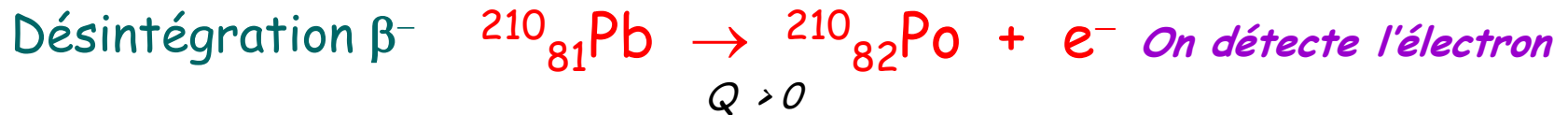
W. Pauli

6

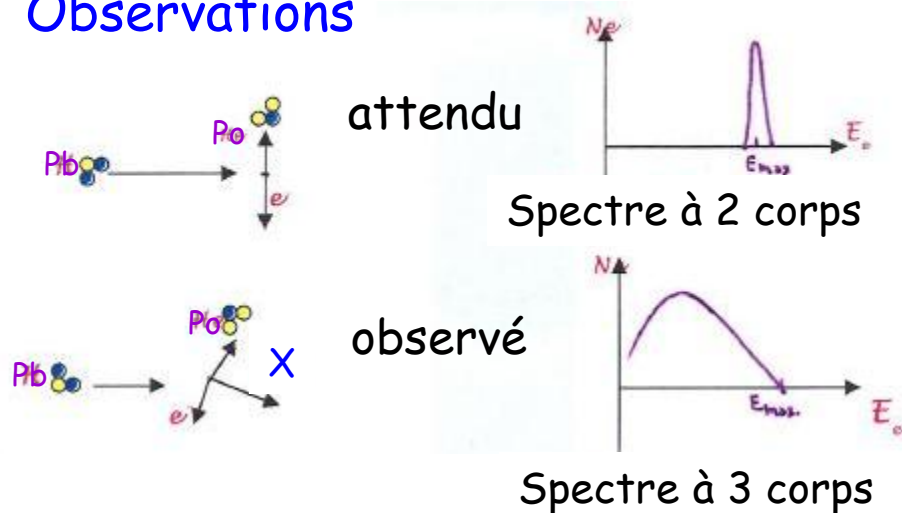
(traduction Claude Maillard - Wolfgang Pauli, Physique moderne et philosophie, Albin Michel, Paris, 1999)

Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine

Explication de ce spectre continu...



Observations



Spectre continu observé !

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

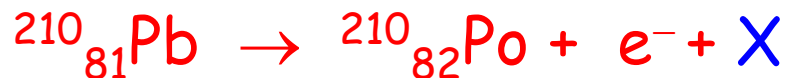
⇒ Il faudrait une 3ème particule dans la désintégration (X)

→ de spin 1/2

→ de masse très petite devant $m_p c^2$

→ 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 est résolue...



- $(7 \text{ protons} + 7 \text{ « neutrons »} + 7 \text{ électrons}) \times 1/2 = \text{entier possible}$!

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

Crise du spin ok

Crise du spectre continu ok

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

1932 : Chadwick observe expérimentalement le vrai neutron, beaucoup plus massif que l'électron (prix Nobel 1935).

1933 : Fermi propose une **théorie de la désintégration β** et il appelle **neutrino** la particule de Pauli



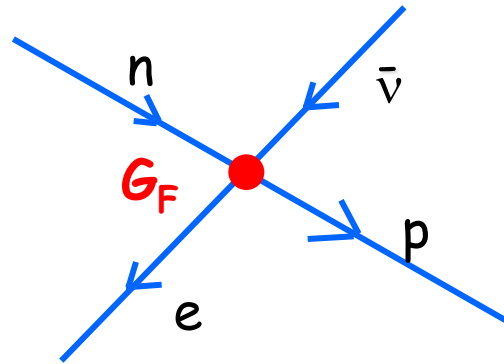
Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine

Les décroissances β^- , β^+ et c.e. : exemples d'interaction faible



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

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



Constante de couplage de Fermi :

$$G_F = 1.17 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} \text{ (incertitude } 10^{-11})$$

$\ll \alpha = 1/137$ constante de structure fine

Interaction faible :

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

En résumé : quelques propriétés des neutrinos

Origine par les décroissances de type β

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 étudier car un neutrino peut traverser la Terre sans être arrêté : des neutrinos de basse énergie (dizaine de MeV) peuvent traverser une longueur de plomb égale à une année-lumière sans que la moitié d'entre eux aient interagi...**

Exemple : section efficace de capture d'un neutrino ν_e par un nucléon :

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

→ **augmente avec E_ν jusqu'à $\sim 10^{-42} \text{ m}^2$ à 1 GeV, et 10^{-40} 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 électronique 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 mixed with cadmium chloride (H₂O + CdCl₂), sandwiched between two layers of liquid scintillator. The detector is surrounded by photomultiplier tubes (PM). The diagram depicts the initial interaction of an anti-neutrino with a proton, followed by the annihilation of a positron with an electron, producing gamma rays. Labels include 'scintillateur liquide', 'H₂O + CdCl₂', '7,6 cm', 'intraction initiale', 'annihilation', and 'PM'. The chemical equation $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ is shown at the bottom left.

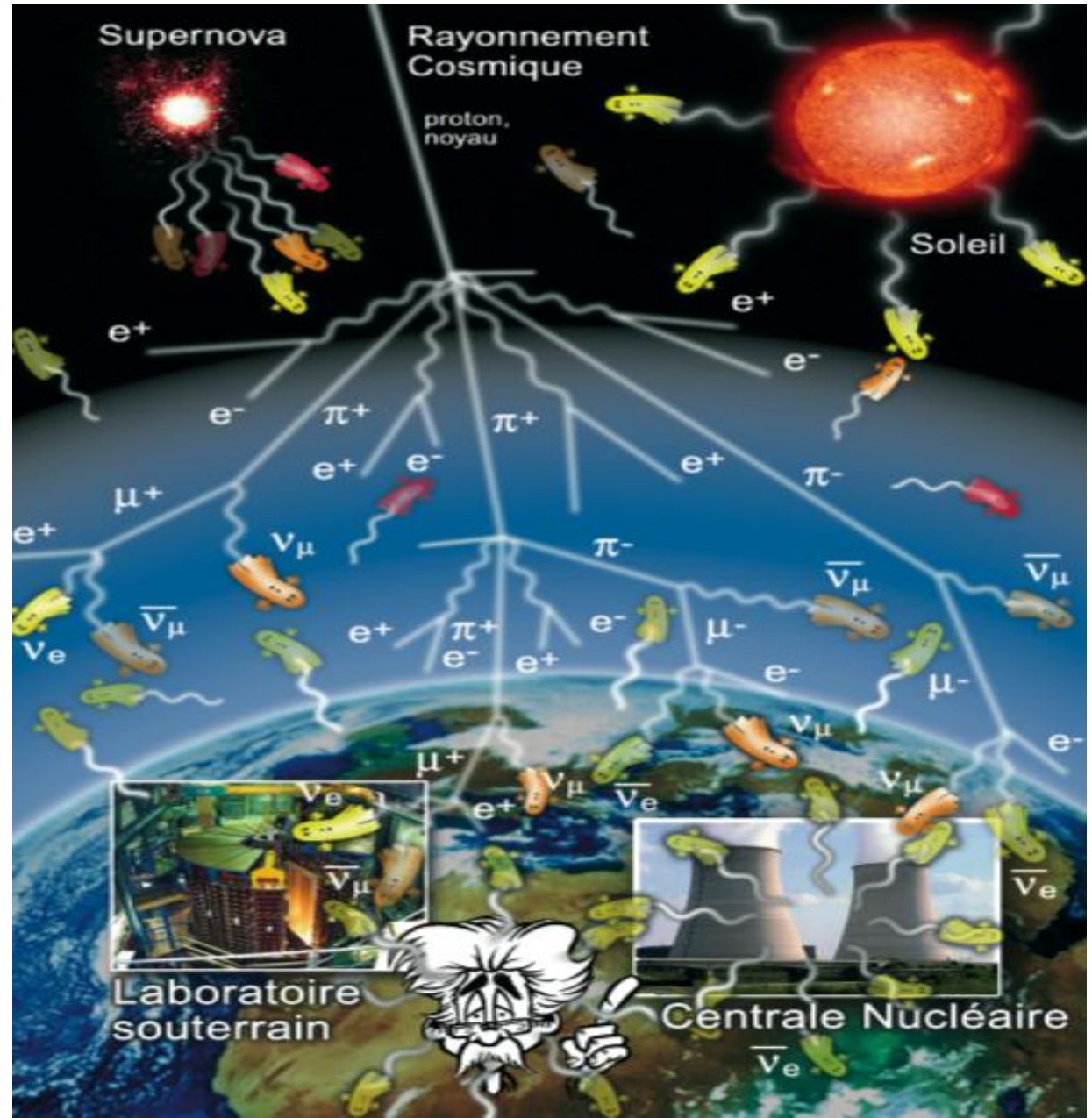
Le neutron est capturé par un atome de cadmium qui en se désexcitant produit 3 photons gamma.

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 : correspond à seulement 3 événements/h avec
 antineutrinos électronique détectés pour 5×10^{13} émis/s.cm²

3- Les sources de neutrinos

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

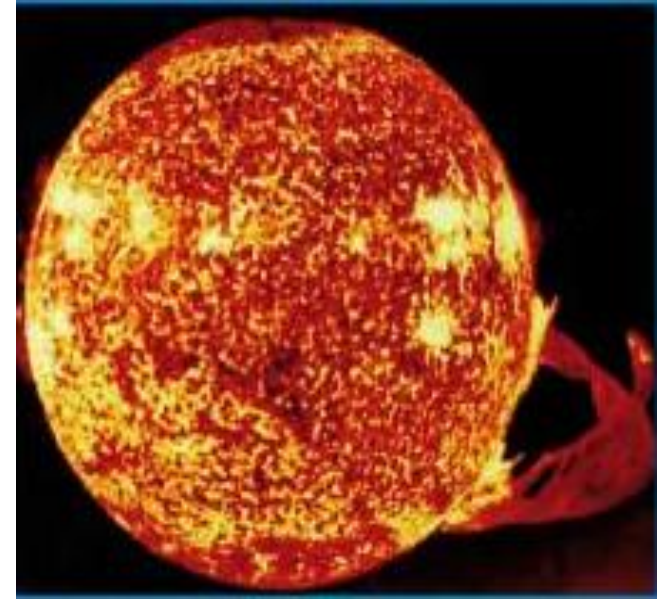


Les sources de neutrinos

Les sources naturelles de neutrinos

1) Les désintégrations isobariques :
émission d'(anti)neutrinos électroniques

2) Les neutrinos émis par le soleil
(neutrinos électroniques)

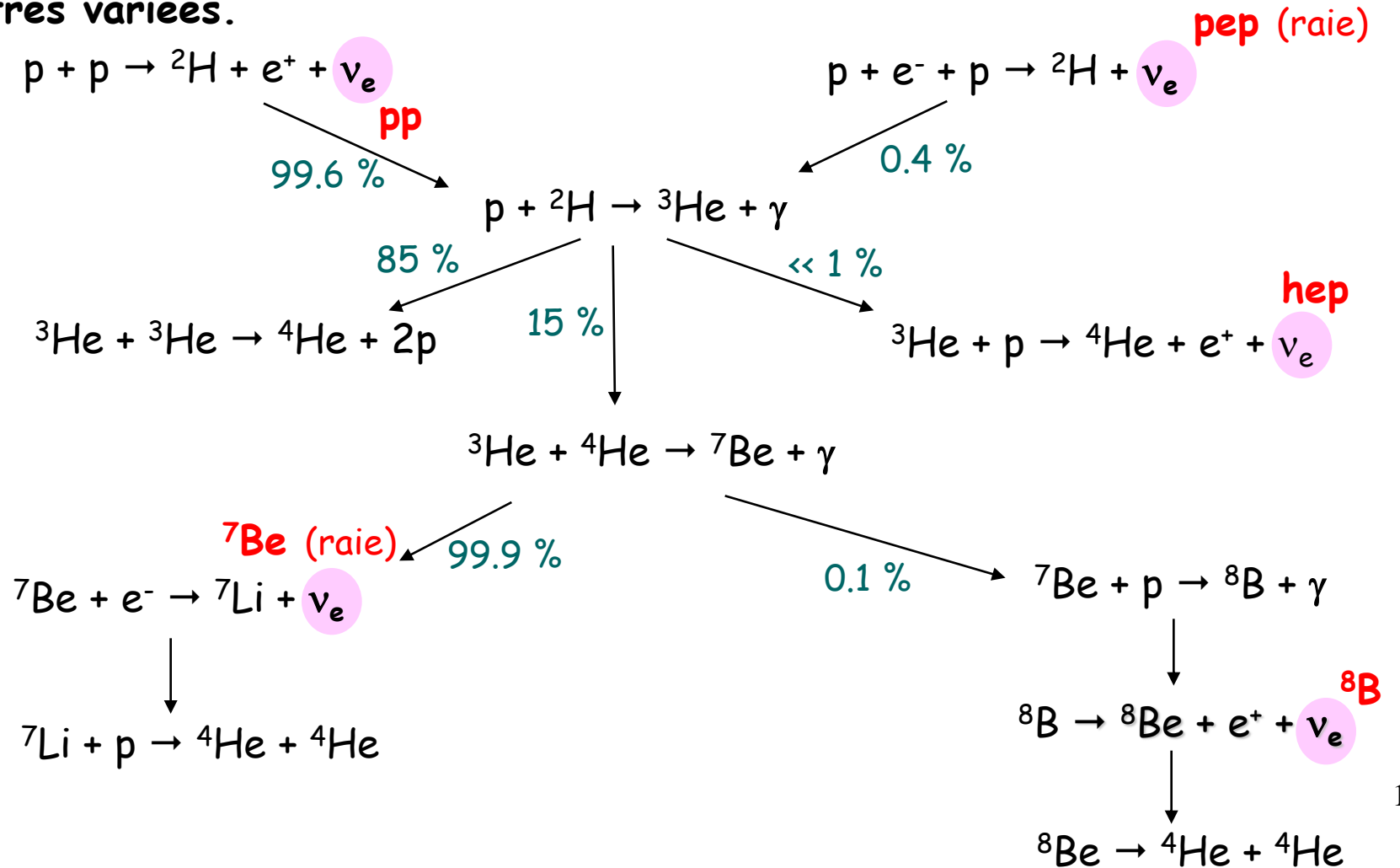


Les sources de neutrinos

Les neutrinos solaires : exemple du cycle pp

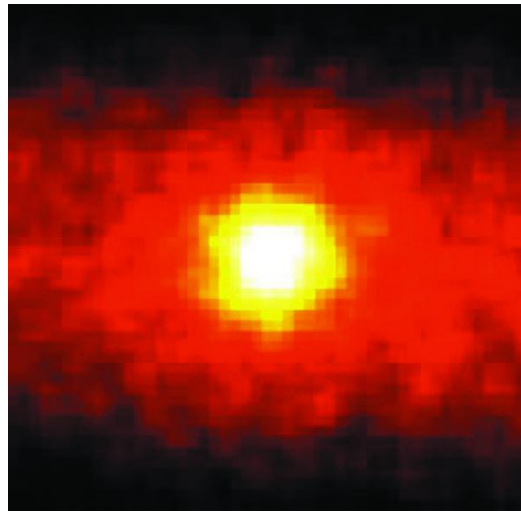
Réactions nucléaires au sein du soleil sources de **neutrinos électroniques**.

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

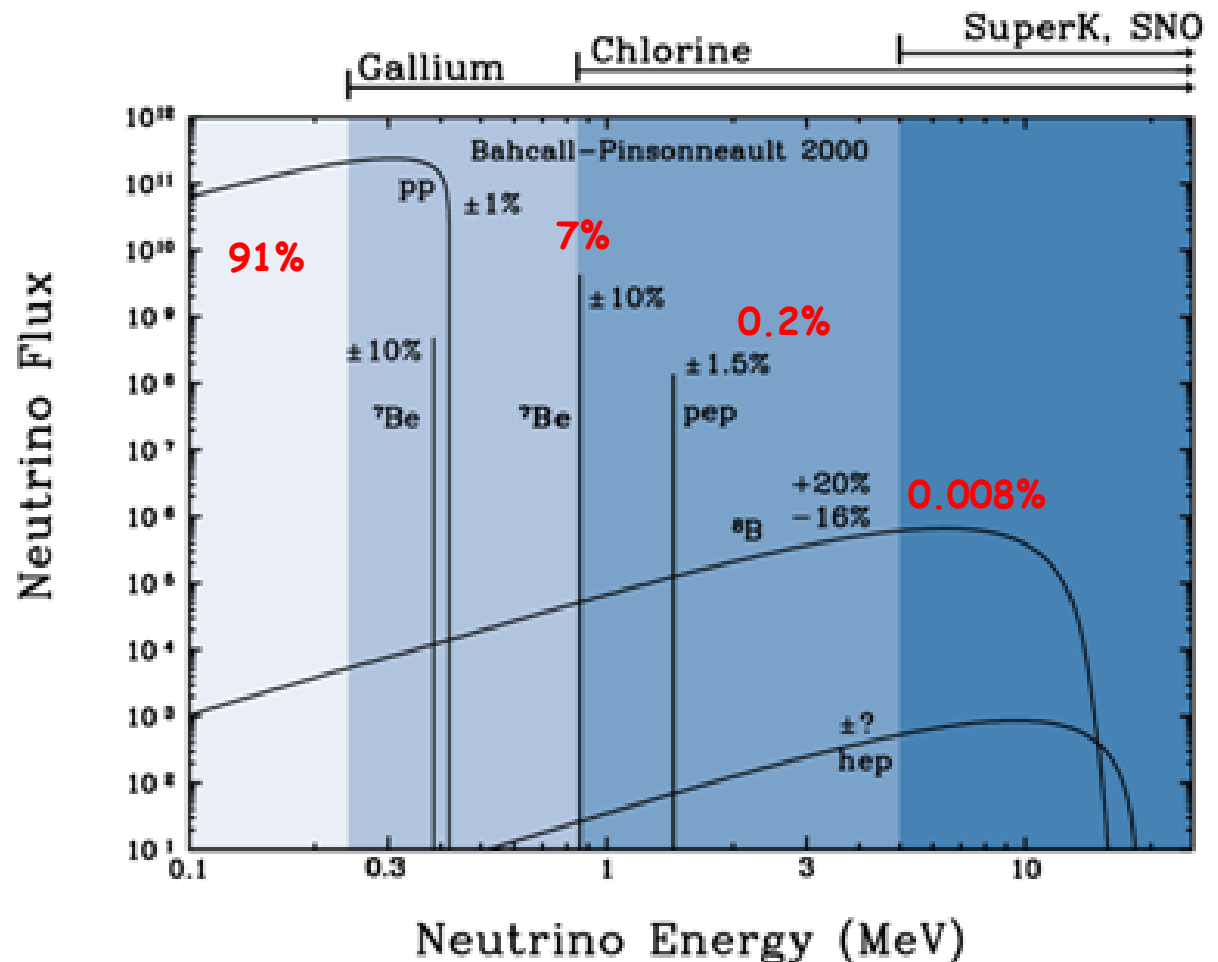


Les sources de neutrinos

Spectre en énergie des ν_{\odot}



Il faut un modèle solaire pour les différents flux



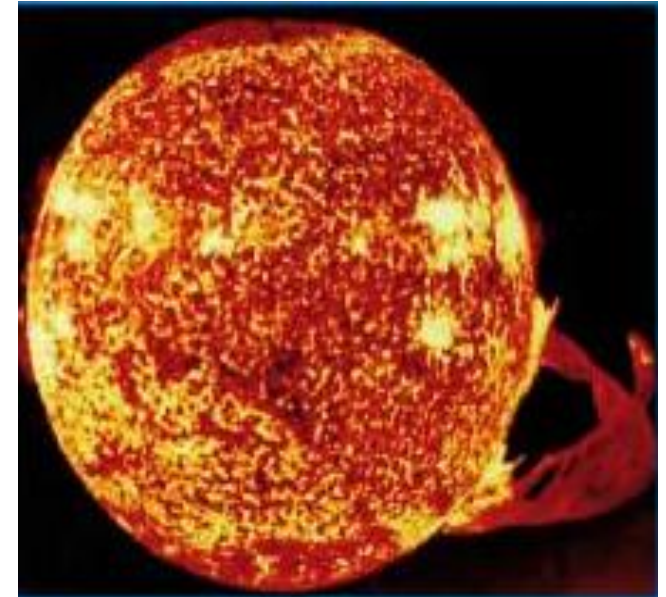
Les détecteurs sont constitués de chlore, de gallium, ou remplis d'eau (SuperK), d'eau lourde (SNO) ou de liquide scintillant (Borexino)...
Chaque détecteur est sensible à un ou plusieurs types de neutrinos.

Les sources de neutrinos

Les sources naturelles de neutrinos

1) Les désintégrations isobariques :
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



et du cosmos

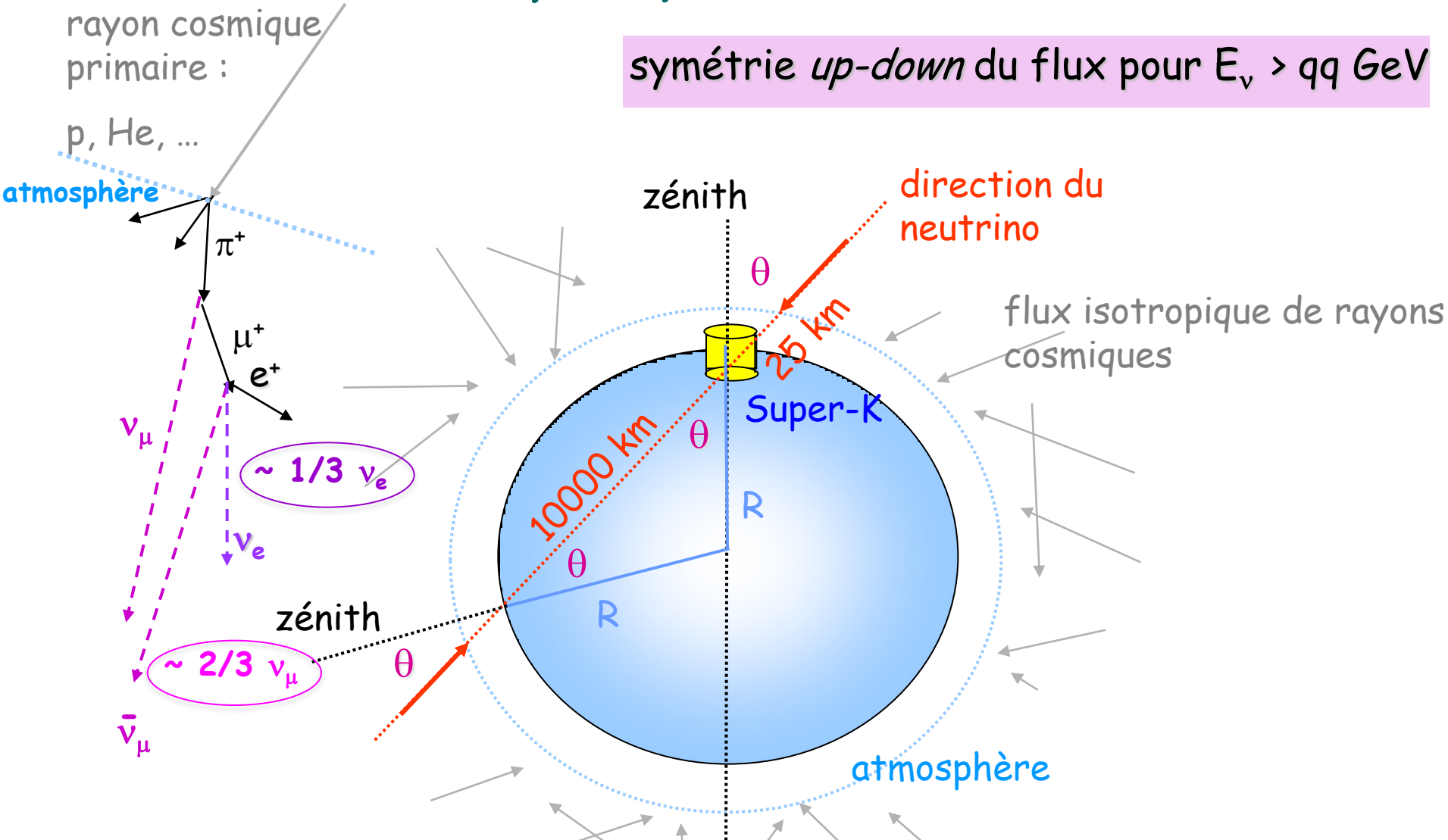


4) Les neutrinos atmosphériques présents dans
les rayonnements cosmiques

Les sources de neutrinos

Neutrinos atmosphériques (500 MeV → 100 GeV)

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



Emission de ν_e et ν_μ 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, représente 3×10^{20} fissions/s soit 18×10^{20} (anti)neutrinos/s



La médecine nucléaire

Les bombes thermonucléaires



En résumé : quelques chiffres

Reines : « *Un neutrino, ce n'est rien, quasiment rien...
C'est la quantité la plus ténue jamais imaginée par l'Homme !* »

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

* En provenance de l'espace :

- **Big-Bang** : $\sim 330 \nu \cdot \text{cm}^{-3}$ **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 $0.5 \cdot 10^{-6}$ protons ou 1000 photons dans 1 cm^3

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

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

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

* **Directement sur Terre**, nous traversant (**personne de 60 kg et surface 1 m²**) :

- **radioactivité** naturelle (roches, source de ν_e et $\bar{\nu}_e$) : $\sim 20 \cdot 10^6 \nu \cdot \text{s}^{-1}$ et du corps humain : $\sim 4000 \nu \cdot \text{s}^{-1}$ venant du potassium 40

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

- abondant {
- **neutrinos atmosphériques** de gerbes cosmiques (source de $\bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_e$ et ν_μ).
- production dans des **accélérateurs** (source de $\nu_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau, \nu_e, \bar{\nu}_\mu$ et ν_τ). 19

4- Un peu d'histoire des neutrinos : découvertes

1930 : Pauli **postule** le neutrino

1934 : Fermi propose sa théorie des désintégrations β

1934 : Radioactivité β^+ 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 β

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

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

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



Un peu d'histoire des neutrinos : découvertes

Quelques mots sur l'hélicité des neutrinos

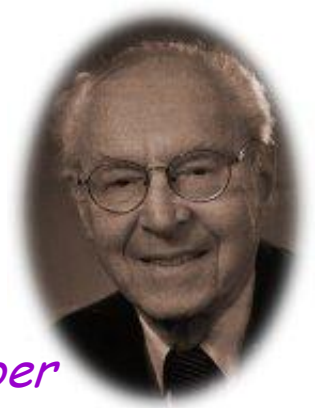
hélicité h d'une particule = projection du spin dans la direction de son impulsion

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

Goldhaber (1957) :

Mesure de l'hélicité du ν : 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 :

- tous les neutrinos sont gauches ou left ν_L (correspond à hélicité négative)
- tous les antineutrinos sont droits ou right ν_R (hélicité positive).

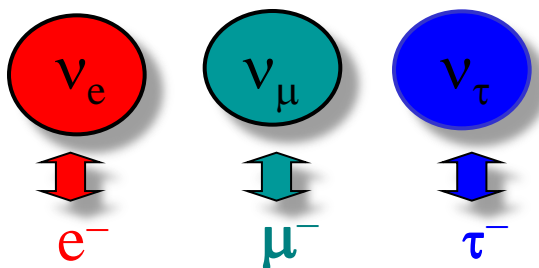
Un peu d'histoire des neutrinos : découvertes

Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

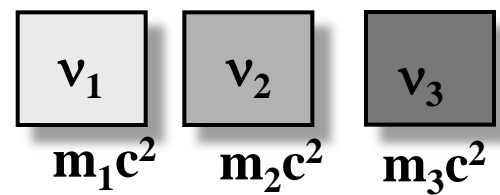
Neutrinos et Modèle Standard

neutrino = fermion élémentaire de la matière, 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*₂₂

Un peu d'histoire des neutrinos : découvertes

Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

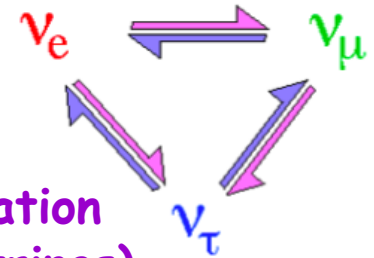
Chacun des neutrinos de saveur que l'on observe (ν_e , ν_μ et ν_τ) peut donc être un mélange de plusieurs neutrinos virtuels (ν_1 , ν_2 et ν_3) mais dans des proportions différentes



Pontecorvo
1957



La mécanique quantique montre qu'un neutrino produit avec une saveur donnée (ν_e , ν_μ et ν_τ) peut se transformer au cours de sa propagation en neutrino d'une autre saveur.



On dit que les neutrinos oscillent au cours de leur propagation (dépend de E_ν et de L 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 : $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$
+ 1 phase de violation de CP δ_{CP}

Un peu d'histoire des neutrinos : découvertes

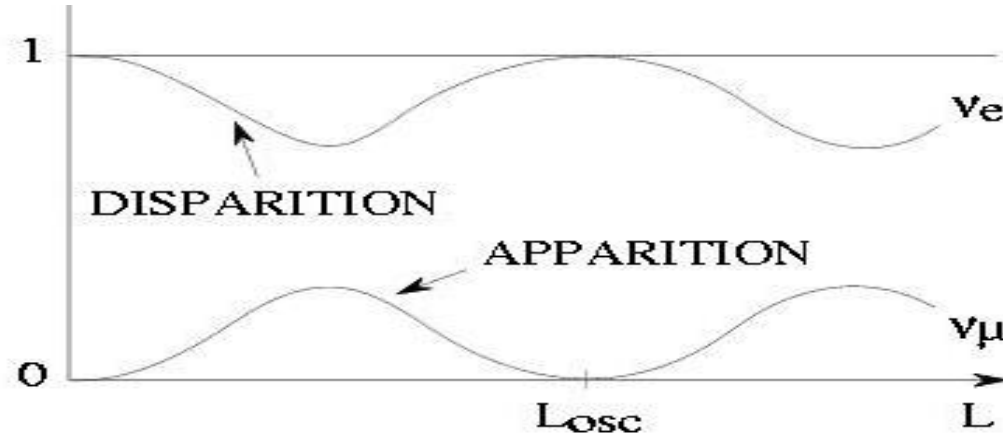
Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

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 ν_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 θ_{12} = angle de mélange entre les états 1 et 2



Si on mesure ν_e :
disparition

Si on mesure ν_μ :
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 : découvertes

1930 : Pauli **postule** le neutrino

1934 : Fermi propose sa théorie des désintégrations β

1934 : Radioactivité β^+ 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 β

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

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

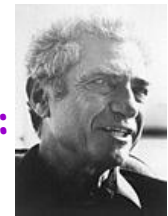
1957 : Goldhaber démontre expérimentalement que le ν est une particule d'hélicité gauche.



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

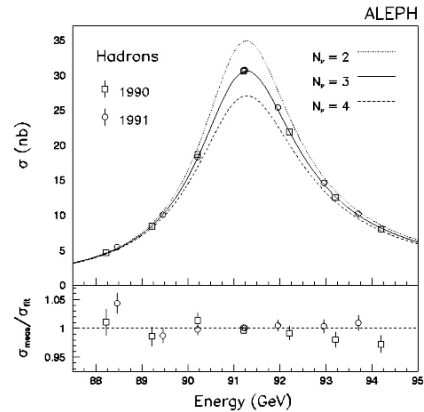


1962 : Découverte d'une **deuxième saveur de neutrinos** : $\nu_\mu \neq \nu_e$ en détection directe par Schwartz, Steinberger et Lederman (prix Nobel 1988) (corrobore aussi la conservation de L).



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

Un peu d'histoire des neutrinos : découvertes



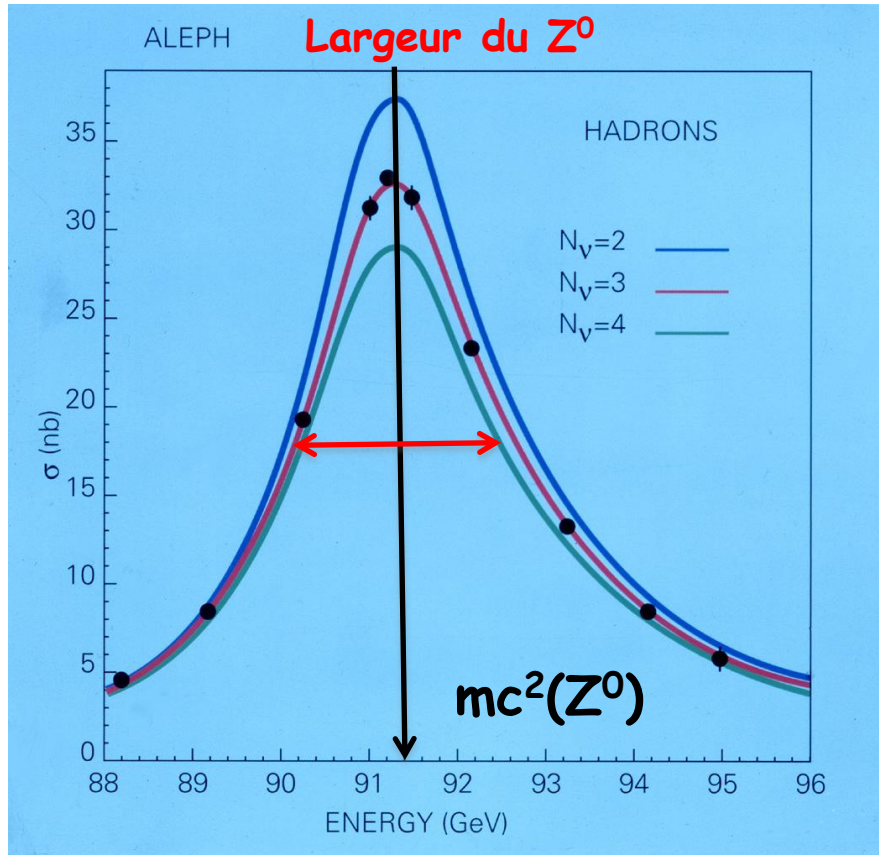
1963 : Maki, Nakagawa et Sakata proposent l'oscillation entre saveurs $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$.

1968 : Les premières mesures du flux de ν_\odot par Davis montrent un déficit de 1/3.

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

Un peu d'histoire des neutrinos : découvertes

3 saveurs de neutrinos légers...



Accélérateur e^+e^- LEP au CERN :

Phase 1 (1989-1995) avec \sqrt{s} = énergie disponible = $M_{Z^0}c^2 = 91 \text{ GeV}$

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

1989 : mesure du nombre de saveurs de ν tels que $m_\nu < m_{Z^0}/2$ par mesure de la largeur totale Γ_Z et des largeurs de désintégration partielles du Z^0 en leptons et quarks

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 ν_e, ν_μ, ν_τ (nombre mesuré en 1989) et toutes ont été observées expérimentalement (depuis 2000)

Un peu d'histoire des neutrinos : découvertes

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

1968 : Premières mesures du flux de ν_\odot par Davis montrent un déficit d'1/3.

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

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

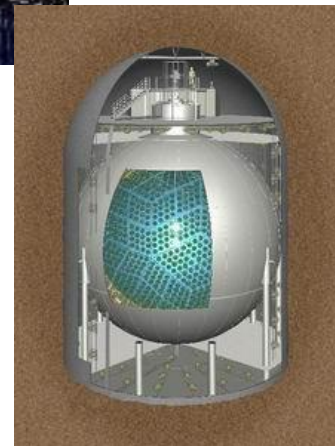
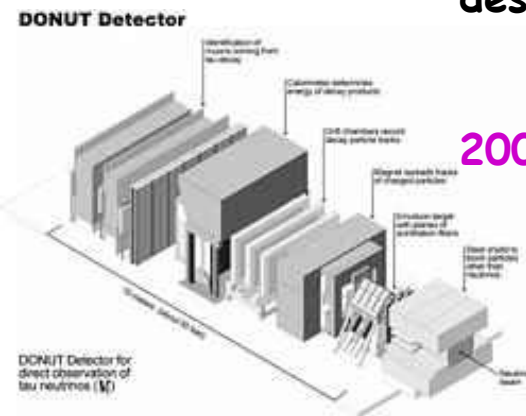
2000 : Découverte ν_τ par DONUT au FNAL.

2001 : SNO au Canada détecte des ν non électroniques parmi les ν_\odot démontrant l'oscillation des ν_\odot .

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

2011 : indication d'oscillation de $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ par T2K ouvrant la voie aux recherches sur la violation de CP dans le secteur leptonique

1998-2011 : 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 ν 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 aurait été 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 ν

→ 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 ν_e

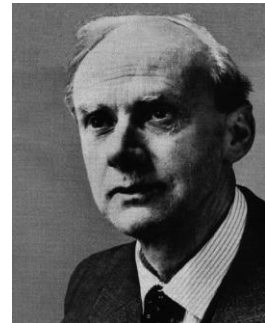
- Quelle est la nature du neutrino ?

→ 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 ν_L, ν_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 β du Tritium $m_\nu < 2.2 \text{ eV}$

Fluctuations du CMB (fond diffus cosmologique)

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

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, ν atmosphériques, accélérateurs à $\neq E$
+ astronomie neutrino (ANTARES dans l'eau, IceCube avec 1 km³ de glace) ...
+ différentes méthodes de détection

avec

neutrino = énergie ou impulsion manquante si créé

ou

neutrino = mesuré par ses produits de réaction si interagit

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

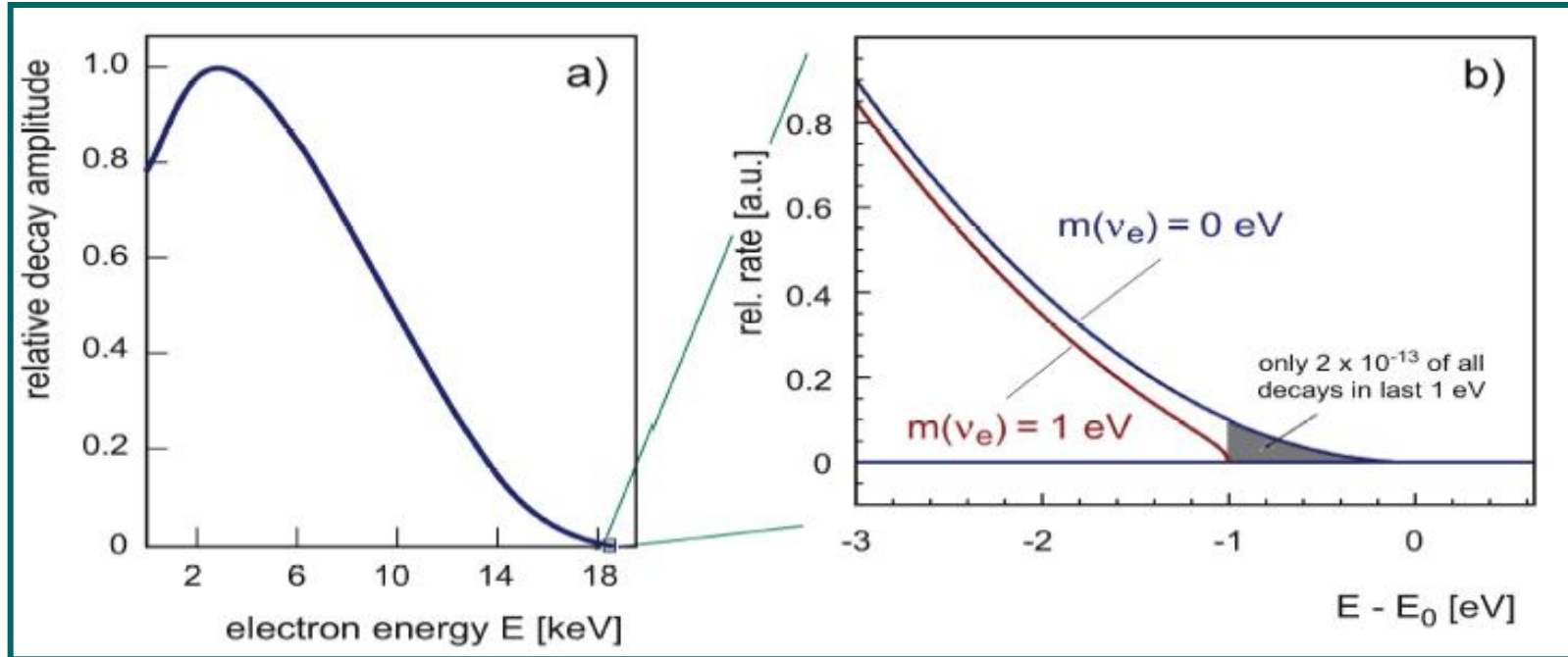
→ **Laboratoire Souterrain** pour protections contre les rayons cosmiques + **blindages** + sélection rigoureuse des matériaux les plus **radiopurs**

Mesures directes

Désintégration bêta du tritium



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



Expériences MAINZ et TROITSK : $m_{\nu_e}c^2 < 2.2 \text{ eV}$ (95% C.L.)

Détecteur KATRIN en construction pour mesurer $m_{\nu_e}c^2 < 0.2 \text{ eV}$

Cosmologie : WMAP

Résultat conservatif utilisé : $\sum_i m_i < 1.75 \text{ eV} \Rightarrow m_i < 0.6 \text{ eV}$ si $m_1 = m_2 = m_3$

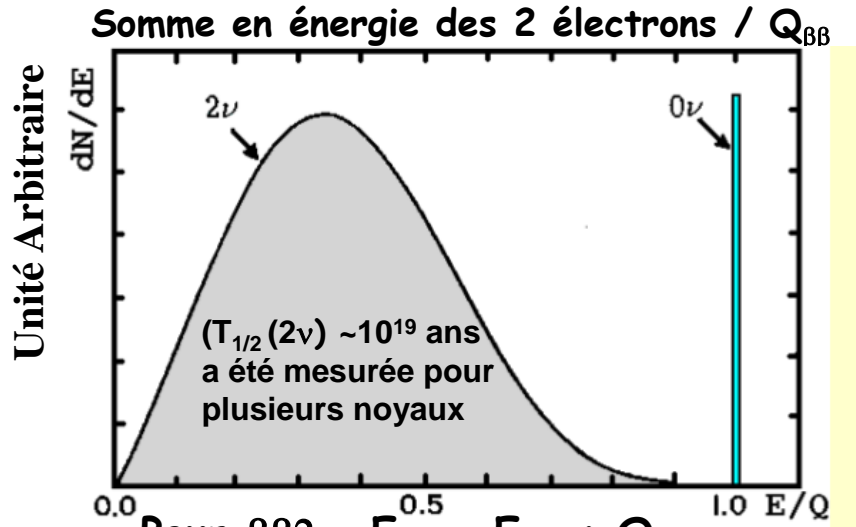
Double désintégration bêta sans émission de neutrinos



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

→ physique au-delà du M.S.

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



Pour $\beta\beta 2\nu : E_{e1} + E_{e2} < Q_{\beta\beta}$
 Pour $\beta\beta 0\nu : E_{e1} + E_{e2} < Q_{\beta\beta}$

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

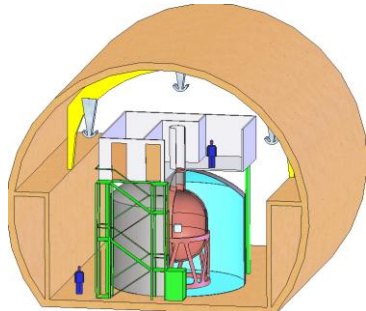
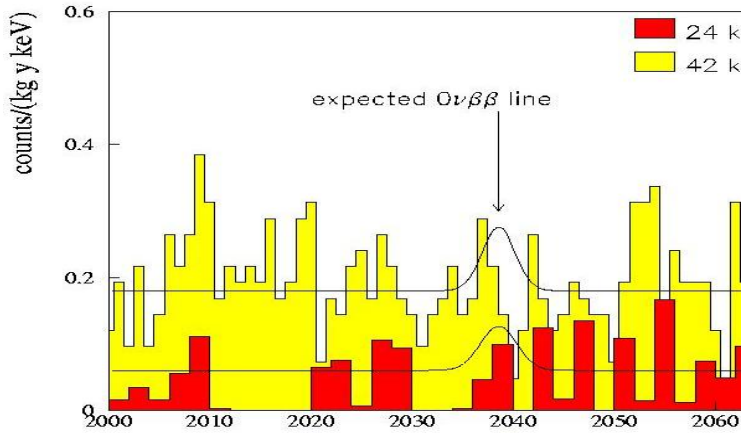
$\langle m_\nu \rangle$ pourrait donner une échelle absolue pour la masse des neutrinos

Double désintégration bêta sans émission de neutrinos

Expérience NEMO3 au
Laboratoire Souterrain de Modane
(tunnel du Fréjus)

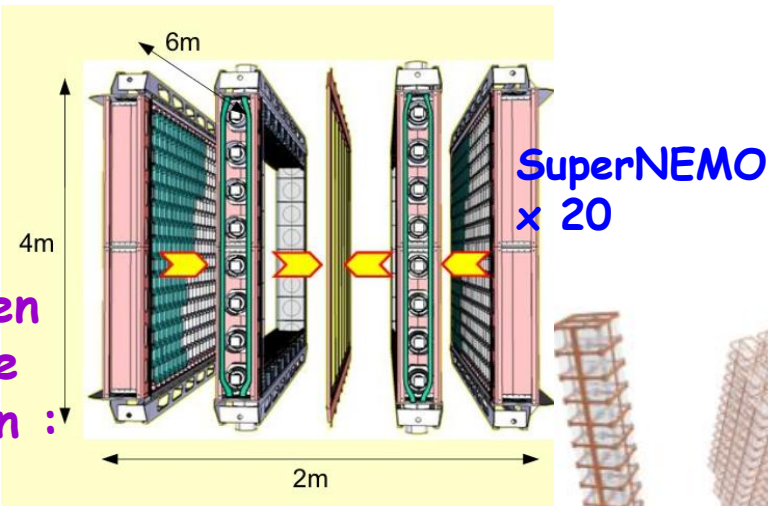


Meilleure limite en ^{76}Ge
(Heidelberg-Moscou / IGEX)
 $m_{\text{eff}} < 400-800 \text{ meV}$

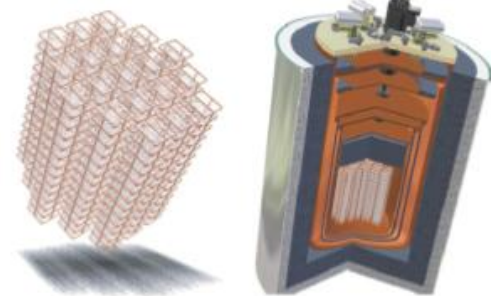


GERDA

Projets en
cours de
réalisation :



CUORE



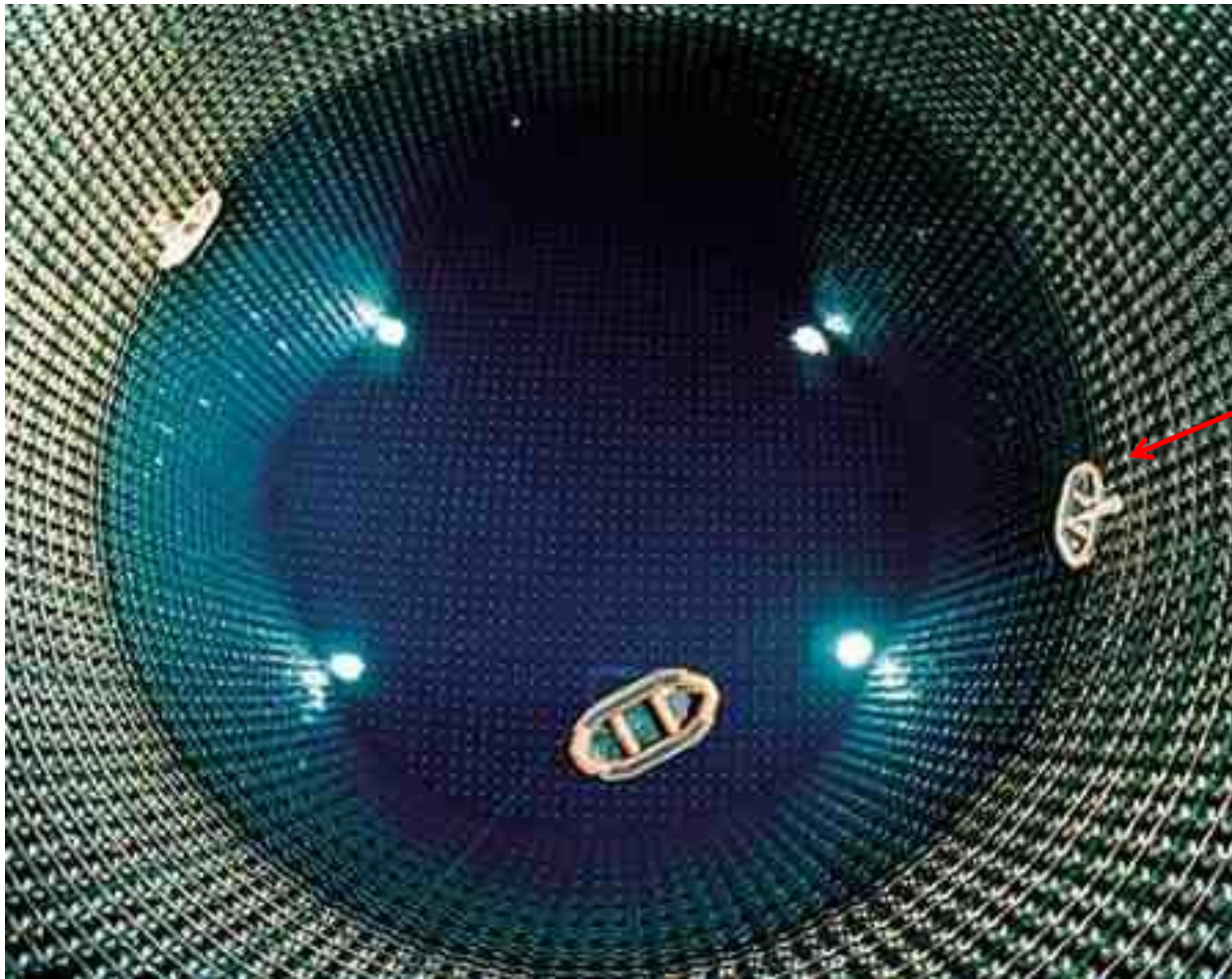
→ vers une masse effective $< 50 \text{ meV}$

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



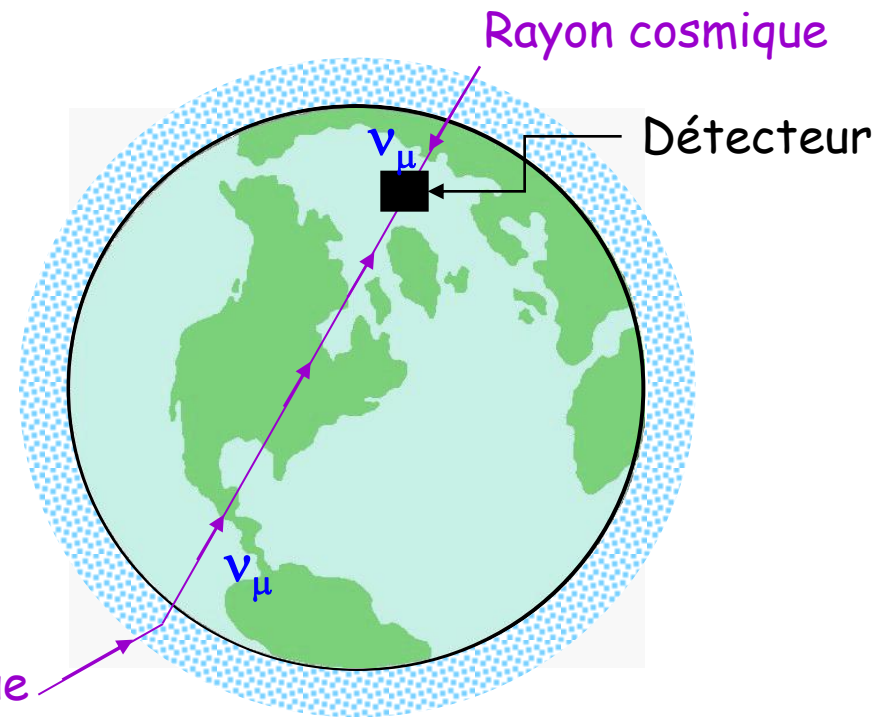
Physiciens sur
bateau gonflable
inspectant les
capteurs

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



Pour des rayons cosmiques de plus de 2 GeV sans disparition de ν_μ (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 $E_\nu > 1.3 \text{ GeV}$

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

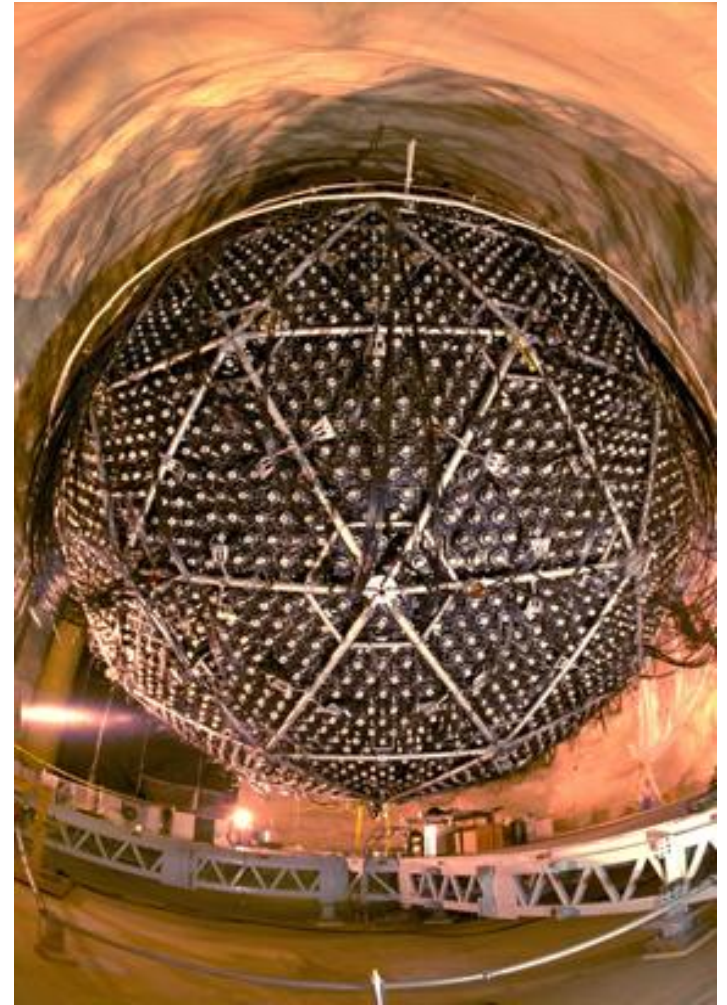
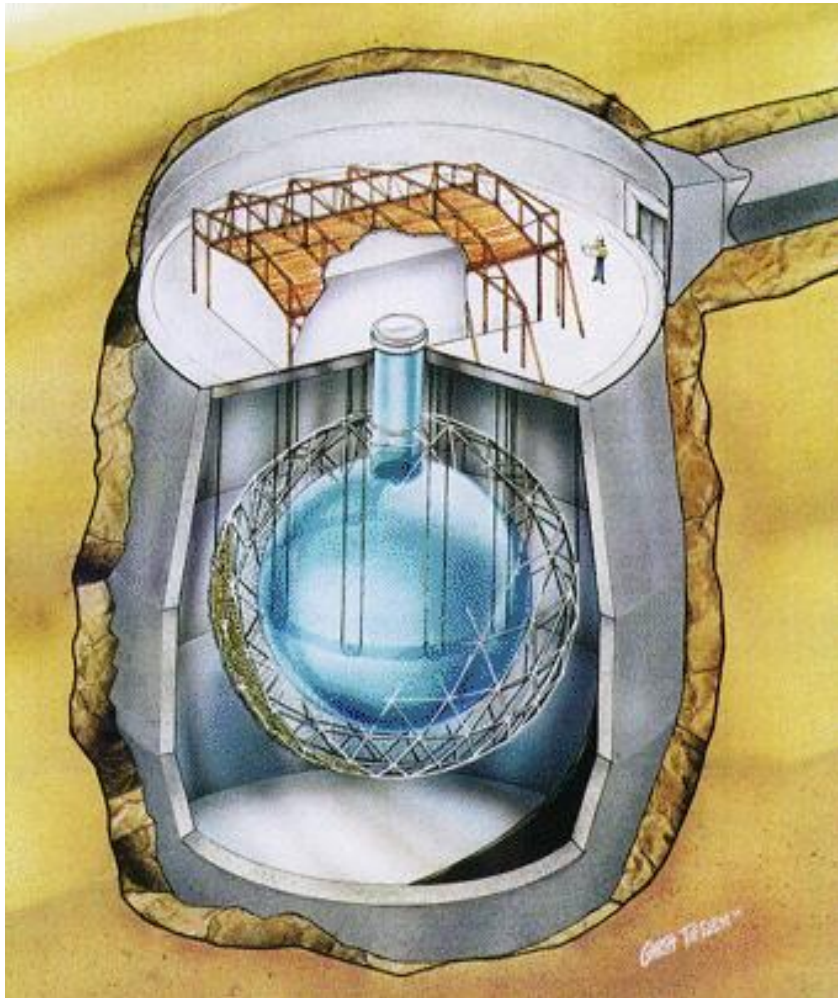
Asymétrie up/down : oscillation des neutrinos mu à travers la Terre³⁷

Oscillations de saveur

SNO = Sudbury Neutrino Observatory (Canada)

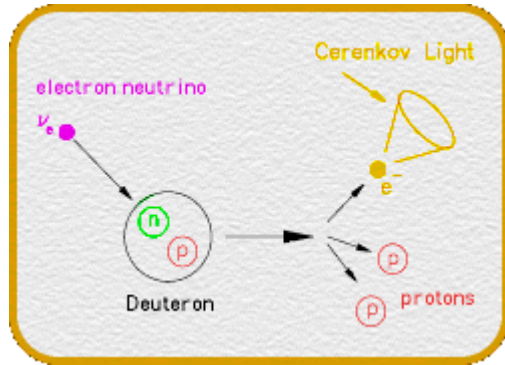
Détection de tous les neutrinos - Etude des neutrinos solaires

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



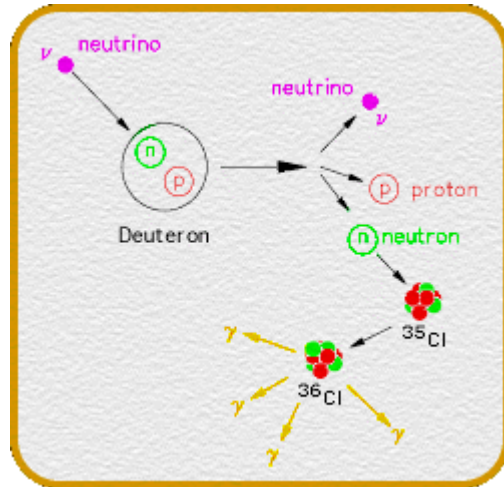
Oscillations de saveur

SNO = Sudbury Neutrino Observatory (Canada)



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

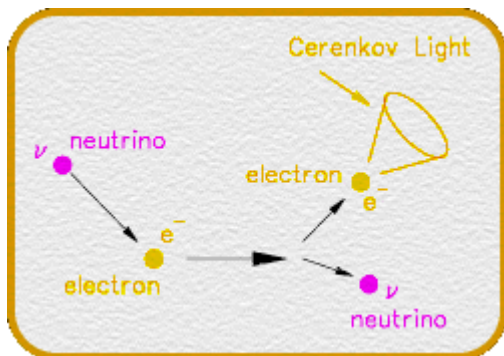
Flux déficitaire en $\nu_e \rightarrow$ Oscillations de ν_e



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

Flux des 3 saveurs de ν conforme aux prédictions

(confirme le modèle solaire SSM)

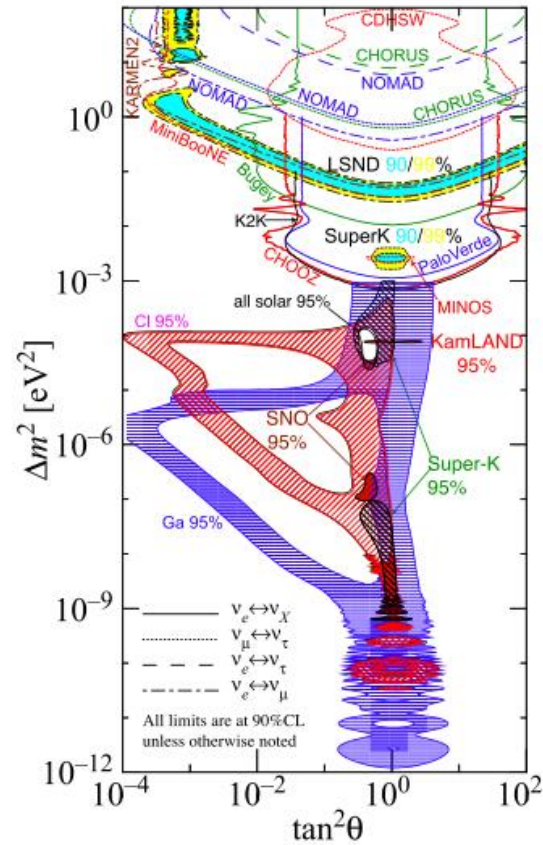


E.S. = diffusion élastique : $\nu_X + e^- \rightarrow \nu_X + e^-$ (sensible aux trois saveurs)

Il existe des ν 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 et de réacteurs : oscillations observées donc masse !



Toutes les expériences solaires (Homestake, GALLEX, SAGE, SNO, SuperK) ont trouvé un **important déficit du flux de ν solaires** (interprété comme dû à des oscillations $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu\tau}$)

L'expérience KamLAND a montré un **phénomène d'oscillations avec des anti- ν_e** provenant de réacteurs situés à 200 km, avec des paramètres en accord avec oscillations de neutrinos solaires. Juin 2011 : confirmé par **T2K avec $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$**

SNO a aussi mesuré le **flux total de neutrinos** en accord avec le SSM (Standard Solar Model) → **aucun déficit + SSM est ok**

Les expériences avec neutrinos atmosphériques ont toutes trouvé un **déficit du flux de ν_μ atmosphériques** (oscillations $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$) : SK + K2K et MINOS (faisceau de neutrinos)

Enfin, Mini-Boone n'a pas confirmé l'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (ni avec les anti- ν_μ) annoncée par LSND en 2001

Toutes ces expériences donnent des informations sur :

$$\Delta m_{23}^2 = m_2^2 - m_3^2 ; \Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2 ; \theta_{12} ; \theta_{13} ; \theta_{23}$$

Donc sur les paramètres de la matrice de mélange des neutrinos U

6- En conclusion sur les neutrinos

Depuis plus de 10 ans, résultats en faveur de neutrinos massifs (ν solaires, ν atmosphérique, ν de réacteurs).

Oscillations observées et confirmées

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

Notons que L_e , L_μ et L_τ ne semblent pas conservés pendant le phénomène d'oscillation mais qu'ils le sont, avec L , dans le MS.

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 ?

Pour en savoir plus

- <http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/documents/numero5/numero5.pdf>
Numéro 5 de la revue Elementaire sur 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://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-neutrino-mixing.pdf>
Résultats des différentes expériences sur les neutrinos - Revue 2010 du Particle Data Group
- Les sites des différentes expériences.
- 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, et des fichiers cités ci-dessus.