

Rencontres d'été de physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit

Comprendre l'infiniment petit : les neutrinos

Mathieu BONGRAND

bongrand@lal.in2p3.fr

un grand merci à Corinne AUGIER pour son aide

LAL Orsay

20/07/2018



Un peu d'histoire du neutrino

Sources de neutrinos et interactions

Oscillations de neutrinos

Nature et masse des neutrinos

Un peu d'histoire du neutrino

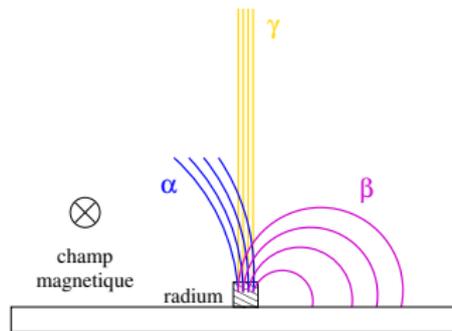
Sources de neutrinos et interactions

Oscillations de neutrinos

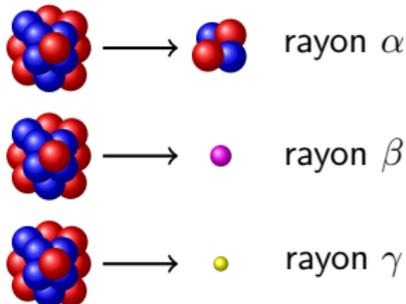
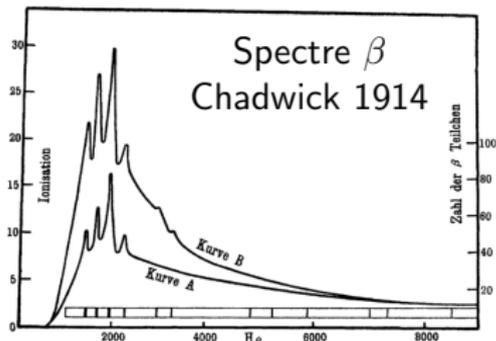
Nature et masse des neutrinos

La radioactivité : besoin d'un neutrino

1896 à 1902 : Becquerel, P. et M. Curie, Rutherford et Villard découvrent la radioactivité et distinguent 3 types de rayonnements : α , β et γ



Les rayons α et γ ont des énergies bien définies mais pas les rayons β



La naissance du neutrino



En 1930 Pauli propose une nouvelle particule pour sauver la conservation de l'énergie dans la désintégration β

4th December, 1930,

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, how because of the "wrong" statistics of the N and Li^6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a **desperate remedy** to save the "exchange theorem" of statistics and **the law of conservation of energy**. Namely, the possibility that there could **exist in the nuclei electrically neutral particles, that I wish to call neutrons, which have spin 1/2 and obey the exclusion principle** and which further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the **same order of magnitude as the electron mass** and in any event not larger than 0.01 proton masses. **The continuous beta spectrum would then become understandable** by the assumption that **in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron** such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant...

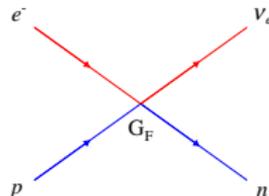
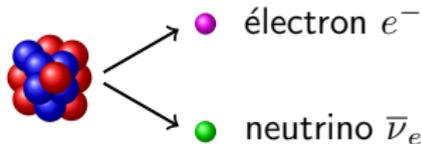
I agree that my remedy could seem **incredible because one should have seen these neutrons much earlier if they really exist**. But only the one who dare can win and the difficult situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is lighted by a remark of my honored predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's well better not to think about this at all, like new taxes". From now on, every solution to the issue must be discussed. Thus, dear radioactive people, look and judge.

Unfortunately, I cannot appear in Tubingen personally since I am indispensable here in Zurich because of a ball on the night of 6/7 December. With my best regards to you, and also to Mr Back.

Your humble servant,

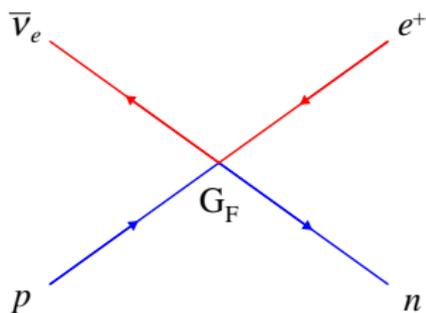
W. Pauli

En 1934 Fermi formule la théorie de la désintégration β avec l'émission de cette hypothétique particule : le neutrino



La réaction de désintégration β inverse

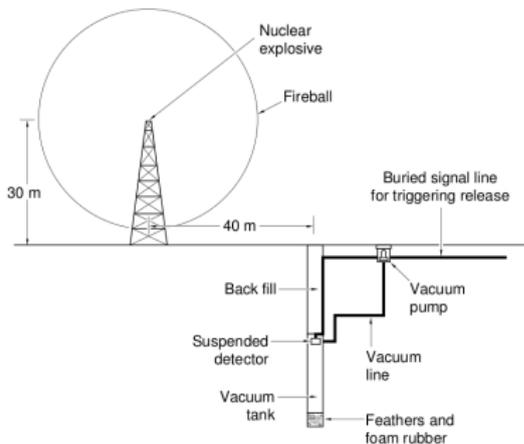
- ▶ Dès 1934 H. Bethe and R. Peierls comprennent que la théorie de Fermi prédit qu'un (anti)-neutrino peut inverser la réaction de désintégration β en interagissant avec un noyau produisant alors un e^+ et un n : $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$



- ▶ Ils prédisent un taux de réaction très faible : $\sigma_{\bar{\nu}p} \simeq 5 \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$ pour des (anti)-neutrinos (pour comparaison $\sigma_{\gamma p} \sim 10^{-25} \text{ cm}^2$)
- ▶ La longueur d'absorption des (anti)-neutrinos dans l'eau est $L = 6 \cdot 10^{14} \text{ km}$!
- ▶ Ils concluent : “...there is no practically possible way of observing the neutrino”

La découverte du neutrino

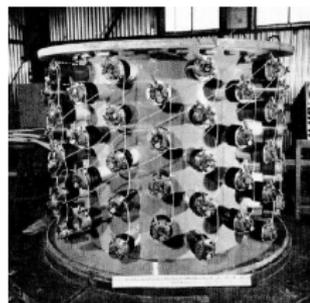
En 1951 Cowan et Reines lancent le projet "poltergeist" à Los Alamos



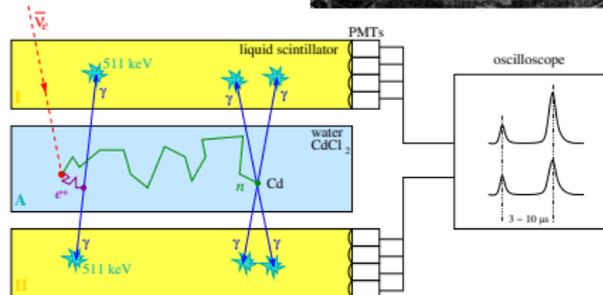
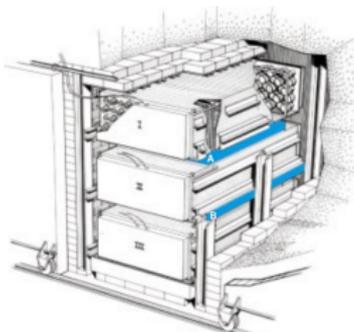
Première idée : détecter les neutrinos émis lors d'une explosion nucléaire



Deuxième idée : auprès d'un réacteur nucléaire. Non concluant en 1953 à Hanford



1956 découverte du neutrino à Savannah River



Composants élémentaires de la matière



| | LEPTONS | QUARKS | BOSONS | |
|--|--|--|---|---|
| 1 ^{re} famille Constituants de la matière usuelle | ν_e neutrino électronique $m \approx 0$ $q = +1.37 \times 10^{-19} \text{C}$ | e électron $m = 9.109 \times 10^{-31} \text{kg}$ $q = -1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ | u haut / up $m = 4.182 \times 10^{-31} \text{kg}$ $q = +2.304 \times 10^{-19} \text{C}$ | d bas / down $m = 4.182 \times 10^{-31} \text{kg}$ $q = -0.331 \times 10^{-19} \text{C}$ |
| 2 ^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille | ν_μ neutrino muon $m \approx 0$ $q = 0$ | μ muon $m = 1.883 \times 10^{-28} \text{kg}$ $q = -1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ | c charm / charm $m = 1.672 \times 10^{-27} \text{kg}$ $q = +1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ | s strange / strange $m = 2.46 \times 10^{-28} \text{kg}$ $q = -0.331 \times 10^{-19} \text{C}$ |
| 3 ^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles | ν_τ neutrino tau $m \approx 0$ $q = 0$ | τ tau $m = 1.777 \times 10^{-27} \text{kg}$ $q = -1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ | t top $m = 1.777 \times 10^{-27} \text{kg}$ $q = +1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ | b bas / beauty / bottom $m = 4.182 \times 10^{-31} \text{kg}$ $q = -0.331 \times 10^{-19} \text{C}$ |

BOSON de HIGGS H

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

Champ de Higgs

propriétés des 3 familles ?
seulement 3 familles ?

SOLEIL 10³⁰ m
GALAXIE 10²¹ m

INTERACTIONS FONDAMENTALES

Interaction faible

Interaction électromagnétique

Gravitation

Chaque interaction fondamentale est transmise par des particules qui lui sont associées

Bosons Z, W[±]

Photon γ

Graviton (?)

pas de charge électrique :
besoin d'un anti-neutrino ?

symétrie matière-antimatière ?

Chaque une des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement de ce qui nous entoure (les galaxies, et en particulier le système solaire) :
- Interaction électromagnétique qui mène à la production de lumière.

ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

Un peu d'histoire du neutrino

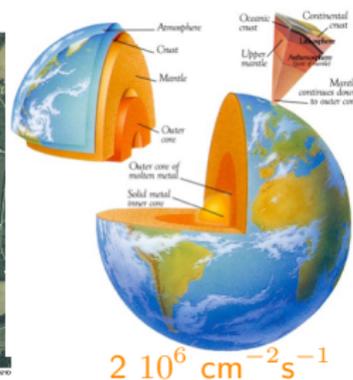
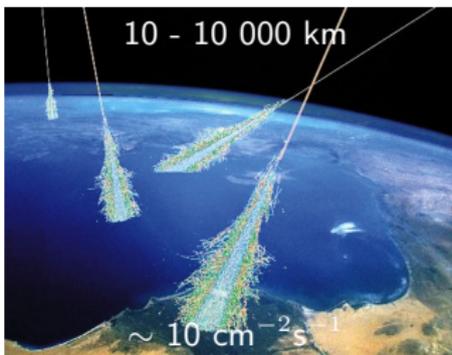
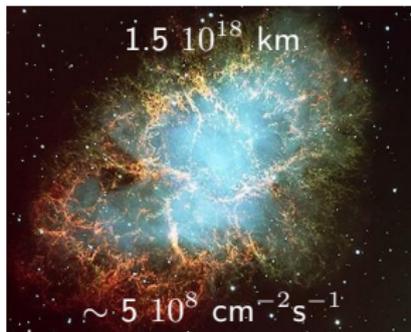
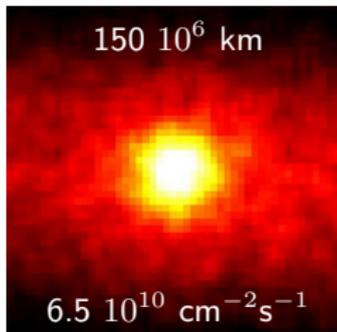
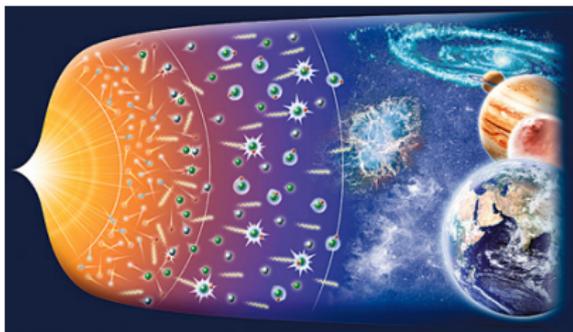
Sources de neutrinos et interactions

Oscillations de neutrinos

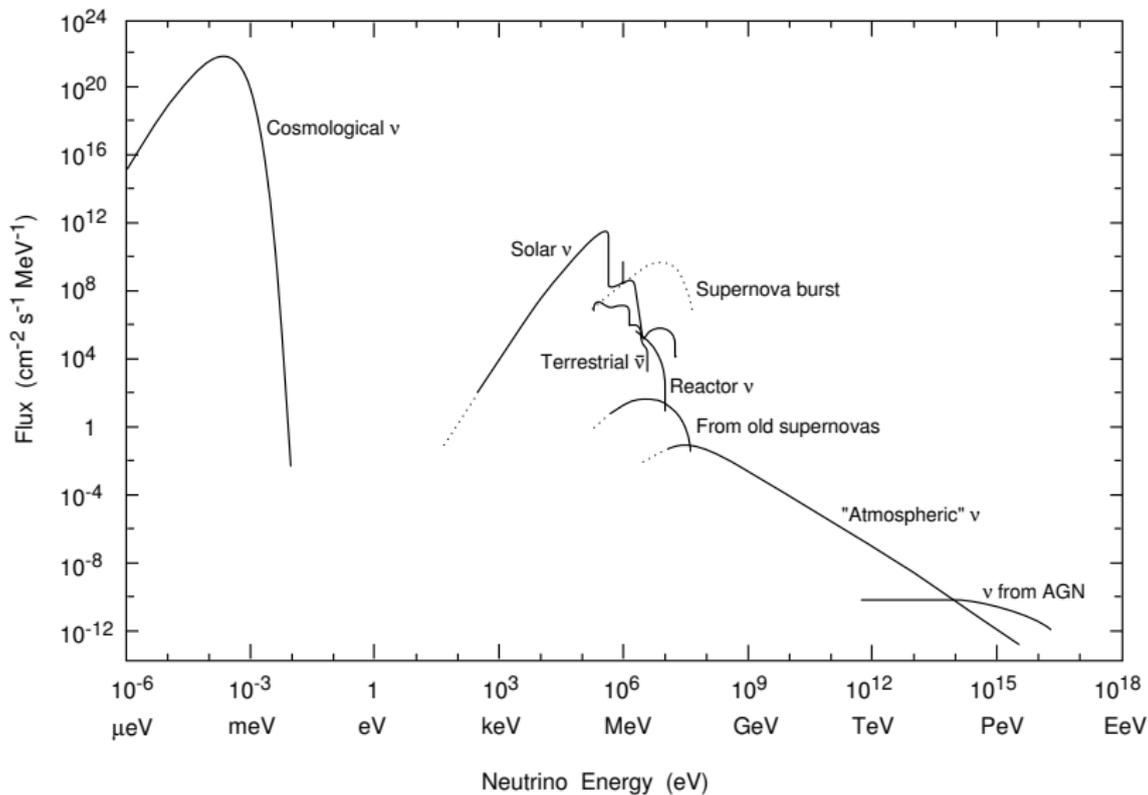
Nature et masse des neutrinos

Sources de neutrinos

Particule de matière la plus abondante dans l'Univers $\sim 330 \nu \text{ cm}^{-3}$
 (neutrinos reliques du Big-Bang) mais extrêmement difficile à détecter



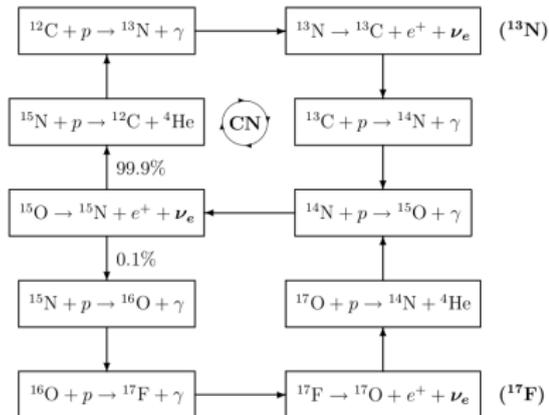
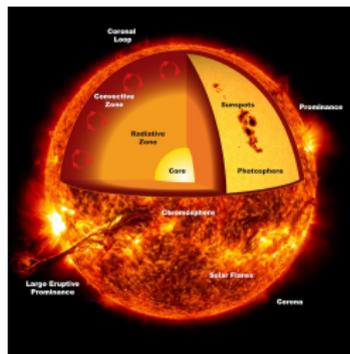
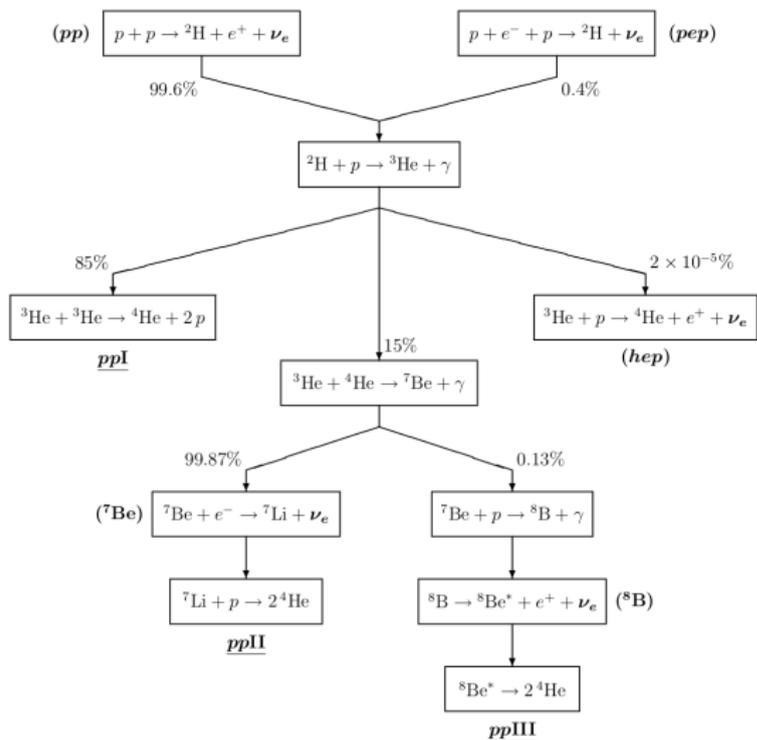
Flux et énergies de neutrino sur Terre



G. Giacomelli & M. Sioli, arXiv:hep-ex/0211035v1, 2002

Production des neutrinos solaires

Neutrinos solaires ν_e produits dans le cœur par la fusion nucléaire au sein des chaînes pp et du cycle CNO



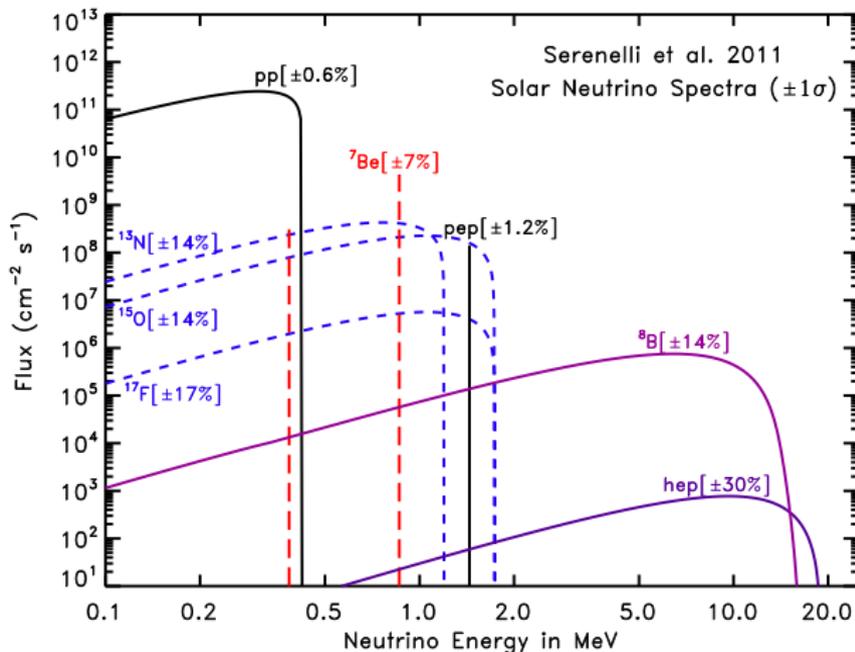
Spectre en énergie des neutrinos solaires



Prédit par J. Bahcall dès les années 1960

Les neutrinos ${}^7\text{Be}$ et *pep* décrivent des raies d'énergie caractéristiques

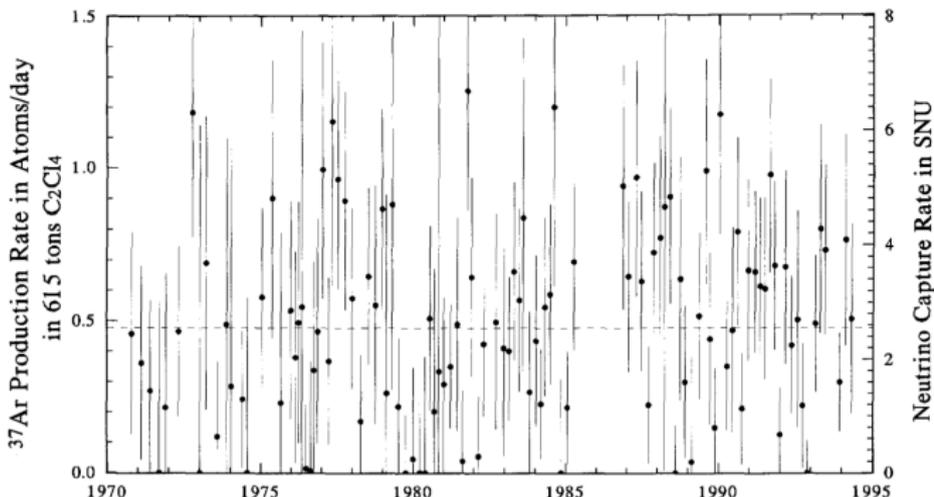
Les neutrinos *pp*, CNO, ${}^8\text{B}$ et *hep* ont des spectres continus



Première détection des neutrinos solaires

R. Davis Jr. construit l'expérience Chlorine dans une mine à Homestake

400 000 L de C_2Cl_4 - prise de données 1970 à 1994

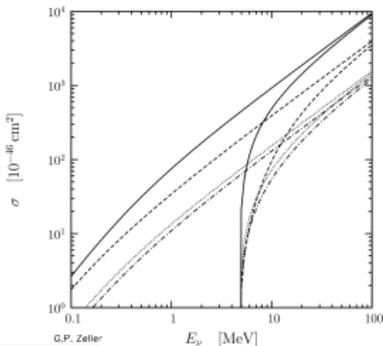
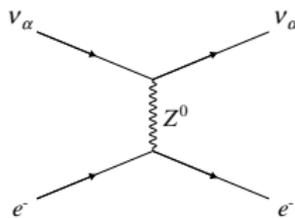
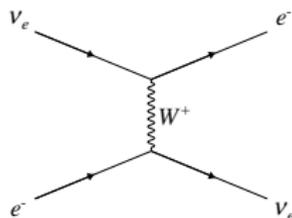
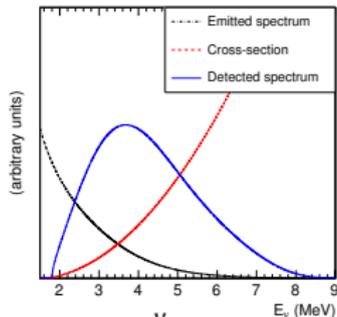
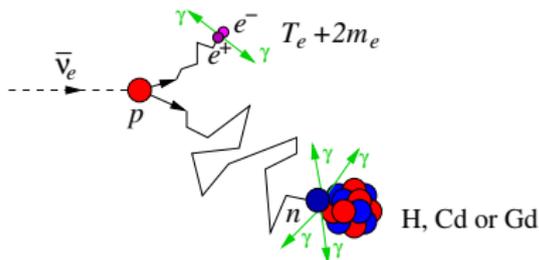


Seulement 1/3 des neutrinos solaires prédits par Bahcall sont détectés !

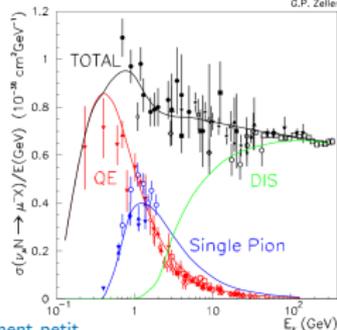
(Solar Neutrino Unit: $1 \text{ SNU} = 10^{-36}$ capture/target atom/s)

Détection des neutrinos

Seulement 3 types de réactions disponibles pour détecter les neutrinos



$$\begin{aligned}
 \text{CC: } & \nu_\alpha N \rightarrow \alpha^- X & \bar{\nu}_\alpha N \rightarrow \alpha^+ X \\
 \text{NC: } & \nu_\alpha N \rightarrow \nu_\alpha X & \bar{\nu}_\alpha N \rightarrow \bar{\nu}_\alpha X \\
 & \alpha = e, \mu, \tau \quad N = p, n \quad X = \text{hadrons}
 \end{aligned}$$



Un peu d'histoire du neutrino

Sources de neutrinos et interactions

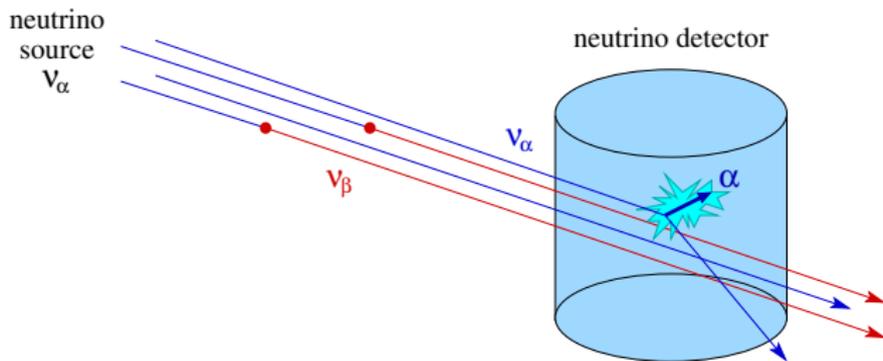
Oscillations de neutrinos

Nature et masse des neutrinos

Mélange des neutrino & oscillations

Les oscillations de saveurs des neutrinos provoquées par un mélange expliquent la disparition des neutrinos solaires (et atmosphériques)

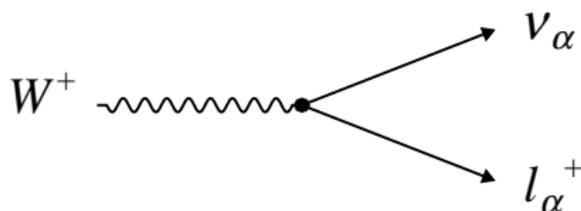
- ▶ les expériences sont souvent sensibles à une seule saveur de neutrinos
- ▶ une autre saveur de neutrino ne sera pas détecté



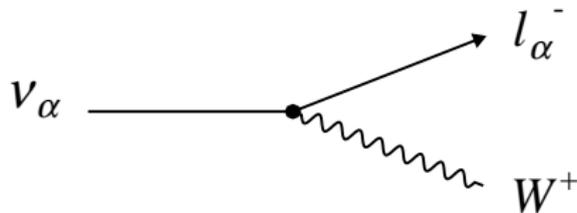
- ▶ Phénomène déjà observé en physique hadronique avec $K^0 - \bar{K}^0$
- ▶ Se produit lorsque les états propres de saveur ne sont pas états propres de masse
- ▶ Les neutrinos doivent donc être des particules massives !
- ▶ Contrairement aux saveurs de leptons chargés les neutrinos de 3 saveurs sont stables (pas de désintégration)

Qu'est-ce que la saveur d'un neutrino

- ▶ Un neutrino est créé avec une saveur α par courant chargé (CC) de l'interaction faible avec un lepton de saveur α :



- ▶ La détection d'un neutrino de saveur α se fait également par interaction CC en produisant un lepton chargé de saveur α :

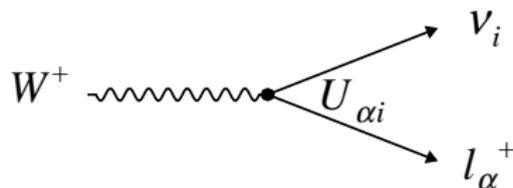


- ▶ On ne peut pas “mesurer” la saveur d'un neutrino
- ▶ C'est la charge du lepton chargé produit qui nous donne la saveur du neutrino au moment de l'interaction

Formalisme du mélange de neutrinos

- ▶ Mélange et oscillations sont décrites par la mécanique quantique
- ▶ Un état propre de saveur du neutrino ν_α est en fait un mélange d'états propres de masse ν_i paramétré par une matrice unitaire U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle$$



- ▶ La propagation des états propres de masse suit l'équation de Schrödinger :

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle$$

- ▶ L'état propre de saveur qu'on veut détecter s'écrit donc :

$$\begin{aligned} |\nu_\alpha(t)\rangle &= \sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle \\ &= \sum_\beta \left(\sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_i t} U_{\beta i}^* \right) |\nu_\beta\rangle \end{aligned}$$

Formalisme de la transition de saveur

- ▶ L'amplitude de la transition $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ est :

$$A_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(t) = \langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle = \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-i E_i t}$$

- ▶ La probabilité de la transition est donnée par :

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(t) = |A_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(t)|^2 = \sum_{j,i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha i}^* U_{\beta i} e^{-i(E_j - E_i)t}$$

- ▶ Neutrinos ultra-relativistes avec des masses très faibles :

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq E + \frac{m_i^2}{2E}$$

- ▶ La différence d'énergie entre 2 états propres de masse devient :

$$E_j - E_i \simeq \frac{\Delta m_{ji}^2}{2E} \quad \text{where} \quad \Delta m_{ji}^2 = m_j^2 - m_i^2$$

- ▶ Neutrinos se propageant pratiquement à la vitesse de la lumière :

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) \simeq \sum_{j,i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha i}^* U_{\beta i} \exp\left(-i \frac{\Delta m_{ji}^2 L}{2E}\right)$$

Mélange de neutrinos à 2 saveurs

- ▶ Les 2 Δm_{ji}^2 des neutrinos sont très différents
- ▶ Une expérience a généralement $\langle E_\nu \rangle$ et L fixés
- ▶ La plupart des expériences sont donc sensible à un mélange de 2 saveurs uniquement
- ▶ Il n'y a plus que 2 paramètres pour décrire les oscillations :
 - ▶ différence de masse : $\Delta m^2 = \Delta m_{ji}^2 = m_j^2 - m_i^2$
 - ▶ angle de mélange : $\theta \in [0, \pi/2]$

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_j \end{pmatrix}$$

- ▶ La probabilité de transition $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ ($\alpha \neq \beta$) est alors :

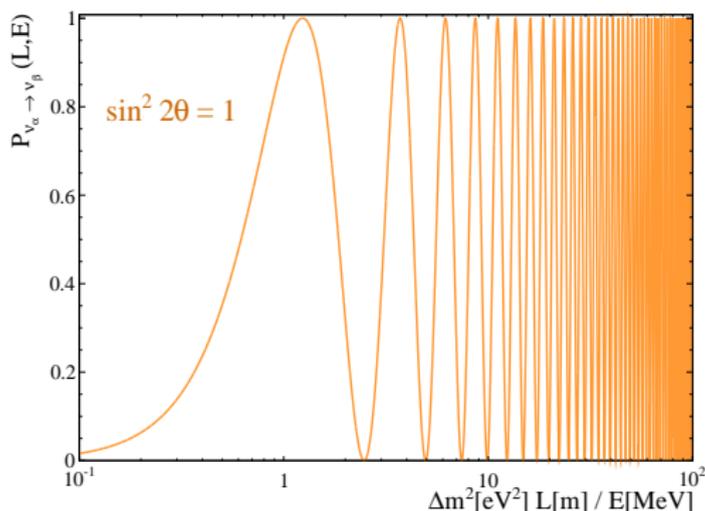
$$\begin{aligned} P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left[1 - \cos \left(\frac{\Delta m^2 L}{2E} \right) \right] \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right) \end{aligned}$$

- ▶ La probabilité de survie de la saveur ν_α est : $1 - P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E)$

Probabilité d'oscillation à 2 saveurs

- Pour les expériences on peut utiliser :

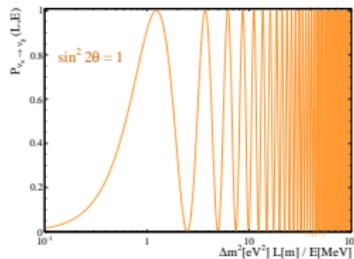
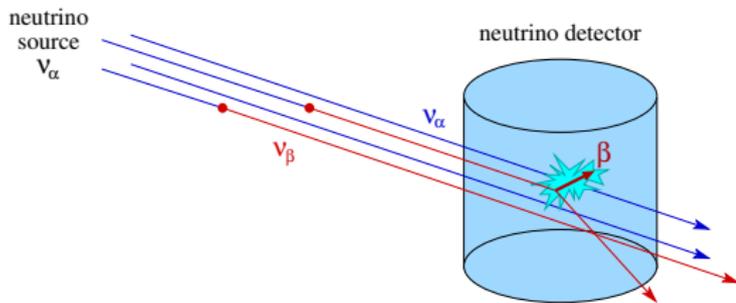
$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [eV^2] L [m]}{E [MeV]} \right)$$



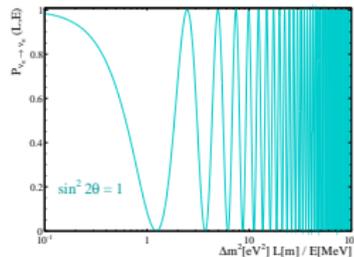
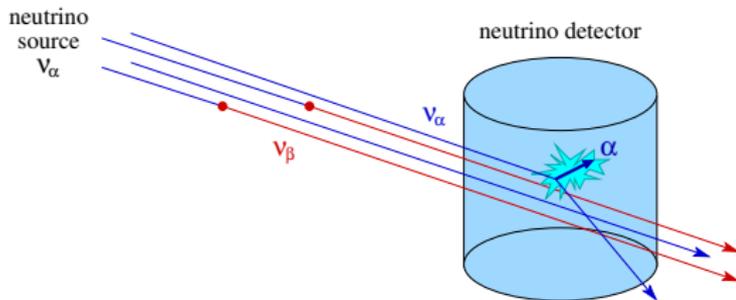
- L'amplitude des pics donne θ
- La position des pics donne $|\Delta m^2|$
- Impossible de déterminer la valeur des masses m_i

Expériences d'oscillation de neutrinos

► Expérience d'apparition $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E)$



► Expérience de disparition $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha}(L, E)$



Mélange à 3 saveurs de neutrino

3×3 matrice de mélange *PMNS* (Pontecorvo, Maki, Nakagawa & Sakata)
(similar to *CKM* mixing matrix for quarks):

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - s_{13}c_{12}s_{23}e^{+i\delta} & c_{23}c_{12} - s_{13}s_{12}s_{23}e^{+i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - s_{13}c_{12}c_{23}e^{+i\delta} & -s_{23}c_{12} - s_{13}s_{12}c_{23}e^{+i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij} \text{ and } c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

Paramètres du mélange à 3 saveurs :

- ▶ 2 différences de masse : Δm_{32}^2 , Δm_{21}^2
- ▶ 3 angles de mélange : θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}
- ▶ 1 phase de violation de CP : δ
- ▶ 2 phases de Majorana : η_1 , η_2 ?

Possible de factoriser la matrice :

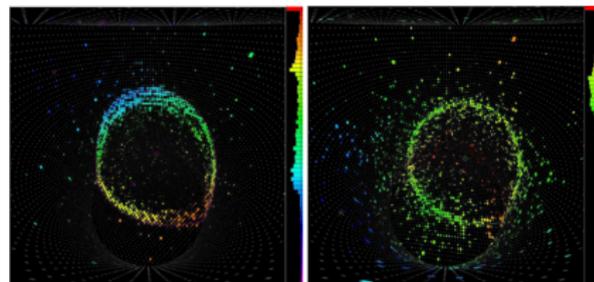
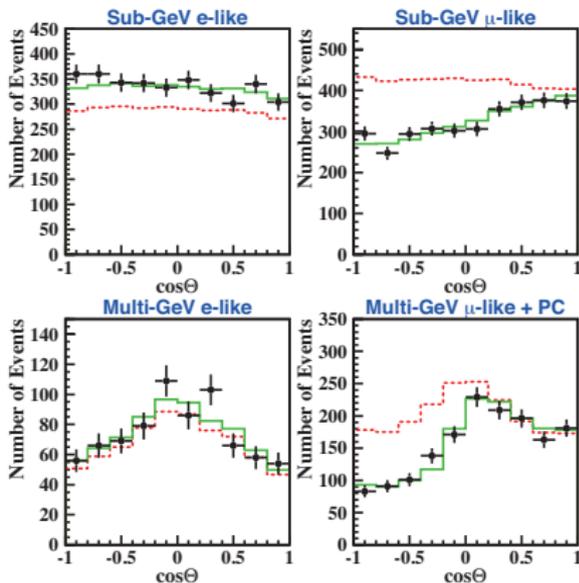
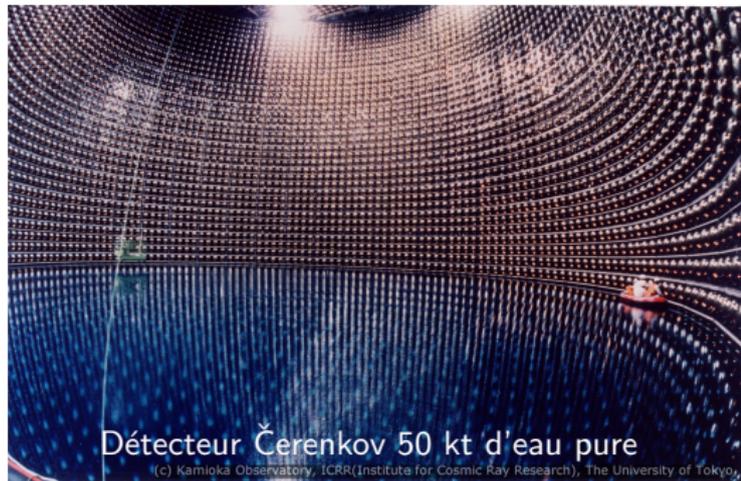
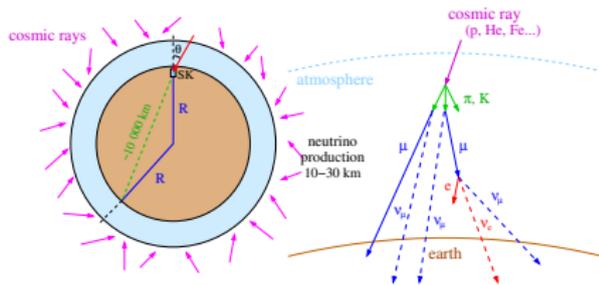
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & & s_{13}e^{-i\delta} \\ & 1 & \\ -s_{13}e^{i\delta} & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & \\ -s_{12} & c_{12} & \\ & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

atmospheric

reactor/accelerator

solar

SuperKamiokande



Les neutrinos ν_μ semblent disparaître en traversant la Terre mais pas les ν_e

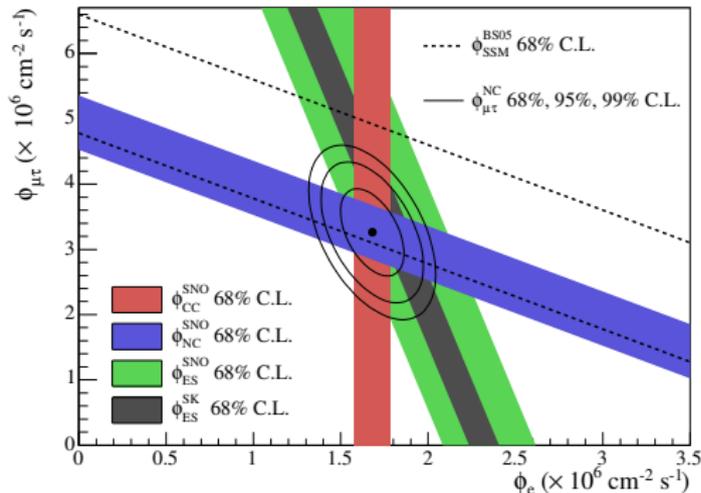
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

L'utilisation de 1 kt d'eau lourde D_2O permet 3 réactions en fonction de la saveur :

$$\text{CC: } \nu_e d \rightarrow p p e^- \quad E_\nu > 1.4 \text{ MeV}$$

$$\text{NC: } \nu_\alpha d \rightarrow p n \nu_\alpha \quad E_\nu > 2.2 \text{ MeV}$$

$$\text{ES: } \nu_\alpha e^- \rightarrow e^- \nu_\alpha \quad E_\nu > 5.5 \text{ MeV}$$

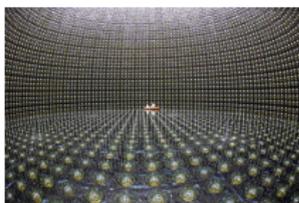
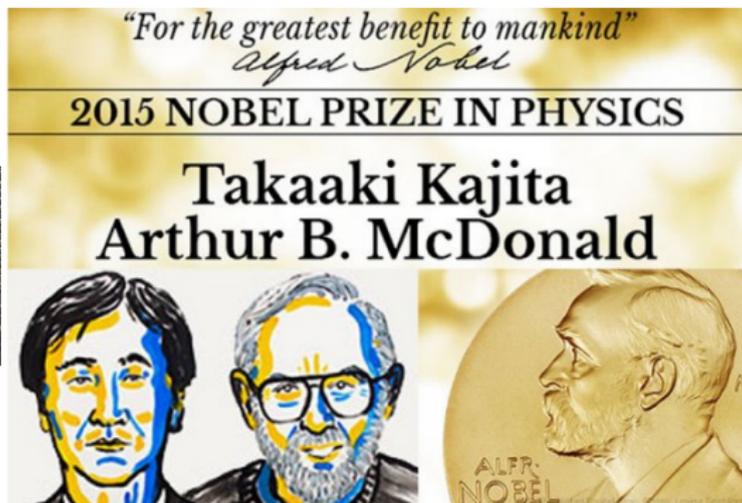


Le problème des neutrinos solaires est dû aux oscillations

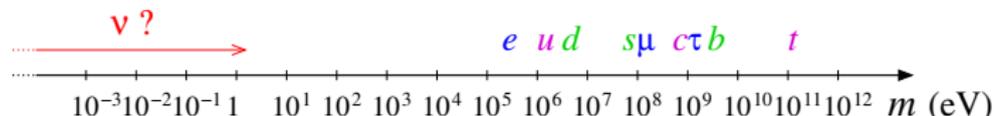
$$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu\tau}$$

Prix Nobel pour la découverte des oscillations de neutrinos

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass".



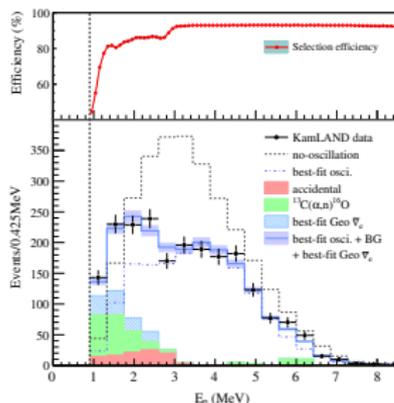
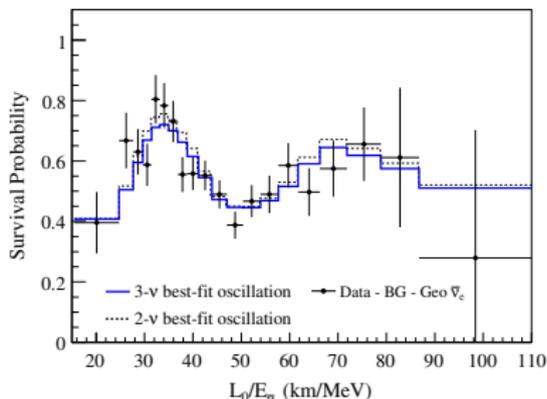
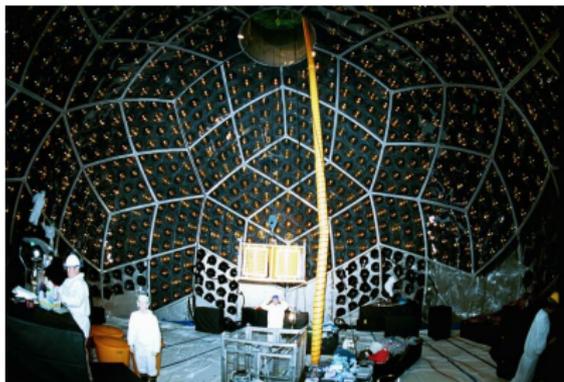
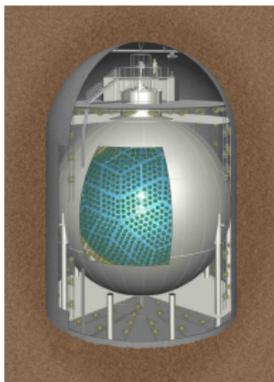
Mais pourquoi les masses des neutrinos sont si faibles ?



Paramètres solaires avec des neutrinos de réacteur

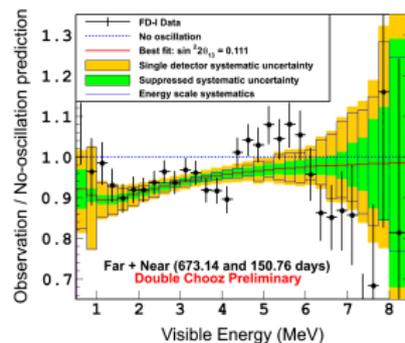
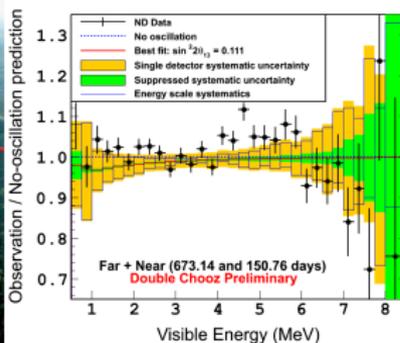
KamLAND étudie les neutrinos de tous les réacteurs Japonais (80-800 km)

Les paramètres L/E permettent l'étude du secteur solaire $\langle E_\nu \rangle \sim 3$ MeV



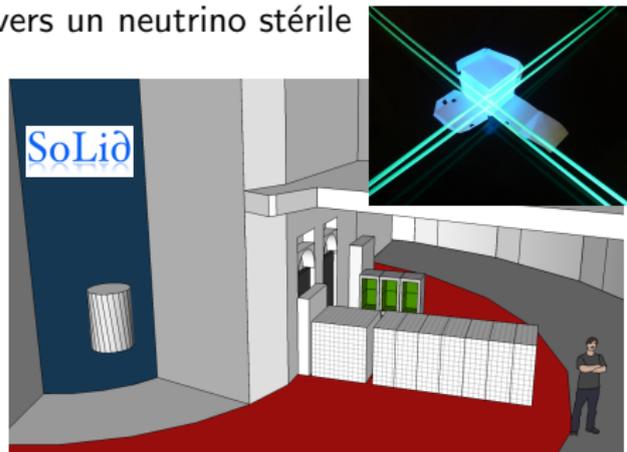
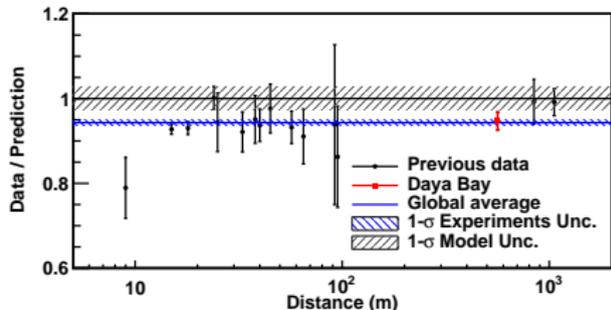
Neutrinos de réacteurs

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right)$$



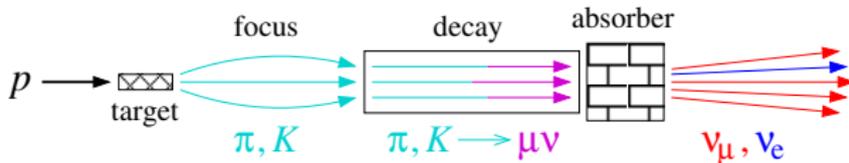
La prédiction du flux de neutrinos est plus faible que toutes les observations

Pourrait être dû à une oscillation vers un neutrino stérile

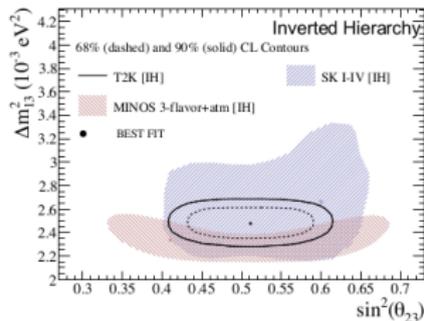
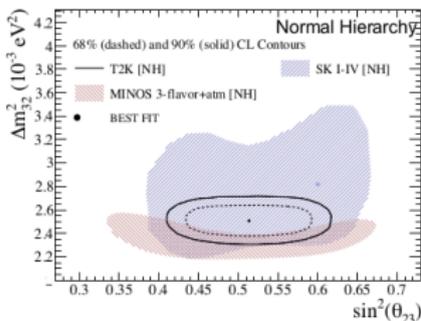
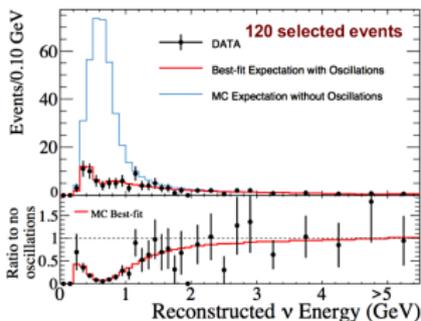


Neutrinos atmosphériques / faisceaux

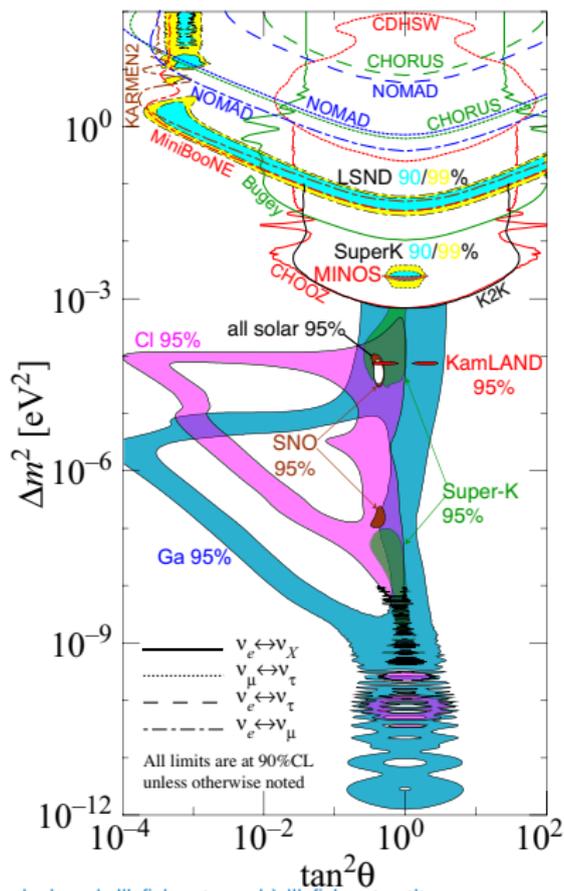
D'abord les neutrinos atmosphériques étudiés comme dans SuperK
 Maintenant étudiés à partir de faisceaux produits par des accélérateurs



Avec 2 détecteurs proche et lointain : MINOS (on-axis), T2K (off-axis), No ν a...

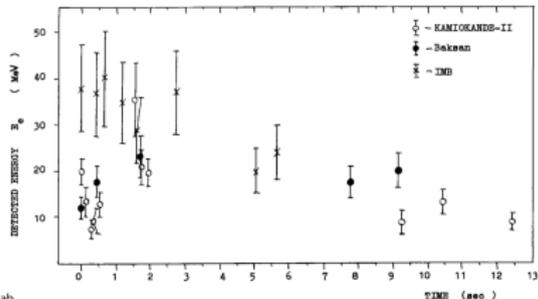


Tous les résultats de mesures d'oscillations (2011)

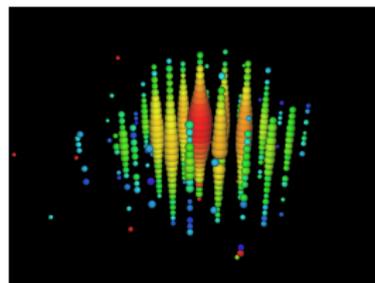
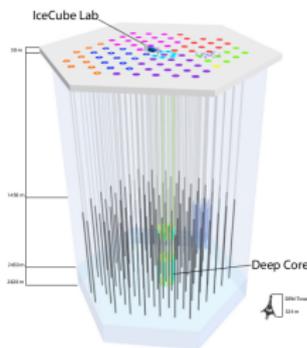
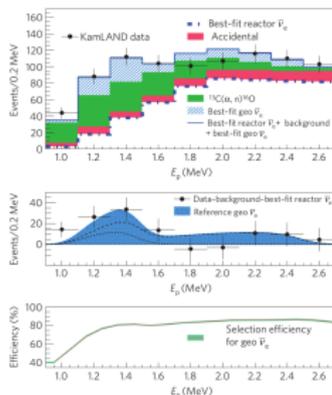
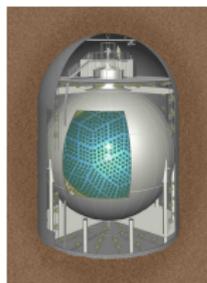


Detections extra-ordinaires

SN 1987A produit $\sim 10^{58}$ neutrinos
 (90 % de l'énergie de l'explosion)
 25 détectés par 3 expériences



Chaleur de la Terre due à la
 radioactivité naturelle ~ 50 TW
 KamLand détecte ~ 110 geo-neutrinos



IceCube a observé 3 événements
 avec $E_\nu > 1$ PeV (10^{15} eV)

Un peu d'histoire du neutrino

Sources de neutrinos et interactions

Oscillations de neutrinos

Nature et masse des neutrinos

La nature des neutrinos

Puisque le neutrino n'a pas de charge électrique il pourrait être identique à son antiparticule $\nu = \bar{\nu}$
1937 - Majorana

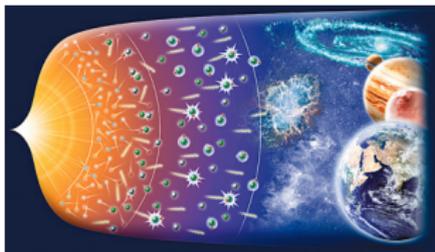


Le nombre leptonique L n'est plus conservé
la masse du neutrino peut alors provenir d'une nouvelle physique au delà du Modèle Standard

Dans le mécanisme de la balançoire le neutrino gauche (celui que l'on connaît) est très léger et le neutrino droit (qui est stérile et qu'on n'a jamais observé) est très lourd
→ expliquerait pourquoi les neutrinos sont si légers

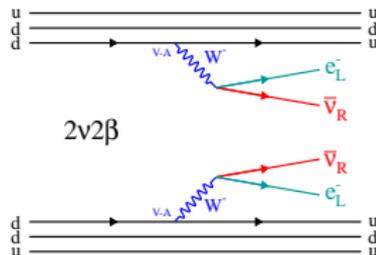
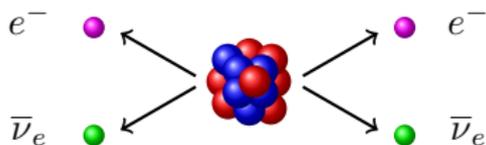


Ces neutrinos droits produits juste après le Big-Bang auraient favorisé les leptons sur les anti-leptons
→ expliquerait pourquoi l'antimatière a disparu
c'est la leptogénèse

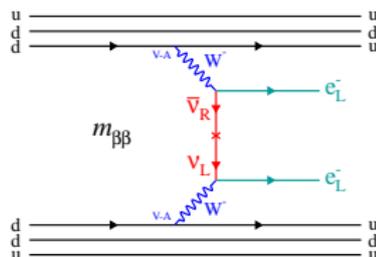
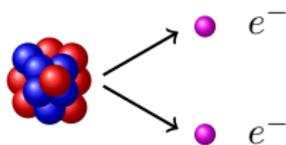


La double désintégration bêta

1935 - Goeppert-Mayer a l'idée d'une radioactivité extrêmement rare :
la double désintégration bêta $2\beta 2\nu$



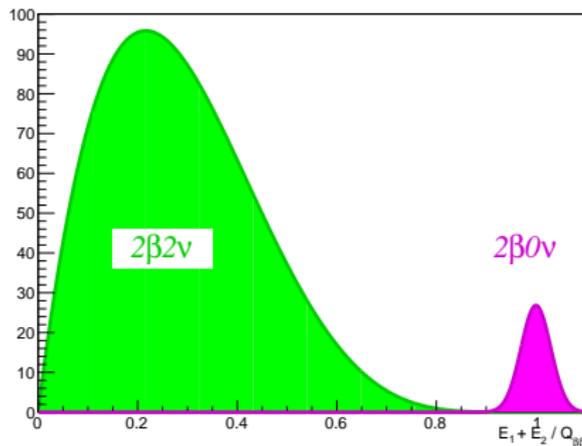
1939 - A partir de la théorie de Majorana, Furry pense aussi à la double
désintégration bêta sans émission de neutrinos $2\beta 0\nu$



La $2\beta 0\nu$ doit être encore plus rare car la masse du neutrino est très faible

La double désintégration bêta $2\beta 0\nu$

L'observation de cette désintégration prouverait que le neutrino est une particule de Majorana avec toutes les conséquences présentées plus haut



- ▶ 1948 première expérience par Fireman
- ▶ 1950 première mesure de la $2\beta 2\nu$ par Inghram et Reynolds
- ▶ 1987 première mesure de la $2\beta 2\nu$ avec détection des 2 électrons par Elliott, Hahn, et Moe

Techniques expérimentales

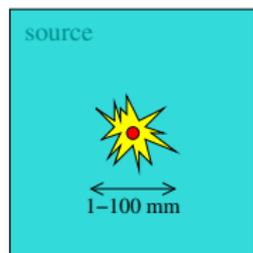
Processus de désintégration $2\beta 2\nu$ est le plus rare mesuré ($T_{1/2}^{2\nu} \sim 10^{20}$ ans)
La sensibilité à la recherche de la $2\beta 0\nu$ est donnée par :

$$T_{1/2}^{0\nu} > \frac{\ln 2 N_A \epsilon_{0\nu}}{1.64 A} \sqrt{\frac{m t}{N_{bkg} r}} \quad (\text{si bdf gaussien})$$

Une dizaine d'isotope étudiés : ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd sur la cinquantaine possible

2 techniques principales avec sources actives ou passives :

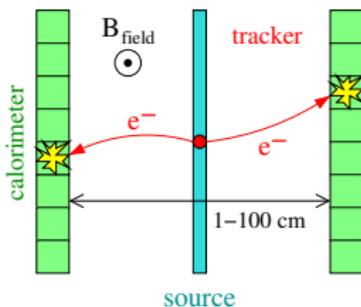
Calorimeters



semiconductors,
bolometers,
scintillators, TPC...

- efficiency: ~90%
- energy resolution
few keV (FWHM)
- no tracking
- poor background
rejection
- isotope dependent

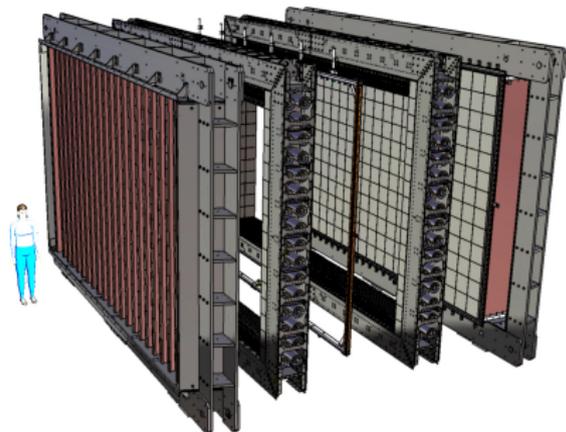
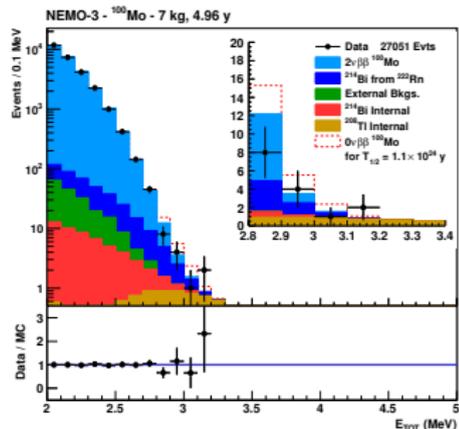
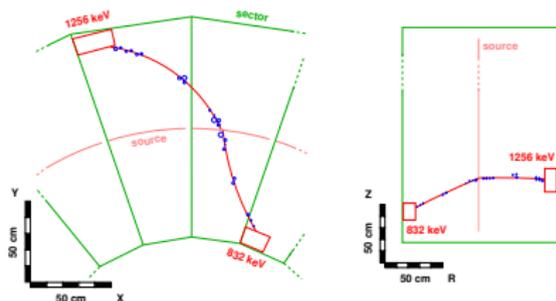
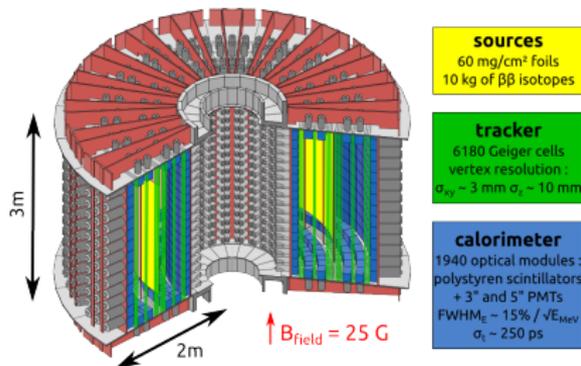
Tracko-calos



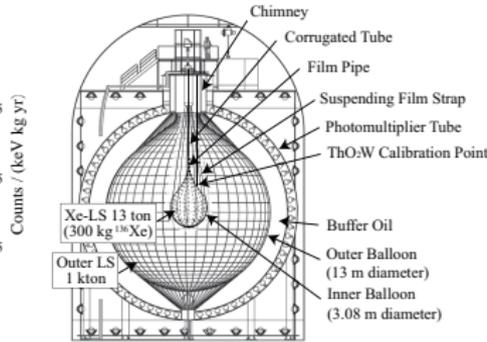
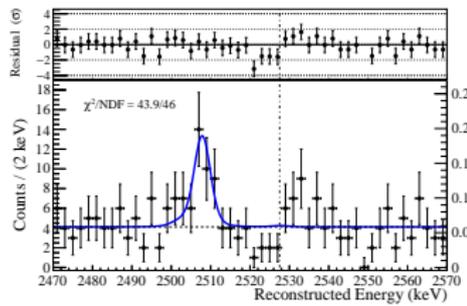
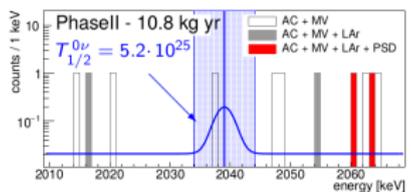
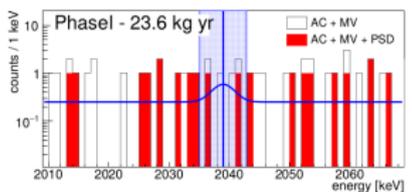
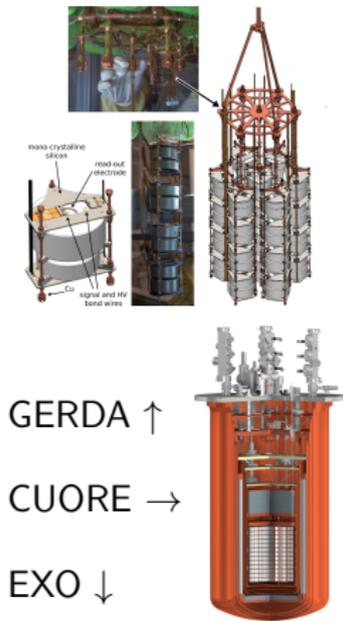
- efficiency: ~30%
- energy resolution:
few % (FWHM)
- tracking & particles
identification
- individual electron
parameters
- precise backgrounds
measurements
- almost any isotope

NEMO-3 (2003-2011) et SuperNEMO (2018-)

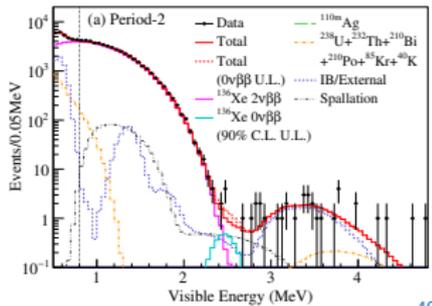
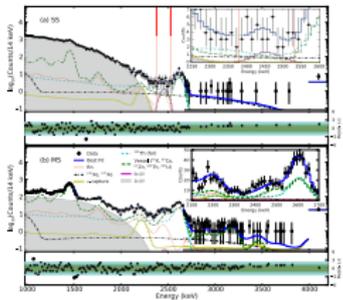
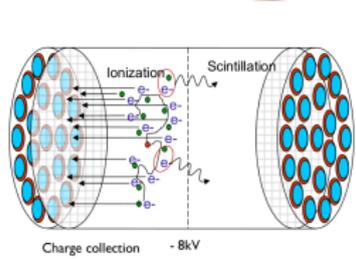
Seules expériences capables “de voir” les 2 électrons



Immense effort international à la recherche de la $2\beta 0\nu$

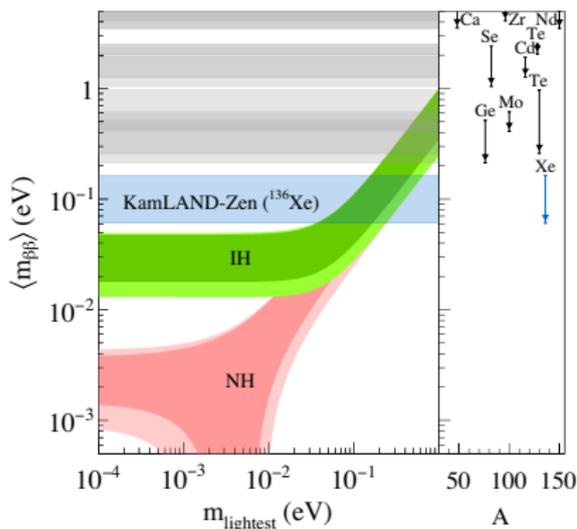
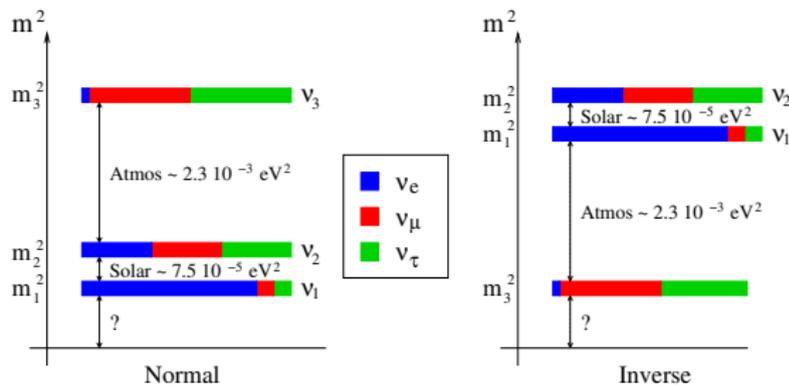


KamLAND-Zen



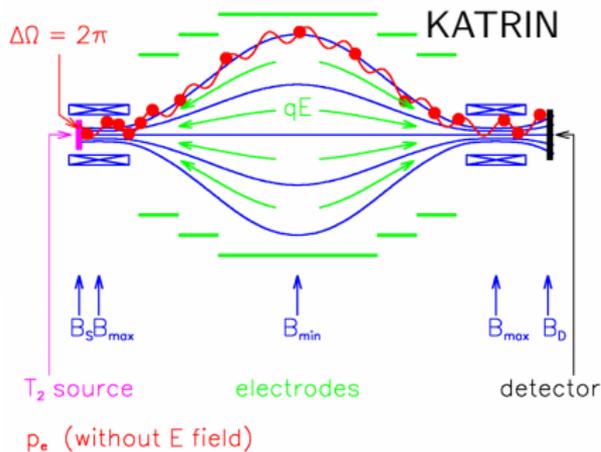
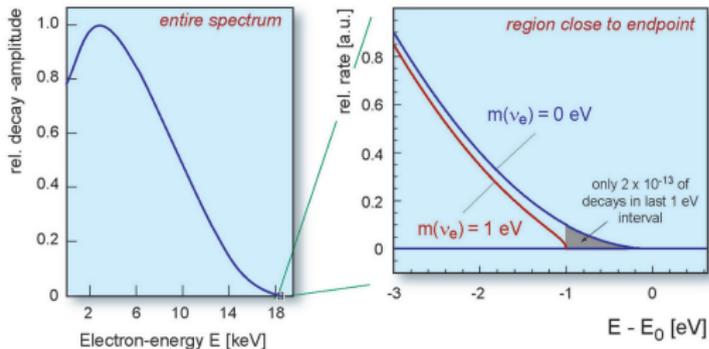
Situation actuelle pour la recherche $2\beta 0\nu$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = c_{12}^2 c_{13}^2 m_1 + s_{12}^2 c_{13}^2 e^{2i\eta_2} m_2 + s_{13}^2 e^{2i(\eta_3 - \delta)} m_3$$

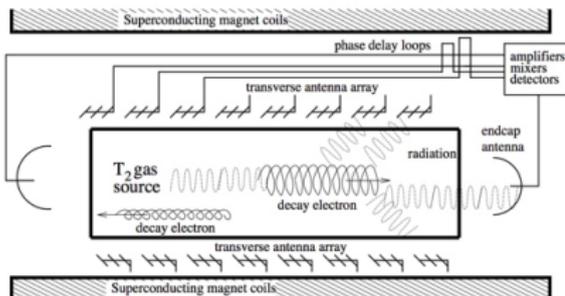


Masse directe : désintégration β

$$\frac{d\Gamma}{dE} = C p_e (T_e + m_e) (Q_\beta - T_e) \sqrt{(Q_\beta - T_e)^2 - m_\beta^2} F(T_e, Z)$$



$$\text{Project 8 : } \omega = \frac{eB}{\gamma m_e} = \frac{eB}{1 + E_e/m_e c^2}$$



Résumé

- ▶ Les neutrinos sont des particules singulières très difficile à détecter
- ▶ Une histoire très riche au cours du dernier siècle
- ▶ De nombreuses surprises ont été associées aux nouvelles détections
- ▶ Leurs très faibles masses pourraient être le signe d'une physique au delà du Modèle Standard
- ▶ Les neutrinos pourraient être à l'origine de la disparition de l'anti-matière dans l'univers
- ▶ Il reste à :
 - ▶ déterminer la hiérarchie de masse
 - ▶ mesurer les masses individuelles
 - ▶ améliorer la précision sur les paramètres de mélange
 - ▶ mesurer la violation de CP δ
 - ▶ confirmer ou rejeter l'existence de neutrino stérile
 - ▶ comprendre l'origine des neutrinos de très haute-énergie
 - ▶ faire de l'astronomie neutrino
 - ▶ mesurer des propriétés magnétiques des neutrinos
 - ▶ détecter les neutrinos relique du Big-Bang
 - ▶ ...

Pour en savoir plus

- ▶ Revue IN2P3 gratuite *Elémentaire* sur les neutrinos :
<http://elementaire.lal.in2p3.fr/n5>
- ▶ Document de Los Alamos sur la découverte du neutrino :
<http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326606.pdf>
- ▶ Livre en anglais de F. Close sur l'histoire du neutrino :
<https://global.oup.com/academic/product/neutrino-9780199695997?cc=fr&lang=en&>
- ▶ Livre et film sur la vie de E. Majorana :
<http://www.gallimard.fr/Catalogue/GALLIMARD/Folio/Folio/Encherchant-Majorana>
<https://www.zed.fr/fr/edition/dvd/catalogue/programme/le-mystere-ettore-majorana-un-physicien-absolu>