

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

Promotion Ettore Majorana - 16-27 juillet 2012

Cours « Comprendre l'infiniment petit » (1)

Les neutrinos,
des particules toujours bien
mystérieuses...

*Corinne Augier, UCBL Lyon 1 - IPNL
Lundi 16 juillet 2012 - 15h15*

PLAN

1- Les constituants élémentaires aujourd'hui (voir les 3 cours d'Anne-Isabelle Etievre)

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 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

12 fermions élémentaires de la matière :

6 quarks et 6 leptons, particules de spin $\frac{1}{2}$, regroupés en 3 familles + leurs antiparticules

4 interactions fondamentales :

- Interaction forte
- Interaction électromagnétique
- Interaction faible
- Interaction gravitationnelle

Les interactions agissent sur les constituants élémentaires via des bosons (spin entier) d'interaction, encore appelés bosons intermédiaires.

Un modèle décrit les 12 constituants élémentaires (et leurs antiparticules) et 3 des 4 interactions fondamentales (manque la gravitation).

Le modèle standard de la physique des particules (MS) a été vérifié expérimentalement.



Il ne manquait qu'un boson à découvrir pour expliquer la masse des particules... appelé boson de Higgs.... mais le 4 juillet 2012....

Voir cours d'Anne-Isabelle Etievre !!!!

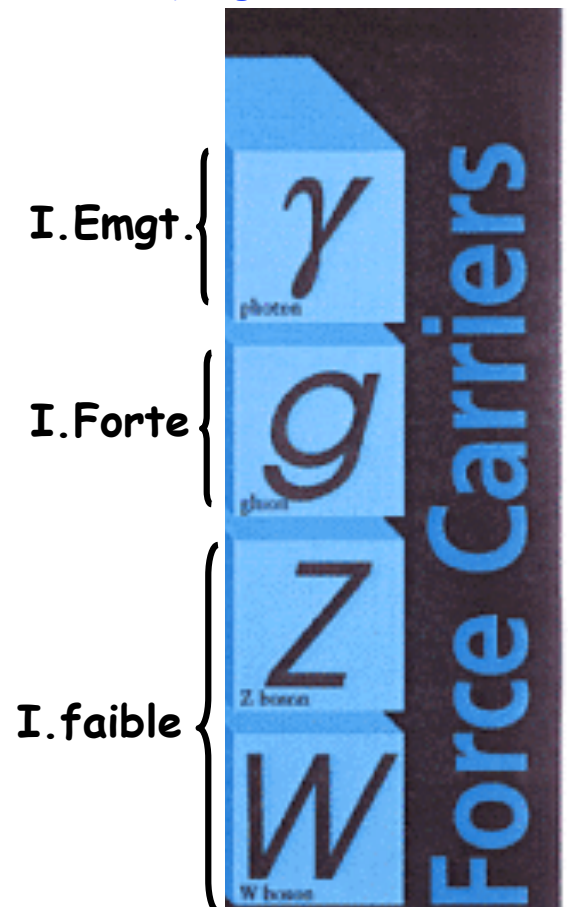
1- En introduction : les particules élémentaires aujourd'hui

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

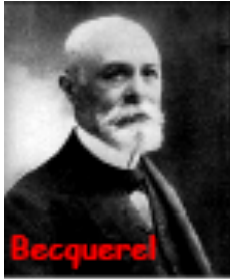
- 3 saveurs pour chaque charge électrique
- **nombre leptonique L pour les leptons/antileptons**

	MATIERE	ATOME	NOYAU	PROTON
FERMIONS	LEPTONS		QUARKS	
	Spin 1/2			
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)
ANTIMATIÈRE	Une antiparticule pour chaque fermion			
	$Q/e = -1$	$Q/e = 0$	$Q/e = -1/3$	$Q/e = +2/3$
	faible, emgt		faible, emgt et forte	

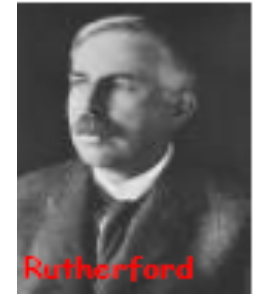
Les bosons d'interaction
(manque gravitation)



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 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 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. Pb avec la conservation de l'énergie ???

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

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,

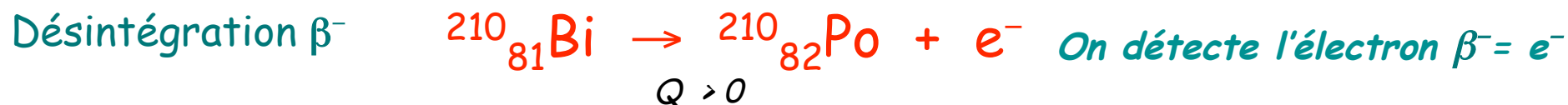
W. Pauli

7

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

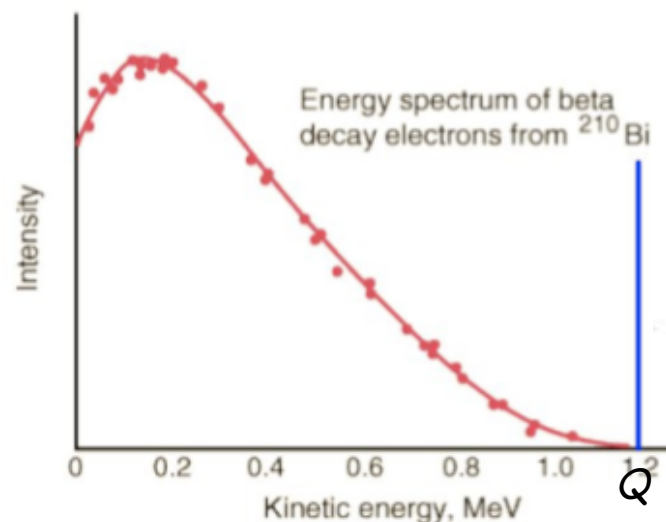
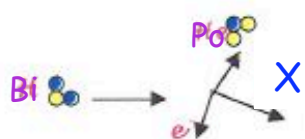
Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine

Explication de ce spectre continu...

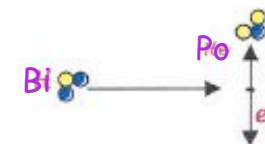


Observations

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 ^{14}N : (A protons + 1 « neutron de Pauli » + $(A-Z)$ électrons) \times 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 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 = A protons + $(A-Z)$ neutrons.

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



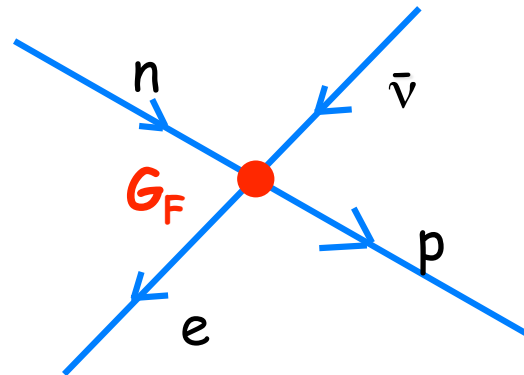
Un peu d'histoire des neutrinos : leur origine

Les décroissances 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 de l'interaction électromagnétique

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 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 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 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 region containing a mixture of water and cadmium chloride ($H_2O + CdCl_2$) with a height of 7.6 cm. This central region is sandwiched between two layers of liquid scintillator. The entire setup is surrounded by photomultiplier tubes (PM). The diagram depicts the initial interaction of an anti-electron neutrino ($\bar{\nu}_e$) with a proton (p) to produce a neutron (n) and a positron (e^+). The positron then annihilates with an electron (e^-), producing two gamma photons (γ). The neutron is captured by a cadmium atom (Cd), which then decays, producing three gamma photons (γ). The chemical equation at the bottom is $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$.

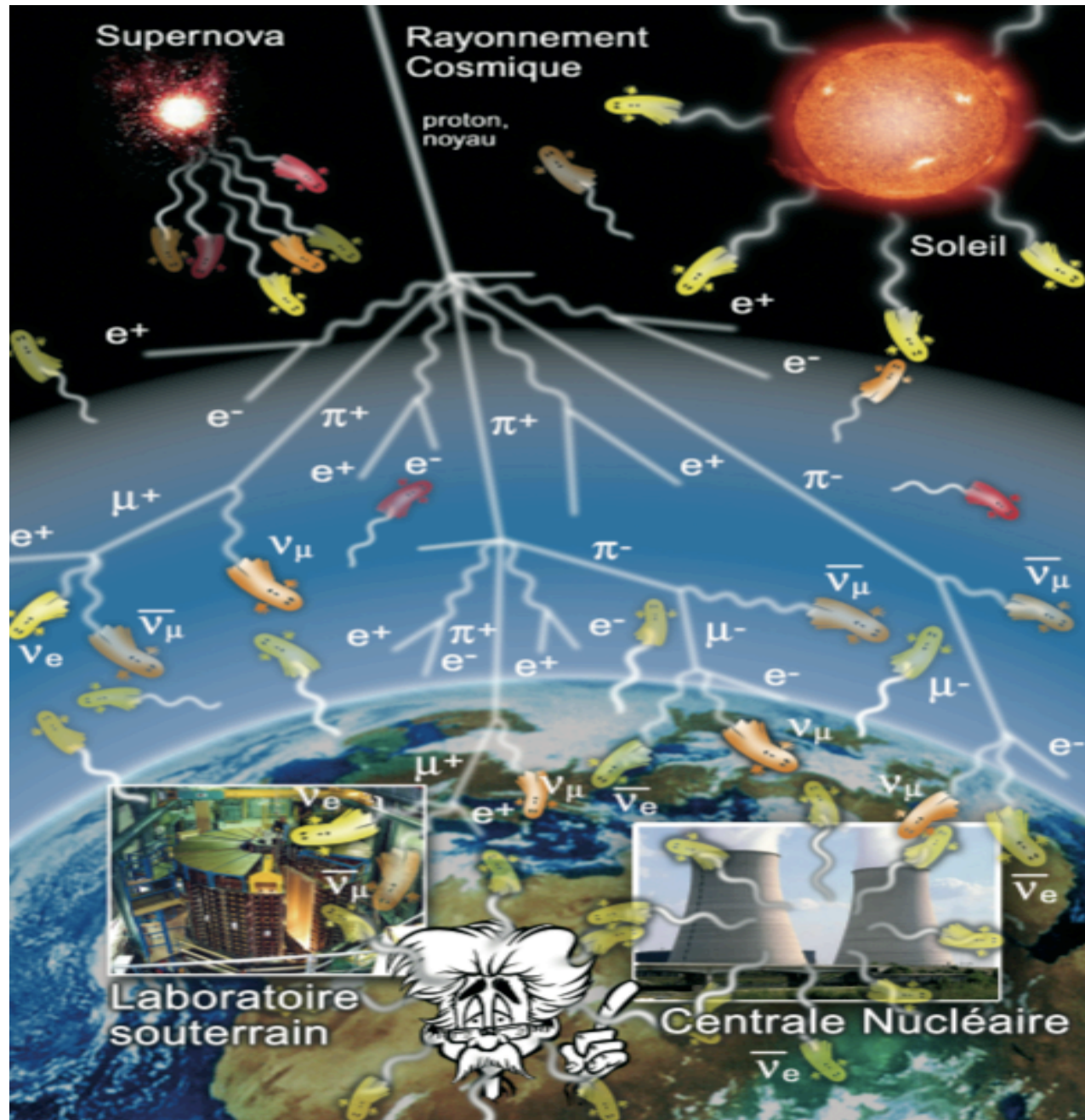
Le neutron est capturé par un atome de cadmium qui en se désexcitant produit 3 photons gamma.

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 5×10^{13} antineutrinos électron émis/s.cm² par le réacteur, seulement 3 événements/h détectés

3- Les sources de neutrinos

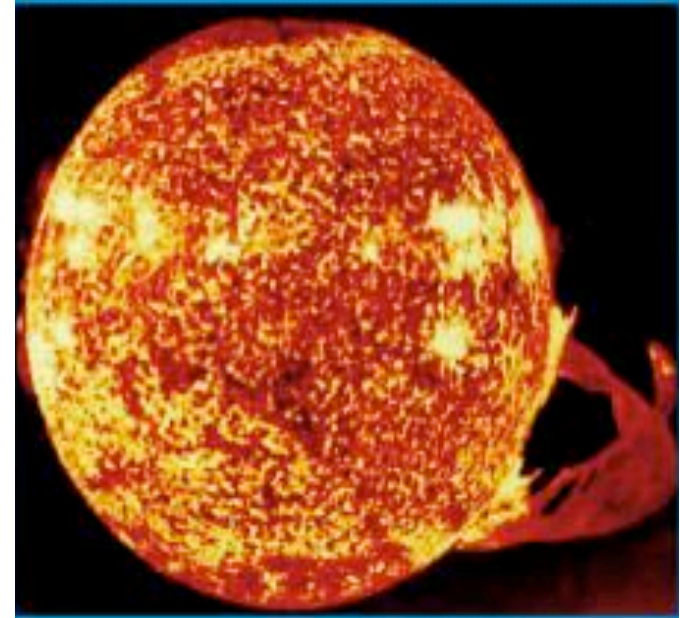
Sources naturelles ou artificielles : des neutrinos en provenance de l'espace ou de la Terre...



Les sources de neutrinos

Les sources naturelles de neutrinos

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

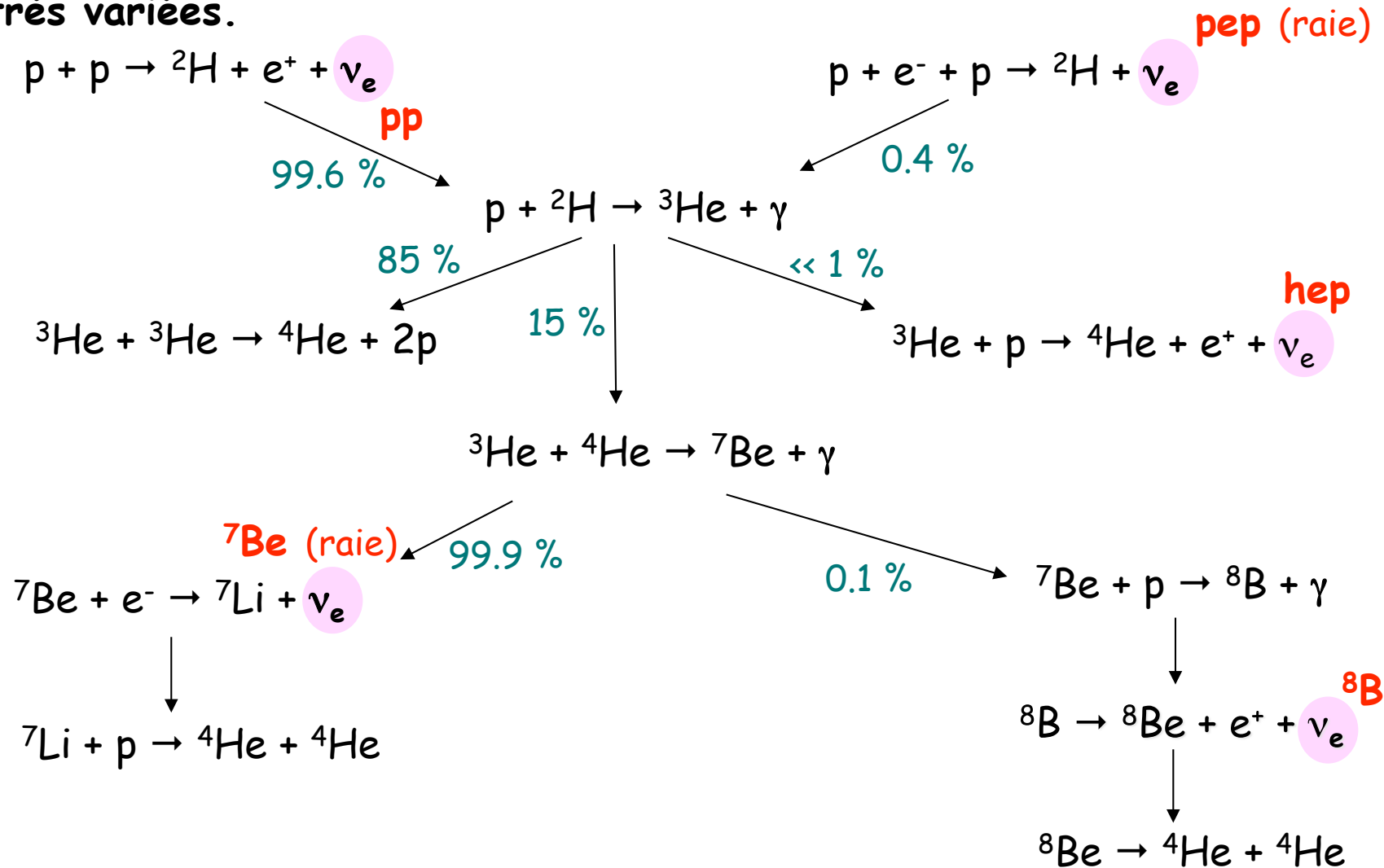


Les sources de neutrinos

Les neutrinos solaires : exemple du cycle pp

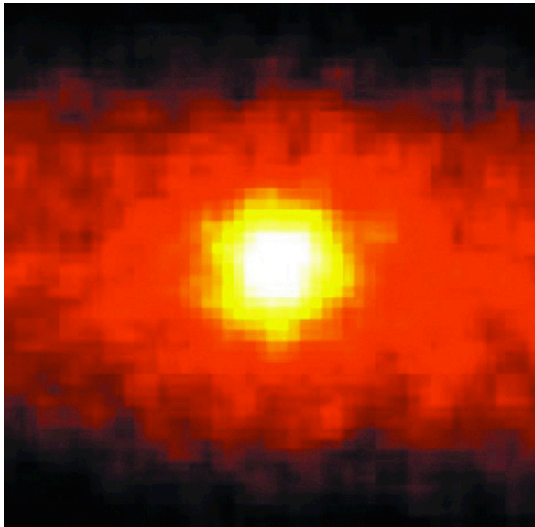
Réactions nucléaires au sein du soleil sources de **neutrinos électroniques**.

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

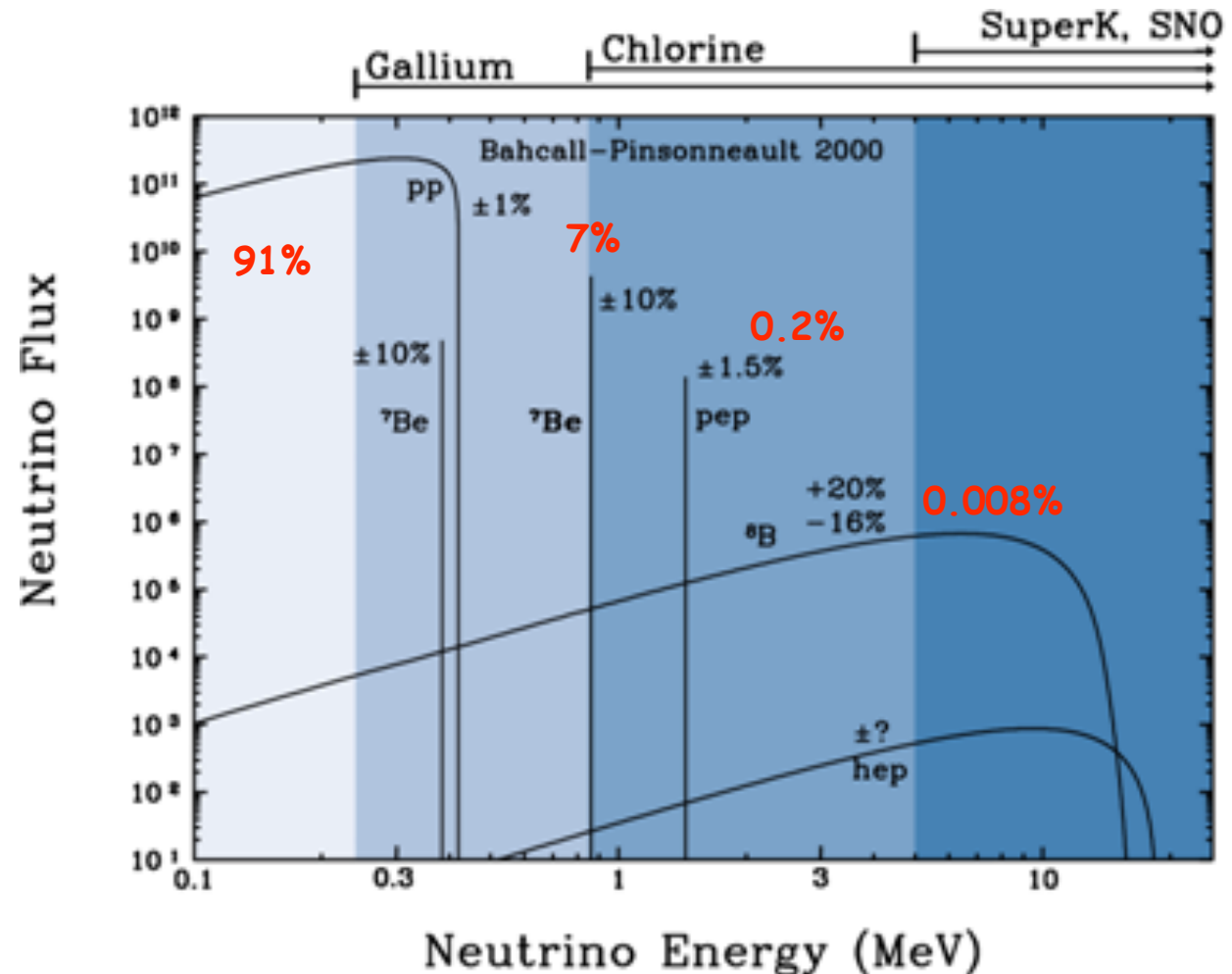


Les sources de neutrinos

Spectre en énergie des ν_{\odot}



Il faut un modèle solaire pour les différents flux

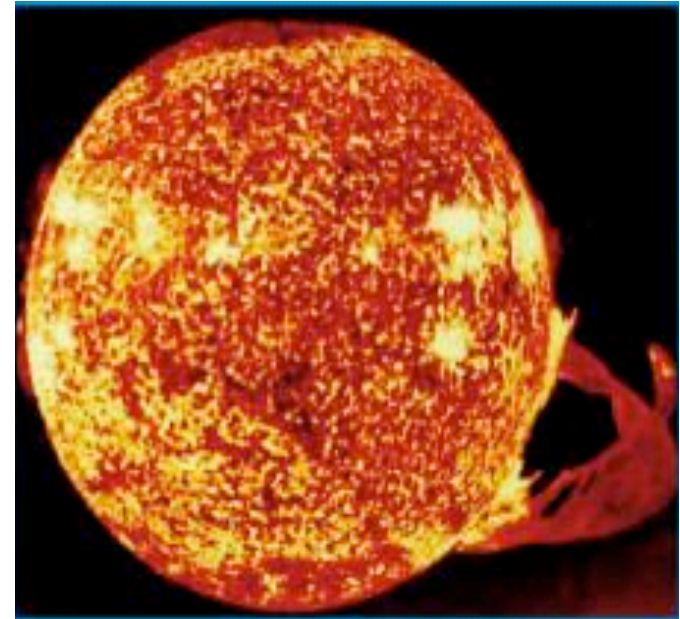


Les détecteurs sont constitués de chlore, de gallium, ou remplis d'eau (SuperK), d'eau lourde (SNO) ou de liquide scintillant (Borexino)...
Chaque détecteur est sensible à un ou plusieurs types de neutrinos.

Les sources de neutrinos

Les sources naturelles de neutrinos

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

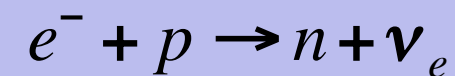


- 3) Les (anti)neutrinos issus d'explosion de supernovae et du cosmos...

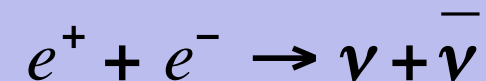


Supernova SN1987A lors de son explosion.

Neutrinos issus des supernovae



(Anti)neutrinos issus du cosmos

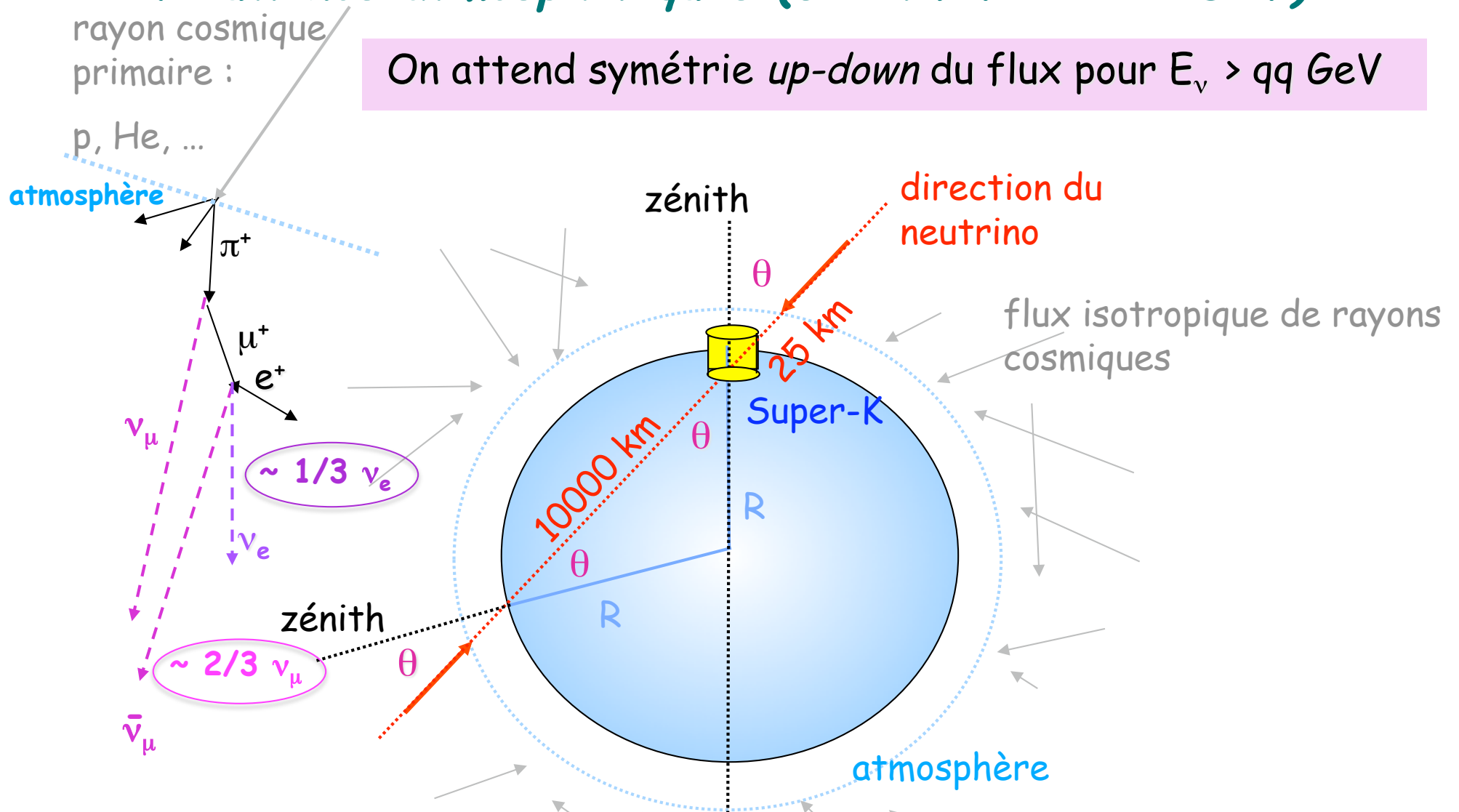


- 4) Les neutrinos atmosphériques présents dans les rayonnements cosmiques

Les sources de neutrinos

Neutrinos atmosphériques (500 MeV → 100 GeV)

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



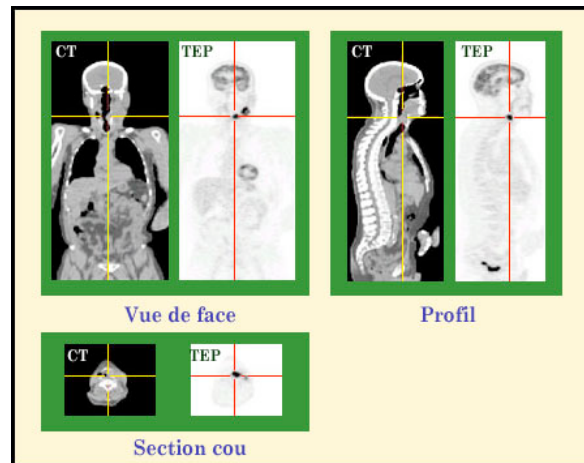
Emission de ν_e et ν_μ avec taux $\nu_\mu / \nu_e \sim 2$ pour $E_\nu < 100$ GeV
Les détecteurs doivent pouvoir distinguer les 2 types de neutrinos

Les sources de neutrinos

Les sources artificielles de neutrinos

Les centrales nucléaires

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



La médecine nucléaire

Une caméra TEP (tomographie à émission de positrons) utilise des sources radioactives β^+ donc émission de ν_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... oui, 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 0.5×10^{-6} protons ou 1000 photons dans 1 cm^3

- **Soleil** : énergie produite par réactions nucléaires (interaction faible) source de ν_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 ν durant 1 seconde.

* **Directement sur Terre**, nous traversant (personne de 60 kg et surface 1 m^2) :

- **radioactivité** naturelle (roches, source de ν_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

- **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 β

1934 : Radioactivité β^+ découverte par I. et F. Joliot-Curie.



1937 : Majorana suggère $\nu = \bar{\nu}$ (voir séminaire Etienne Klein)

1953 : Introduction du nombre leptonique L par Alvarez.

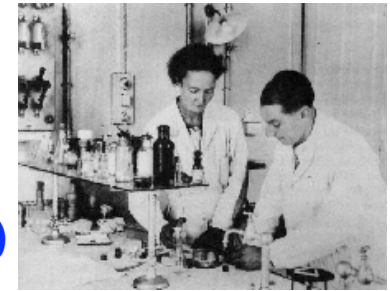
1955 : Violation maximale de parité (miroir) dans les désintégrations β

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



1957 : Pontecorvo suggère l'existence **d'oscillations** 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**.



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

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

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

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 on observe que :

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

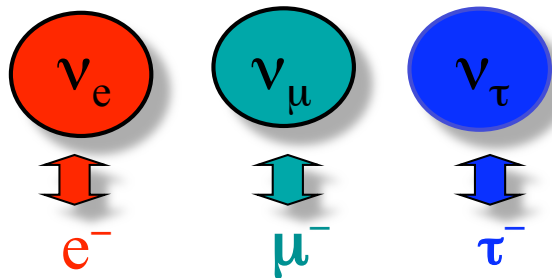
Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

Neutrinos et Modèle Standard

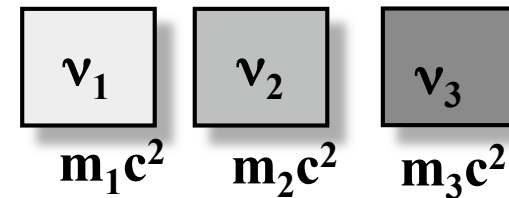
neutrino = fermion élémentaire de la matière, spin 1/2, lepton neutre
3 saveurs pour 3 familles

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 ₂₃

Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

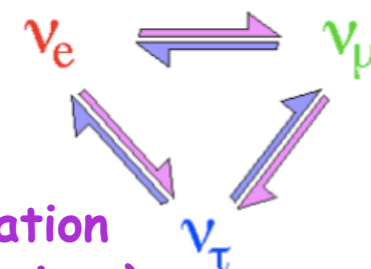
Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

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 états propres de masse (ν_1 , ν_2 et ν_3), mais dans des proportions différentes

Pontecorvo
1957



La mécanique quantique permet de montrer 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 de mélange : $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$
+ 1 phase de violation de CP δ_{CP}

Un peu d'histoire des neutrinos : les découvertes

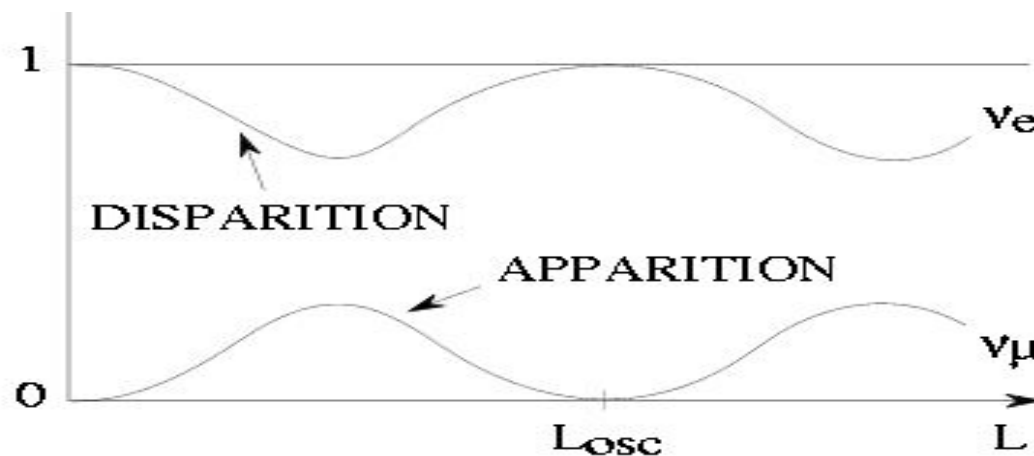
Quelques mots sur les oscillations de neutrinos

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 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 : les 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 $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$.

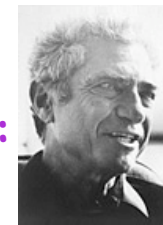
1957 : Goldhaber démontre expérimentalement que le ν est une particule d'hélicité gauche.



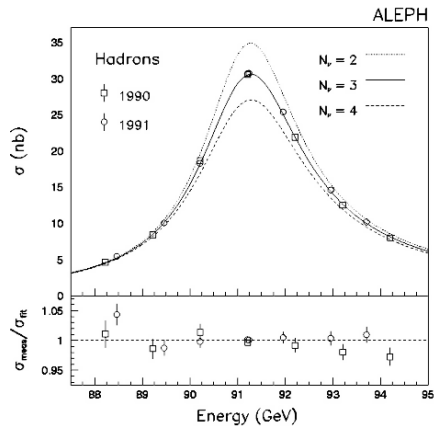
1959 : Davis (prix Nobel 2002) montre expérimentalement que la réaction $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$ est impossible (ce qui confirme la conservation du nombre leptonique L_e).



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



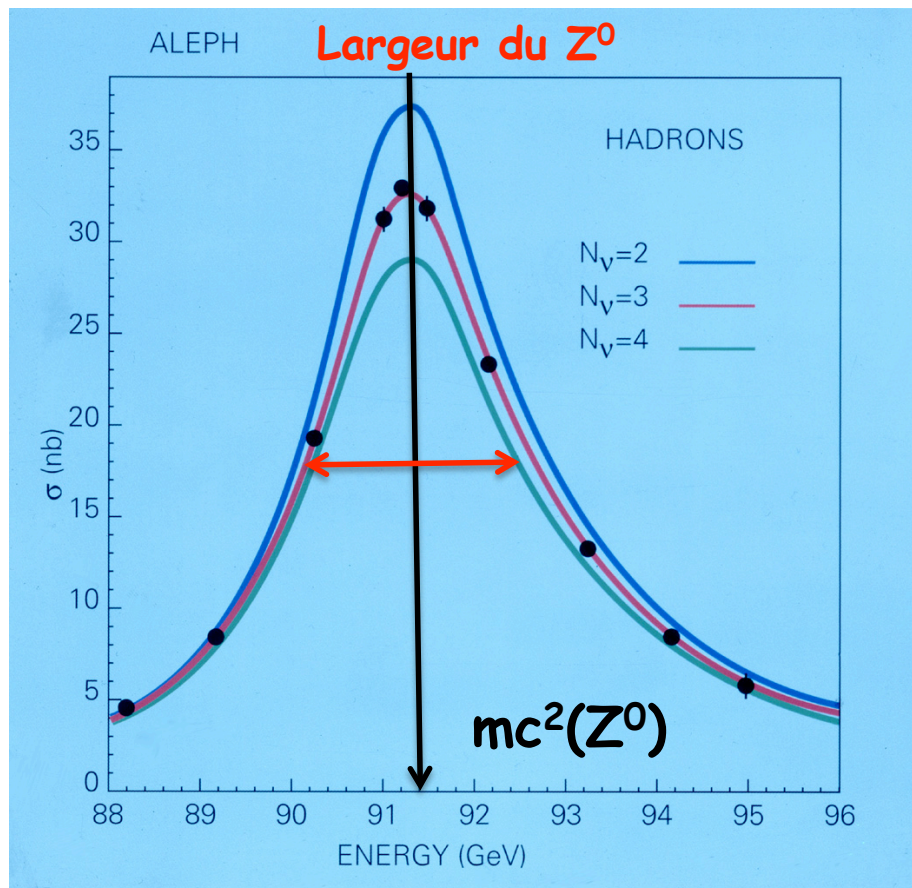
1963 : Maki, Nakagawa et Sakata proposent l'oscillation entre saveurs $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$.

1968 : Premières mesures du flux de ν_\odot par Davis (Homestake) montrent déficit d'1/3 des ν_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

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

1989 : mesure du nombre de saveurs de ν tels que $m_\nu < m_Z/2$ par mesure de la largeur totale Γ_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 ν_e, ν_μ, ν_τ (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 ν_\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 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_e .

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

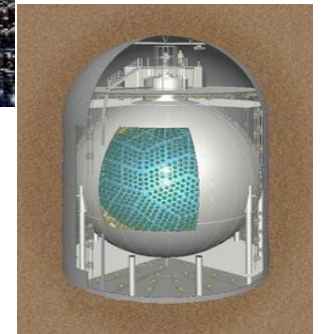
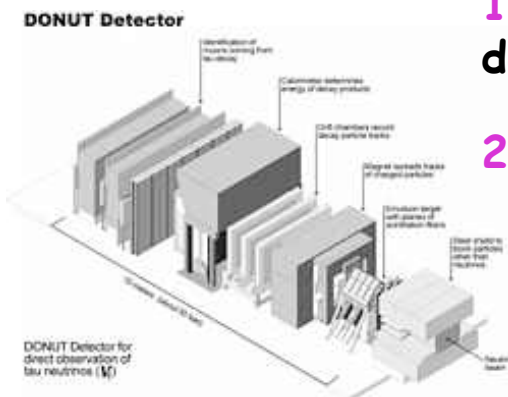
Entre 2002 et 2010 : nombreuses expériences et résultats : ça oscille...

2010 : Apparition de ν_τ dans OPERA (faisceau de ν_μ 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, ... θ_{13} non nul... ouvrant la voie aux recherches sur la violation de CP dans le secteur leptonique

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

1998-2012 : 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

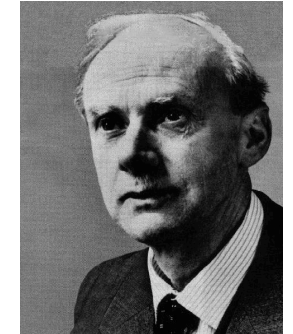
- Quelle est la nature du neutrino ?

→ 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 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, 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

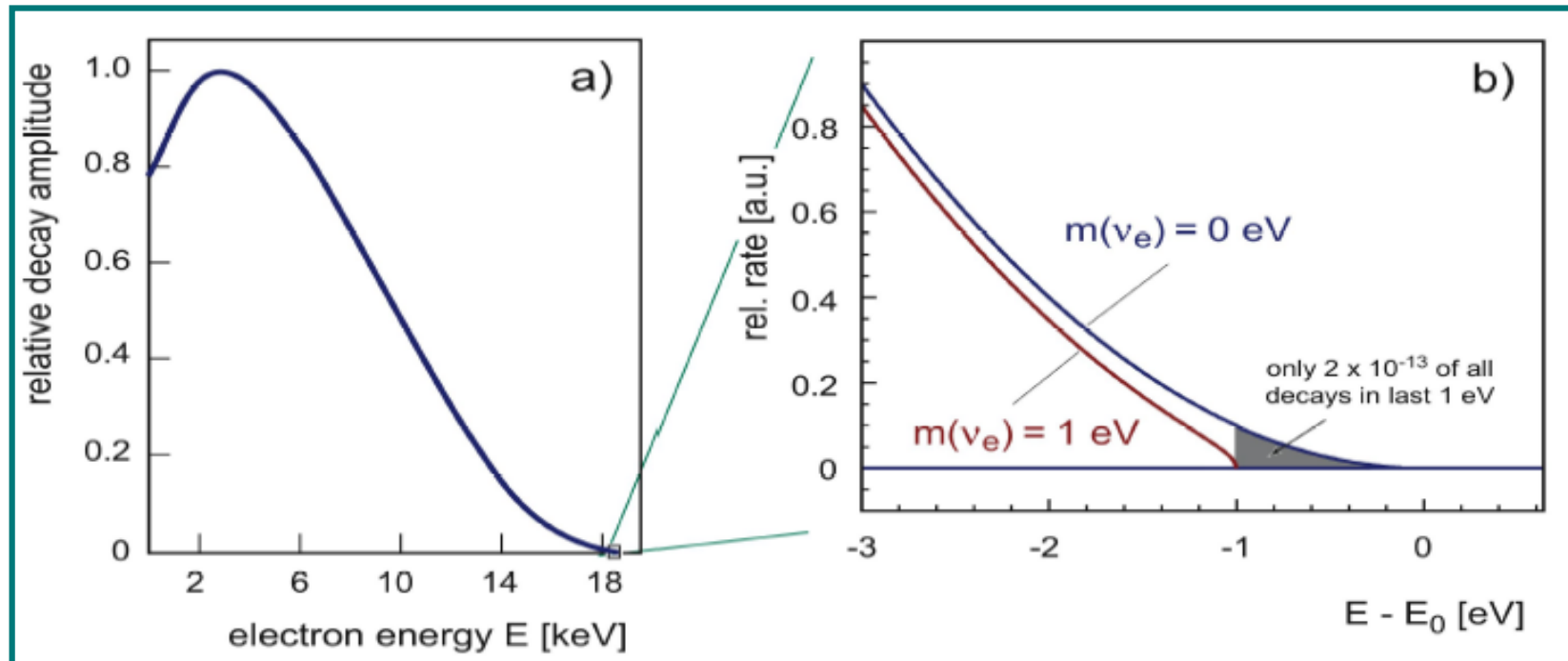
Problème du **bruit de fond radioactif** si énergie du neutrinos jusqu'à quelques MeV

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

Mesures directes

Désintégration bêta du tritium ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$ 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.)
2012 : détecteur KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino) en commissioning pour mesurer $m_{\nu_e}c^2$ avec une sensibilité de 0.2 eV

Cosmologie : densité de matière combinée à WMAP

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

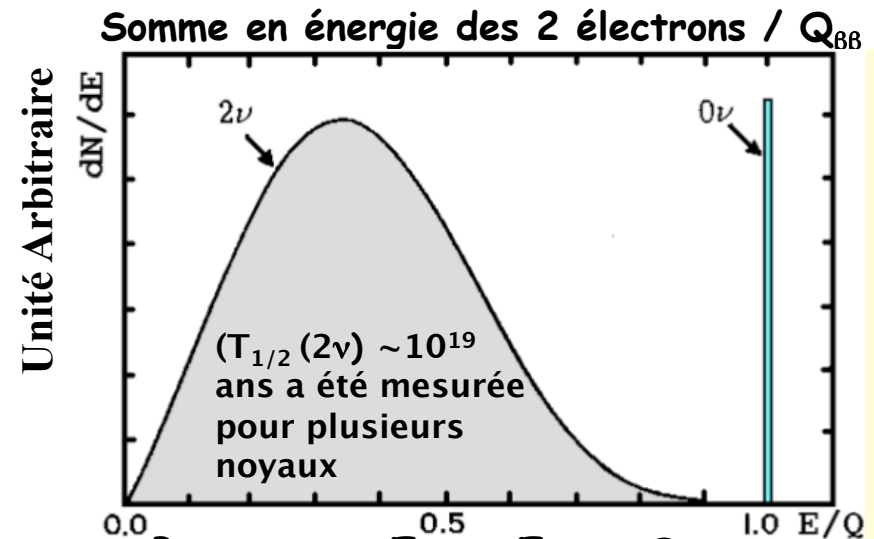
Double désintégration bêta sans émission de neutrinos : si le neutrino est une particule de Majorana massive



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

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

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

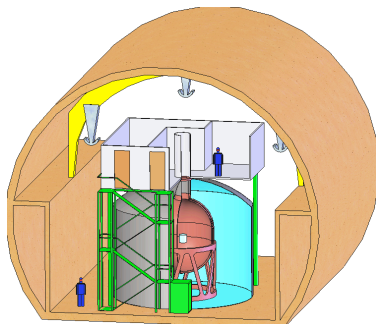
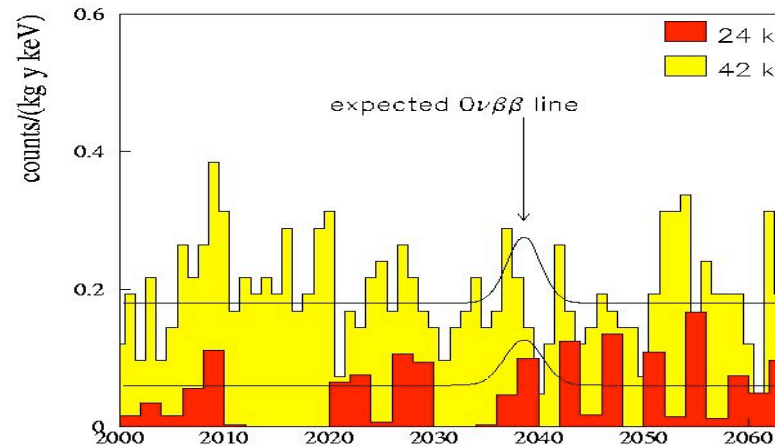
Double désintégration bêta sans émission de neutrinos

Expérience NEMO3

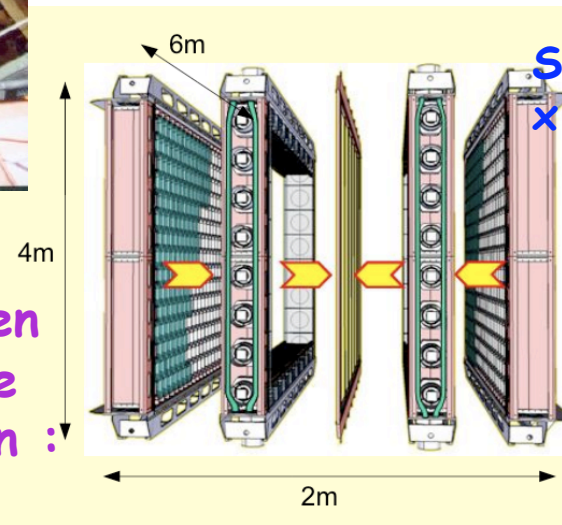
Neutrino Ettore Majorana Observatory
Laboratoire Souterrain de Modane (tunnel
du Fréjus) - finie en 2011



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

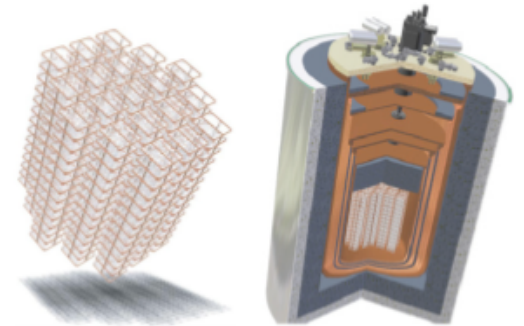


Projets en
cours de
réalisation :



SuperNEMO
x 20

CUORE



Et SNO+, etc...

GERDA

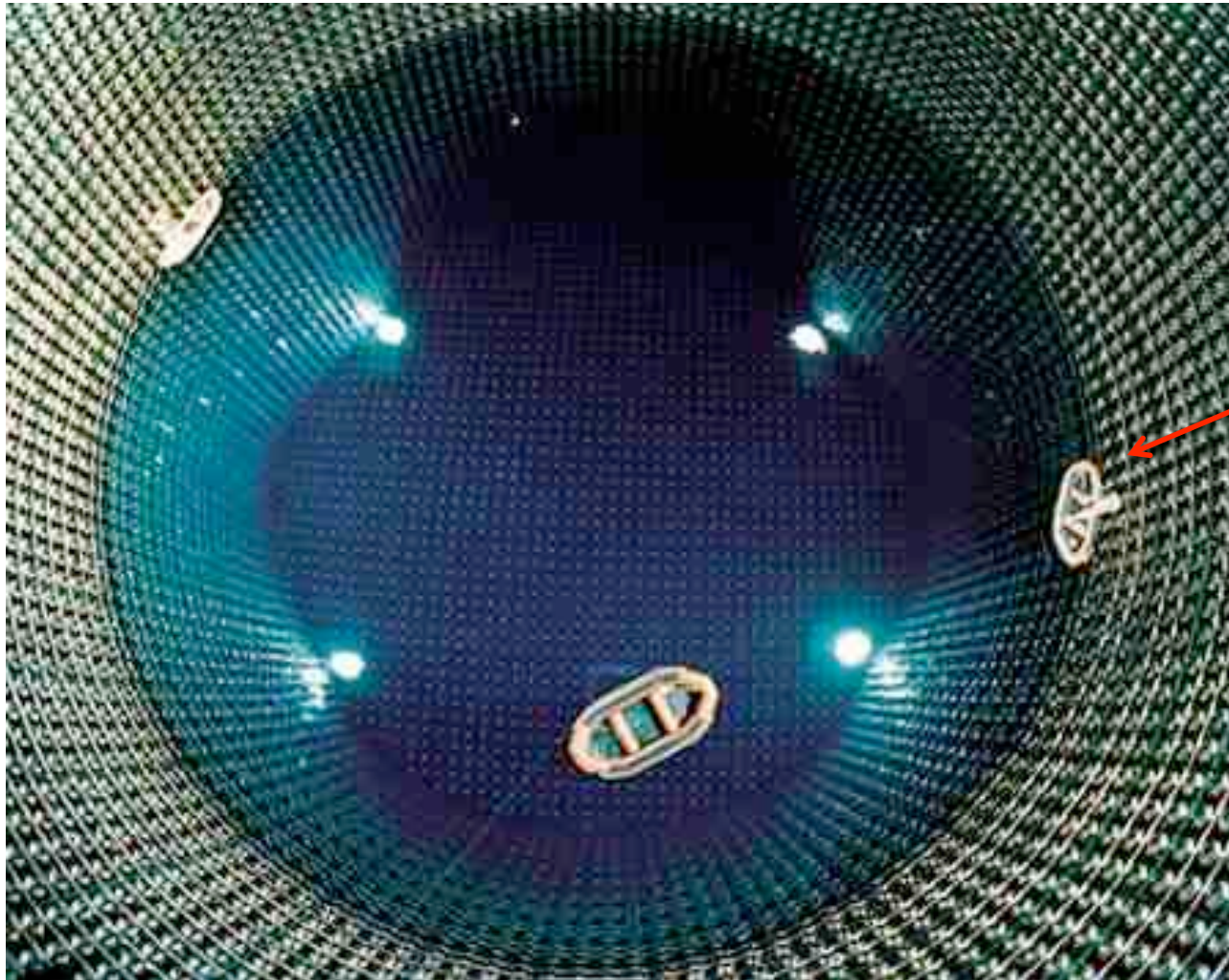
→ vers une masse effective $< 50 \text{ meV}$

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

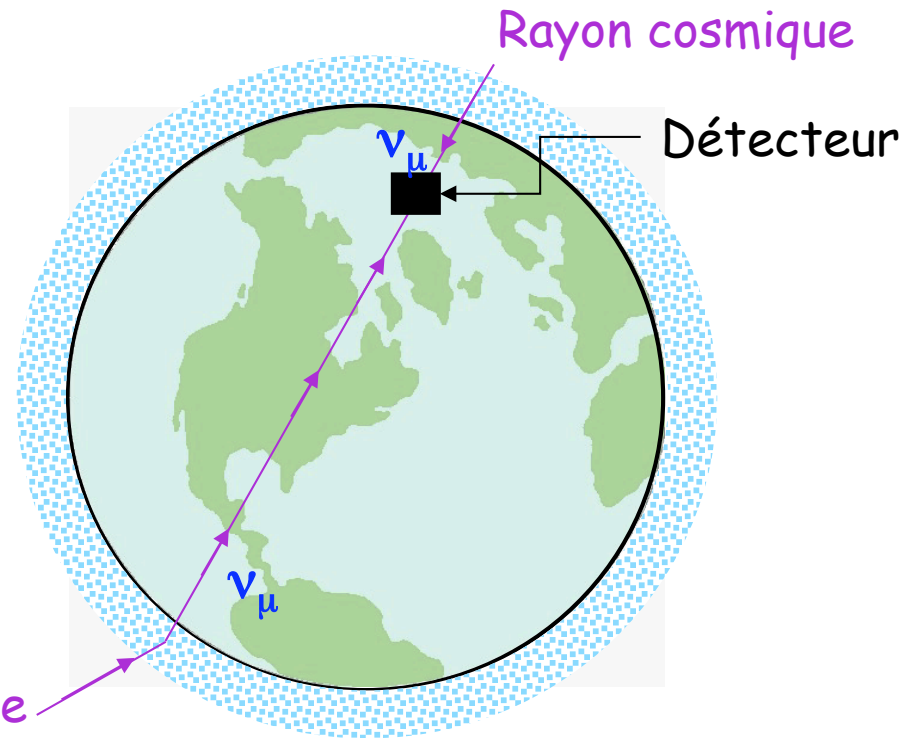
Oscillations de saveur

SK = SuperKamiokande (Japon)

Exemple de résultats sur les neutrinos atmosphériques

Neutrinos e et μ 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 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 $E_\nu > 1.3 \text{ GeV}$

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

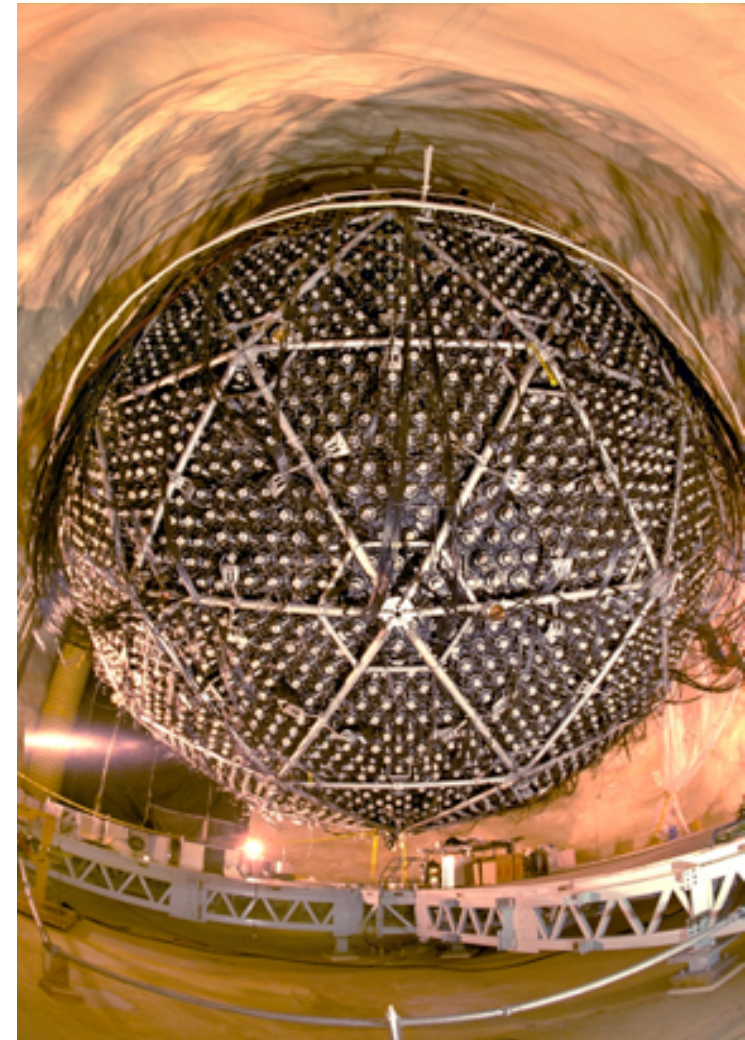
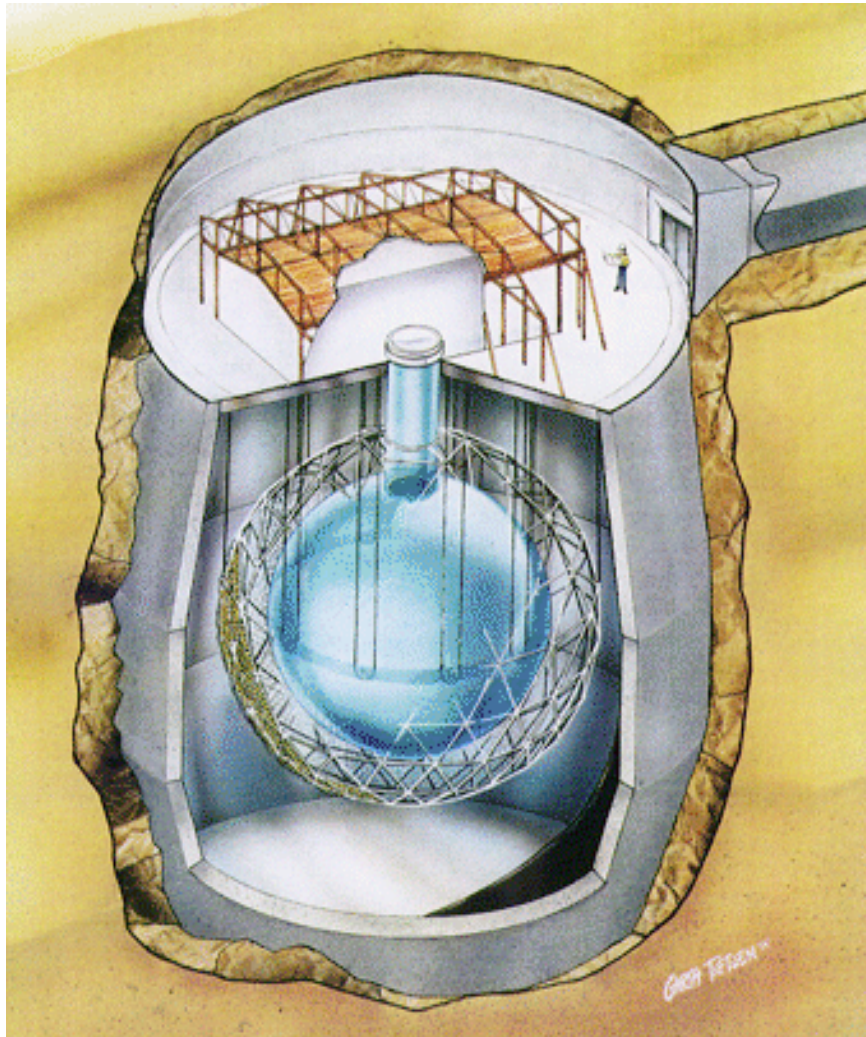
Asymétrie up/down \Rightarrow oscillation des neutrinos μ à travers la Terre

Oscillations de saveur

SNO = Sudbury Neutrino Observatory (Canada)

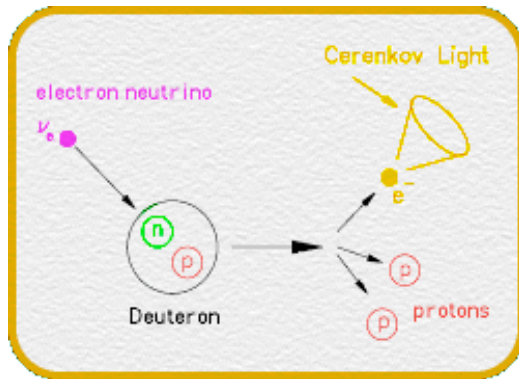
Détection de tous les neutrinos - Etude des neutrinos solaires

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



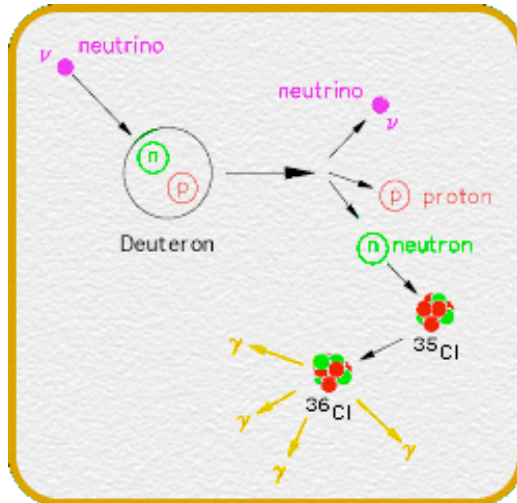
Oscillations de saveur

SNO = Sudbury Neutrino Observatory (Canada)



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

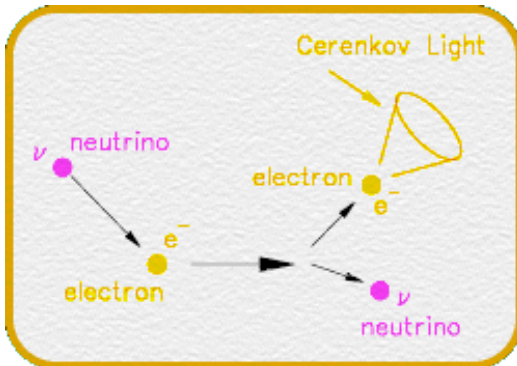
Flux déficitaire en $\nu_e \rightarrow$ Oscillations de ν_e



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)

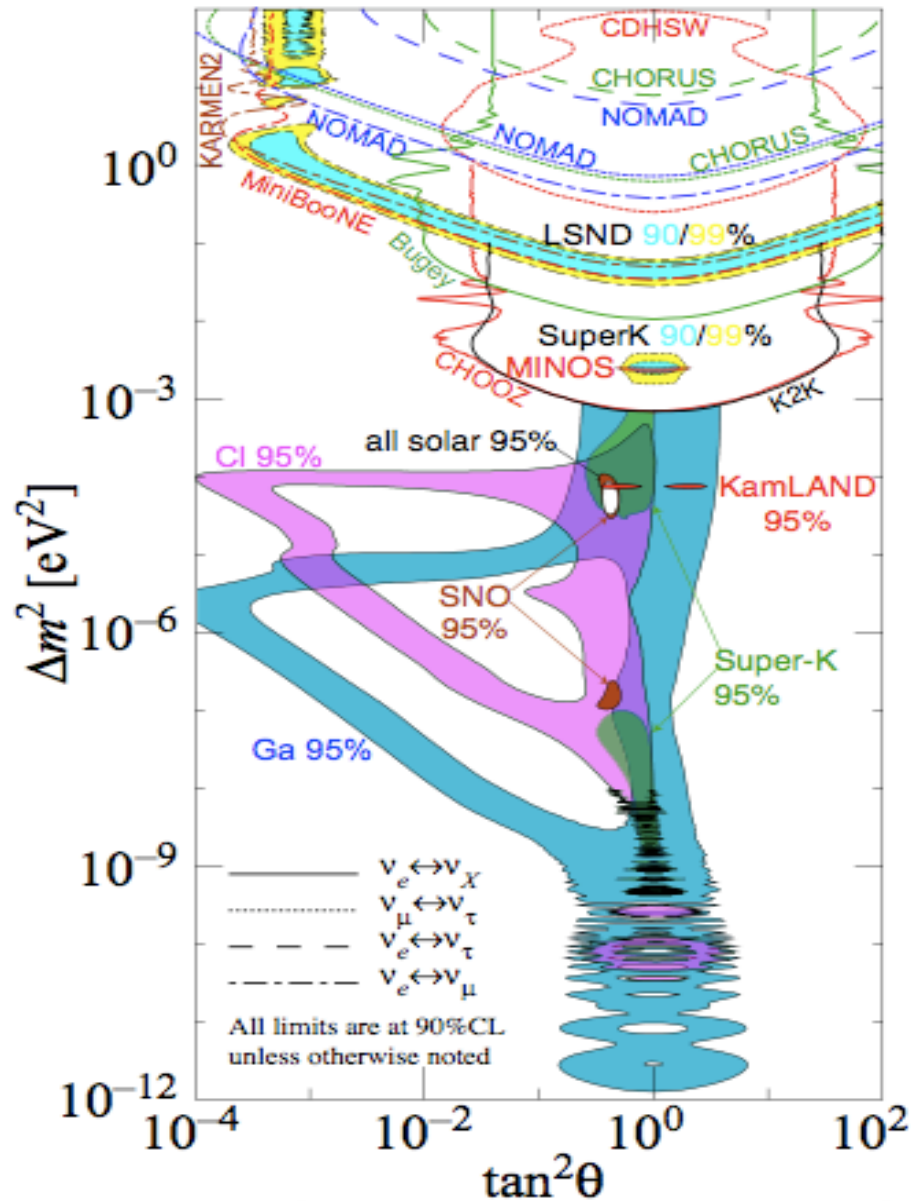


E.S. = diffusion élastique : $\nu_X + e^- \rightarrow \nu_X + e^-$ (sensible aux trois saveurs)

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, réacteurs et accélérateurs : oscillations donc masse !



Toutes les expériences donnent des informations sur :

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

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

et les angles de mélange

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

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

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 ν_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- ν_e** provenant de réacteurs situés à ~ 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 **ν_{μ} et anti- ν_{μ} atmosphériques**
- **K2K** (faisceau de **ν_{μ} 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- ν_{μ})** annoncée par **LSND** en 2001 \rightarrow seulement les 3 neutrinos légers du MS (pas de neutrino stérile)

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

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

Oscillations de saveur

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

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

25^e conférence internationale bisannuelle de physique des neutrinos, Kyoto, Japon, juin 2012. Les nouvelles mesures du troisième angle de mélange de la matrice des neutrinos, θ_{13} , ont tenu la vedette !

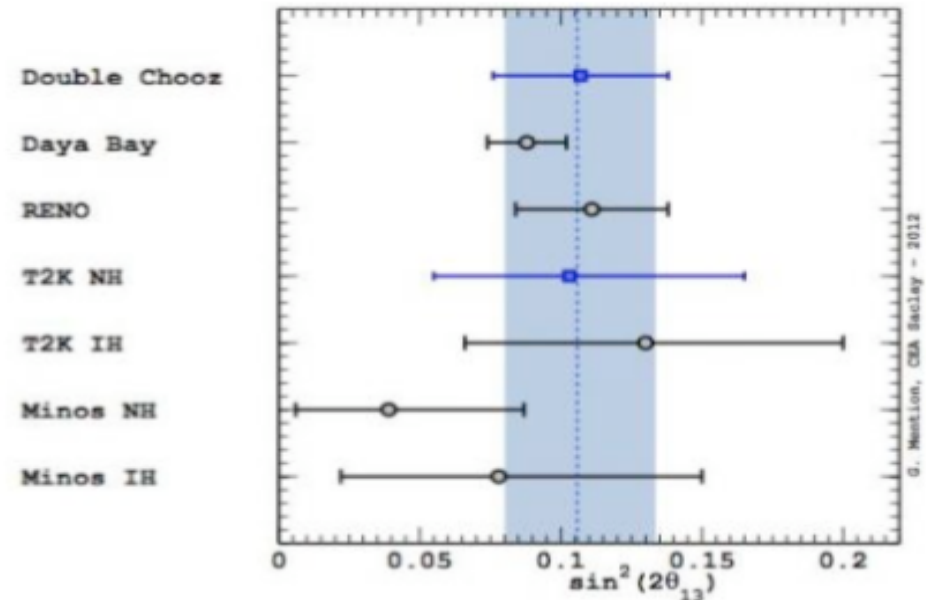
Disparition de $\text{anti-}\nu_e$ de réacteur par **Double Chooz** (228 jours de données accumulées avec $L \sim 1000$ m), **Daya Bay** ($L \sim 1650$ m), et **RENO** ($L \sim 1380$ m) + **T2K** (avec statistique accumulée jusqu'au 15 mai 2012) + **MINOS**

Les résultats combinés donnent $\sin^2(2\theta_{13}) \sim 0.105$ (faible mais $\neq 0$!!!)

→ 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....

θ_{13} ; un angle en haut de l'affiche



Comparaison des derniers résultats de mesure de l'angle de mélange θ_{13} par les expériences auprès de réacteurs (Daya Bay, Double Chooz, RENO) et auprès d'accélérateurs (Minos, T2K). La bande bleue est la combinaison des résultats des expériences de l'Irfu, Double Chooz et T2K.

6- En conclusion sur les neutrinos aujourd'hui

Depuis près de 15 ans, résultats expérimentaux indiquent neutrinos massifs (ν solaires, ν atmosphérique, ν de réacteurs et d'accélérateurs) car 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 U 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 le nombre leptonique global 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://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, et des fichiers cités ci-dessus.

Retour sur les neutrinos supraluminiques d'OPERA....



Les neutrinos mu créés au CERN arrivent en 2,4 millisecondes au détecteur OPERA situé au LNGS, après avoir traversé 731 km de roches. Certains sont détectés comme des neutrinos tau : mesure d'oscillations de neutrinos avec expérience de type apparition.

Septembre 2011 : conférence de presse et publication. Les neutrinos arrivent **60 ns trop tôt** (incertitude de 10 ns) : ils iraient donc plus vite que la lumière... Les physiciens analysent depuis des mois, ne trouvent pas l'erreur, ne comprennent pas, demandent à la communauté scientifique de l'aide et de confirmer ou infirmer leur mesure. **Déferlement médiatique, des blogs partout, tout le monde donne son avis !!! Einstein remis en cause... quelle horreur !!!** Mais OPERA confirme fin 2011 : ils ont toujours ces neutrinos trop rapides

Mars 2012 : **ICARUS**, aussi au LNGS, **ne confirme pas**. OPERA commence à soupçonner 2 effets contradictoires mais attend nouvelles données d'avril et mai 2012.

Juin 2012 : **l'erreur expérimentale a été trouvée** : une connexion défaillante raccourcissait le temps de parcours des neutrinos de 74 ns par rapport à la réalité. Par ailleurs, l'horloge de haute précision utilisée était elle-même légèrement faussée, ajoutant 15 ns au temps de parcours. Combinées, ces deux erreurs donnaient une avance de 59 ns aux neutrinos par rapport aux photons. Trois autres expériences menées en parallèle ont donné le même résultat : **pas de neutrinos supraluminiques ! Le débat est donc clos.**

Conclusions : - Les expériences doivent être faites sans a priori, mais soigneusement vérifiées et confirmées par d'autres
- On trouve tout sur Internet... faites le tri !