

Sources de neutrinos et oscillations

École de printemps de Subatech - 2026

Mathieu BONGRAND

mathieu.bongrand@in2p3.fr

CNRS / Subatech

28 mai 2026



Table des matières

Interactions des neutrinos

- L'interaction faible dans le Modèle Standard
- Les trois saveurs de neutrinos

Sources de neutrinos

- Neutrinos solaires
- Neutrinos de supernova
- Neutrinos atmosphériques
- Neutrinos de réacteur nucléaire
- Neutrinos astrophysiques

Oscillations des neutrinos

- Oscillations à deux saveurs
- Oscillations à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Table des matières

Interactions des neutrinos

- L'interaction faible dans le Modèle Standard
- Les trois saveurs de neutrinos

Sources de neutrinos

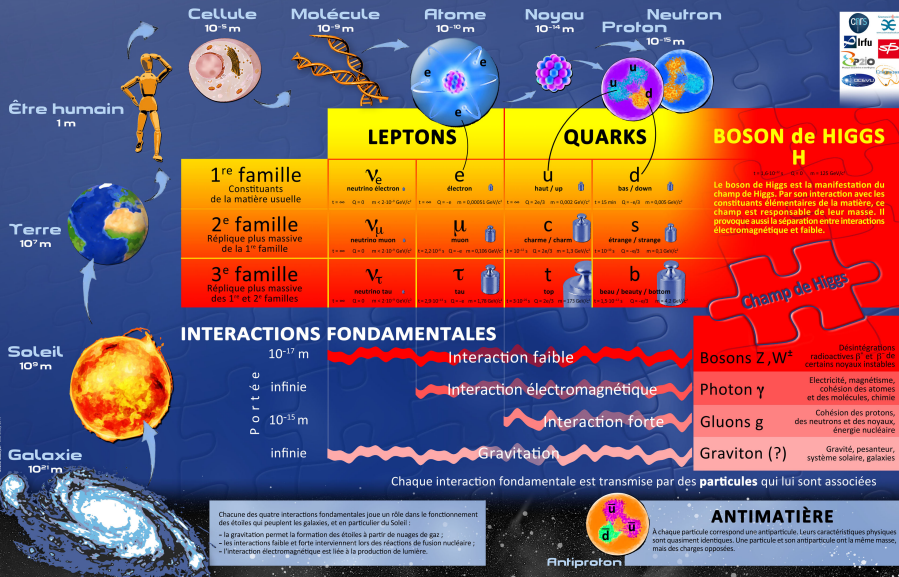
- Neutrinos solaires
- Neutrinos de supernova
- Neutrinos atmosphériques
- Neutrinos de réacteur nucléaire
- Neutrinos astrophysiques

Oscillations des neutrinos

- Oscillations à deux saveurs
- Oscillations à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

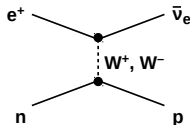
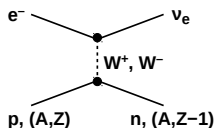
Composants élémentaires de la matière



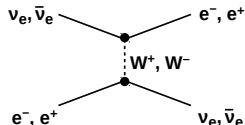
Les interactions des neutrinos

Pour détecter un neutrino, il faut considérer sa saveur (e , μ , τ), son énergie et le messager de l'interaction (bosons Z^0 ou $W^\pm$).

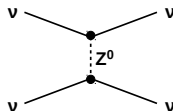
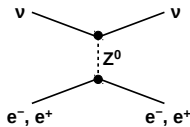
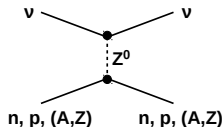
CC β -processes



CC scattering process



NC scattering processes ($\nu = \nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$)



Interactions des neutrinos par courant chargé (CC) ou courant neutre (NC)
[arXiv:1702.08713].

La désintégration bêta

Par rapport à la théorie de Fermi, la description moderne de la désintégration bêta fait intervenir les quarks et les bosons $W^\pm$.

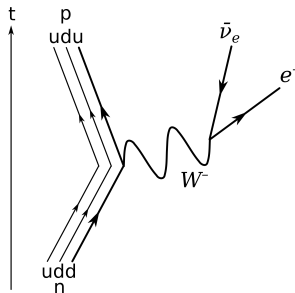


Diagramme de Feynman représentant une désintégration β^- dans la théorie du Modèle Standard.

La saveur d'un neutrino est déterminée à partir du lepton chargé qui l'accompagne lors de sa création ou de son interaction

Les bosons $W^\pm$

La masse des bosons $W^\pm$ est très grande :

$$m_W = 80.3692 \pm 0.0133 \text{ GeV}$$

D'après leur **largeur** Γ_W de décroissance :

$$\Gamma_W = 2.085 \pm 0.042 \text{ GeV},$$

les bosons $W^\pm$ ont une durée de vie très courte :

$$\begin{aligned}\tau_W &= \hbar / \Gamma_W \\ &= \frac{h [J][s]}{2\pi \times e [J][eV]^{-1} \times \Gamma [eV]} \\ &= \frac{6.626 \times 10^{-34}}{2\pi \times 1.602 \times 10^{-19} \times 2.085 \times 10^9} \\ &= 3.157 \times 10^{-25} \text{ s}\end{aligned}$$

La **portée** de l'interaction faible est donc réduite ($\sim 10^{-17} \text{ m}$).

Le boson Z^0

La masse du boson Z^0 est très grande :

$$m_Z = 91.1880 \pm 0.0020 \text{ GeV}$$

D'après sa **largeur** Γ_Z de décroissance :

$$\Gamma_Z = 2.4955 \pm 0.042 \text{ GeV}$$

le boson Z^0 a une durée de vie très courte :

$$\begin{aligned}\tau_Z &= \hbar / \Gamma_Z \\ &= \frac{h [J][s]}{2\pi \times e [J][eV]^{-1} \times \Gamma [eV]} \\ &= \frac{6.626 \times 10^{-34}}{2\pi \times 1.602 \times 10^{-19} \times 2.4955 \times 10^9} \\ &= 2.638 \times 10^{-25} \text{ s}\end{aligned}$$

La **portée** de l'interaction faible est donc réduite ($\sim 10^{-17} \text{ m}$).

Les trois saveurs des neutrinos

La mesure des désintégrations du Z^0 au collisionneur LEP (e^+e^-) du CERN a prouvé qu'il n'existait que trois saveurs de neutrinos.

La largeur de désintégration du Z^0 vers le canal *invisible*, les neutrinos $Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$. Il s'agit d'une courbe de **résonances** qui représente un pic centré sur la masse de la particule et dont la largeur représente l'inverse de sa durée de vie.

Z DECAY MODES			
Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale Factor/ Conf. Level	P(MeV/c)
Γ_1	e^+e^-	$(3.3632 \pm 0.0042)\%$	45594
Γ_2	$\mu^+\mu^-$	$(3.3602 \pm 0.0060)\%$	45594
Γ_3	$\tau^+\tau^-$	$(3.3696 \pm 0.0083)\%$	45559
Γ_4	$\ell^+\ell^-$	$(3.3658 \pm 0.0023)\%$	
Γ_5	$\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$		45593
Γ_6	$\ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$	$(4.55 \pm 0.17) \times 10^{-4}$	45594
Γ_7	invisible	$(20.000 \pm 0.055)\%$	
Γ_8	hadrons	$(69.911 \pm 0.056)\%$	
Γ_9	$(u\bar{u} + c\bar{c})/2$	$(11.6 \pm 0.6)\%$	
Γ_{10}	$(d\bar{d} + s\bar{s} + b\bar{b})/3$	$(15.6 \pm 0.4)\%$	
Γ_{11}	$c\bar{c}$	$(12.00 \pm 0.21)\%$	
Γ_{12}	$b\bar{b}$	$(15.12 \pm 0.05)\%$	

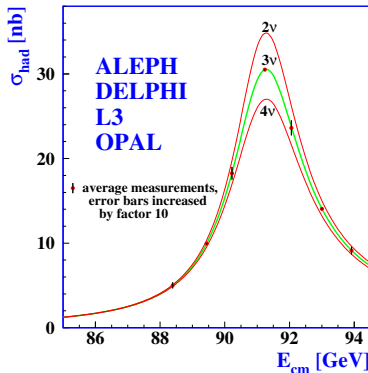


Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Oscillations des neutrinos

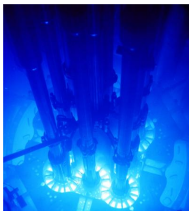
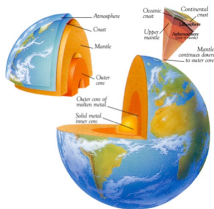
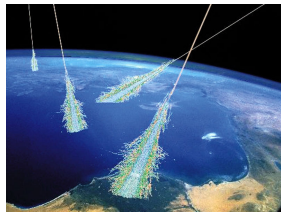
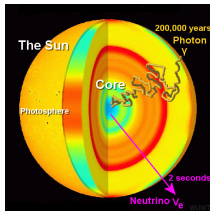
Oscillations à deux saveurs

Oscillations à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

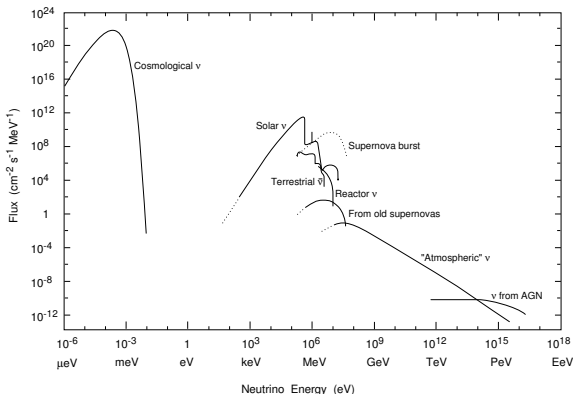
Les sources variées de neutrinos

Après la découverte du neutrino auprès des réacteurs nucléaires, les expérimentateurs ont cherché à détecter de nouvelles sources de neutrinos, qui ont révélé les trois saveurs des neutrinos : ν_e , ν_μ , ν_τ .



Flux et énergies des neutrinos

Aujourd'hui, nous sommes en mesure de détecter une grande variété de sources de neutrinos, à des énergies et flux très variés.



Flux et énergies des différentes sources de neutrinos détectables sur Terre.

Remarque : chaque fois que nous avons détecté des neutrinos d'une nouvelle source, les scientifiques ont eu des surprises !

Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Oscillations des neutrinos

Oscillations à deux saveurs

Oscillations à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Neutrinos solaires

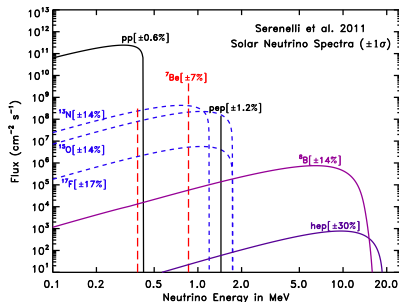
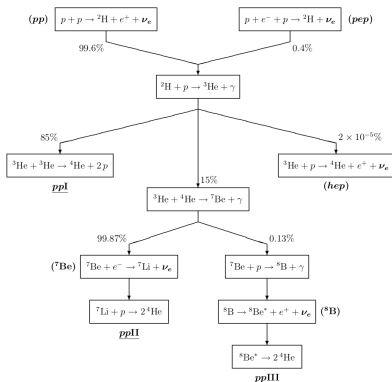
Dans les années 60, les chercheurs se sont intéressés aux **neutrinos solaires** :

- On commence à comprendre que contrairement à la chaleur de la Terre, le Soleil ne produit pas son énergie à partir de la radioactivité naturelle (chaînes ^{238}U , ^{232}Th et ^{40}K).
- Le Soleil produit son énergie grâce à la **fusion thermonucléaire de protons**, qui conduit à la synthèse d'éléments plus lourds.
- Le travail pionnier de J. Bahcall permet de prédire le flux de neutrinos solaires attendus sur Terre et leurs énergies.

Lecture de Franck Close - *Neutrino* - Oxford Press Libri - 2012

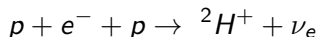
Chaîne de fusion thermonucléaire et neutrinos solaires

J. Bahcall prédira que le flux de neutrinos solaires attendus sur Terre est de l'ordre de $10^{11} \nu_e/\text{cm}^2/\text{s}$, avec des énergies allant de quelques centaines de keV à une dizaine de MeV.



Exercice 1

Exercice 1 : Calculer l'énergie (en eV) des neutrinos produits par la fusion proton-proton avec capture électronique (*pep*) au cœur du Soleil, suivant la réaction :



Données :

$$m_e = 5.485\,799 \times 10^{-4} \, u, \, m_p = 1.007\,276 \, u,$$

$m_n = 1.008\,665 \, u$ et $M(2, 1) = 2.014\,102 \, u$ étant la masse atomique (noyau + électron).

$$u = 931.494 \, \text{MeV}/c^2$$

Exercice 1 (correction)

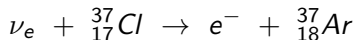
Le noyau produit est très lourd par rapport au neutrino, c'est donc ce dernier qui emportera toute l'énergie Q libérée par la réaction, sous forme d'énergie cinétique.

$$\begin{aligned} Q &= m_p + m_e + m_p - [M(2, 1) - m_e] - m_\nu \\ &= 2 \times 1.007\,276 + 0.000\,548\,6 \text{ u} - 2.014\,102 + 0.000\,548\,6 \text{ u} \\ &= 0.001\,547 \text{ u} \times 931.494 \text{ MeV} \\ &= 1.441 \text{ MeV} \end{aligned}$$

On peut d'ailleurs constater sur la figure précédente un pic à l'énergie $E_{pep} = 1.441 \text{ MeV}$.

Expérience Chlorine de R. Davis

- En 55, R. Davis, avait **déjà essayé de détecter les neutrinos auprès d'un réacteur nucléaire**, sans savoir qu'il s'agissait d'anti-neutrinos, et que la réaction envisagée était impossible.
- Suivant une proposition de B. Pontecorvo, Davis chercha ensuite la réaction des neutrinos solaires sur le chlore :

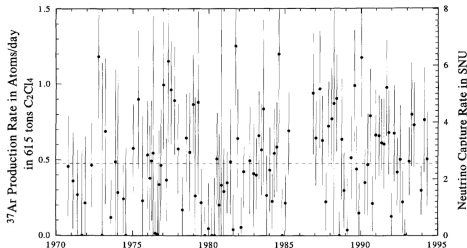


- Davis réunit environ 400 m³ de C₂Cl₄ et construisit l'expérience Chlorine dans la mine à Homestake.
- L'argon produit étant un gaz rare, il peut être extrait par bullage d'hélium à travers le détecteur.
- L'argon-37 étant radioactif ($T_{1/2}^{ec} = 35 \text{ j}$) on peut l'accumuler dans un compteur et mesurer le nombre de décroissances.

Résultats de l'expérience Chlorine



- Bahcall prévoit un taux de 9.3 ± 1.3 SNU
(Solar Neutrino Unit : $1 \text{ SNU} = 10^{-36}$ capture/target atom/s)
- Mais Davis mesure un taux de 2.56 ± 0.16 (stat.) ± 0.15 (syst.) SNU



Tank contenant 400 m^3 de chlore dans la mine de Homestake et le taux d'argon-37 détecté en fonction des années.

Détection des neutrinos solaires

- La détection des neutrinos solaires fut **un véritable exploit** qui confirma l'origine thermonucléaire de l'énergie produite au cœur du Soleil par la fusion et ouvrit la voie de l'astronomie utilisant les neutrinos.
- Mais le taux de neutrinos détectés ne correspondait pas au nombre de neutrinos attendus d'après le modèle du Soleil : on ne détecte qu'environ 30% des neutrinos attendus.
- Ce **problème des neutrinos solaires** persista pendant plus de 30 ans avant qu'on obtienne enfin une explication.

L'expérience Super-Kamiokande

- D'abord imaginée pour la recherche de la désintégration du proton ($p \rightarrow e^+ \pi^0$), l'expérience Super-Kamiokande s'est révélée décisive pour la physique des neutrinos.
- C'est un détecteur de 50 000 t d'eau pure instrumenté de 13 000 PMTs qui permet de distinguer les neutrinos électroniques ou muoniques, grâce à l'effet Cherenkov.
- Installée dans la mine Kamioka au Japon.

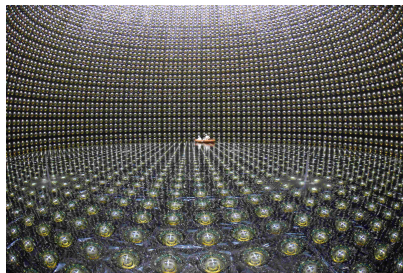
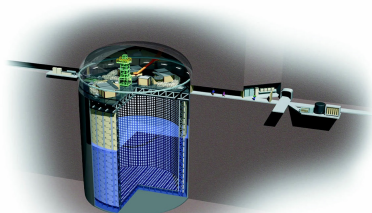
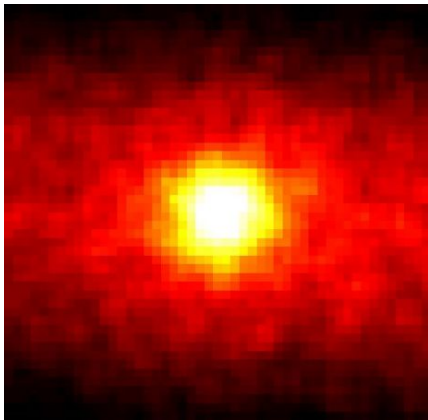
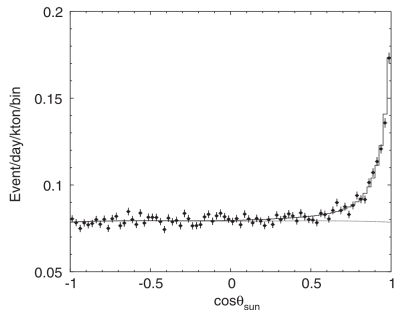


Schéma du détecteur Super-Kamiokande et photo prise lors de son remplissage.

Détection par Super-Kamiokande

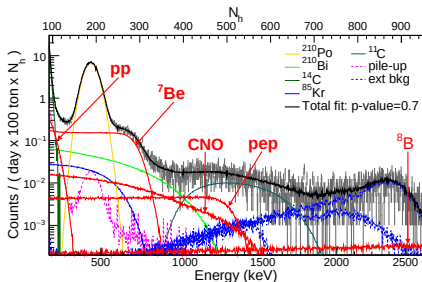
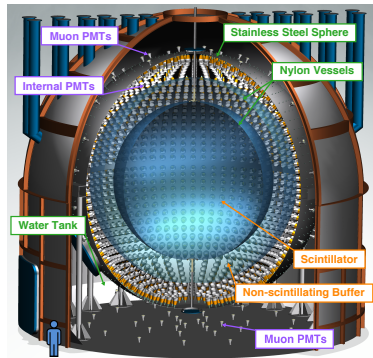
Elle s'est également intéressée aux neutrinos solaires et le déficit d'environ 30% par rapport aux prédictions y a été confirmé.



Détection des neutrinos solaires par l'expérience Super-Kamiokande au Japon.

Neutrinos scolaires dans Borexino

Avec 300 t de liquide scintillant et 2200 PMTs, l'expérience Borexino cherche les neutrinos solaires à très basse énergie.



Borexino a réussi la détection des différents neutrinos solaires, dont les neutrinos de la fusion principale, les neutrinos pp .

Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Oscillations des neutrinos

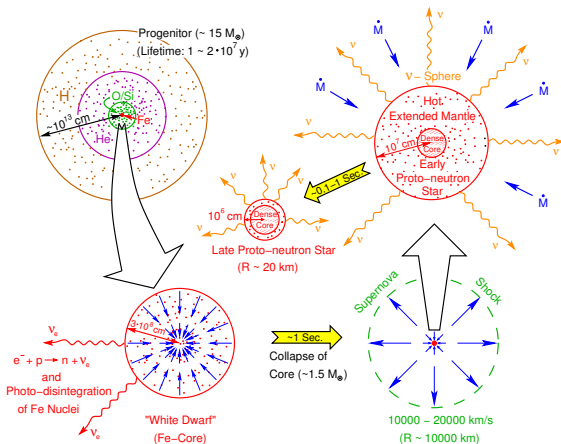
Oscillations à deux saveurs

Oscillations à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Neutrinos de supernova

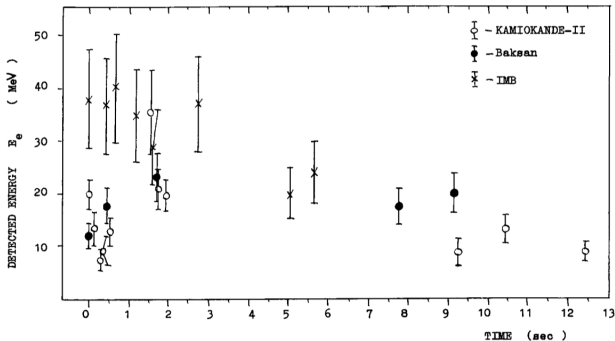
Lorsqu'une étoile massive ($M > 9M_{\odot}$) a fini de brûler tout son combustible, on assiste à un effondrement de son cœur suivi de l'explosion de l'étoile : c'est une **supernova**.



Mécanisme d'explosion d'une étoile massive. Plus de 90% de son énergie gravitationnelle est émise sous forme de neutrinos [arXiv:1702.08713].

Neutrinos de la supernova SN1987a

En 1987, en 12 secondes trois expériences sur Terre détectent 24 événements $\bar{\nu}_e$ de 12.5 MeV d'énergie moyenne, provenant d'une supernova du grand nuage de Magellan à 50 kpc (163 000 al).



Détection des anti-neutrinos électroniques de la SN1987a par Baksan (0.2 kt), Kamiokande (2.1 kt) et IMB (6.8 kt).

Depuis, de beaucoup plus grandes expériences attendent la prochaine supernova.

Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Oscillations des neutrinos

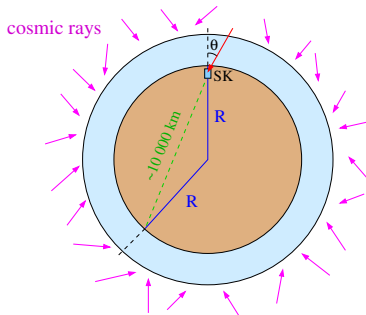
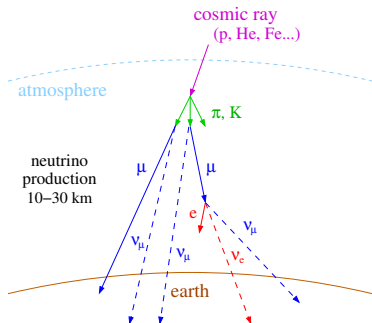
Oscillations à deux saveurs

Oscillations à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Neutrinos Atmosphériques et Super-Kamiokande

La seconde source de neutrinos d'importance pour les scientifiques provient des **neutrinos atmosphériques** produits par interaction des rayonnements cosmiques dans l'atmosphère.

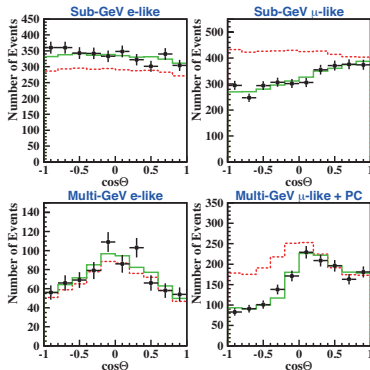


Production de neutrinos par les rayons cosmiques dans l'atmosphère.

Grâce à l'**effet Cherenkov**, il est possible de distinguer l'interaction de neutrino de type électron ou muon et de déterminer leur direction d'origine.

Oscillation des Neutrinos

En comparant les taux de neutrinos détectés en 1998 en fonction de l'angle et de l'énergie, les scientifiques se sont aperçus que les neutrinos muoniques semblaient disparaître en traversant la Terre.



Détection des neutrinos atmosphériques dans l'expérience Super-Kamiokande.

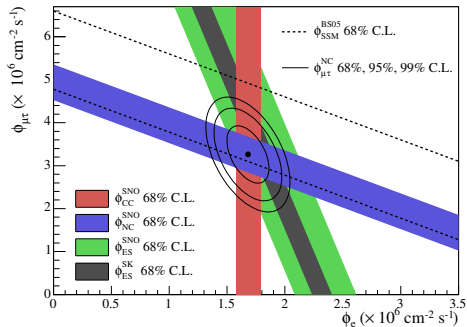
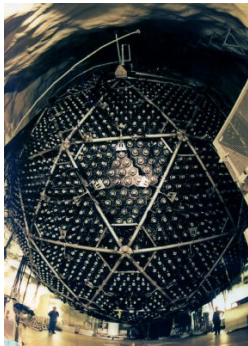
Les neutrinos muoniques changent-ils de saveur (e , μ , τ) en traversant la Terre ?

Résultats de l'Expérience SNO

L'expérience SNO (mine de Sudbury au Canada) apporta en 2000 la compréhension définitive et la solution au problème des neutrinos solaires.

Grâce à l'utilisation d'eau lourde (D_2O), SNO est sensible à toutes les saveurs (e , μ , τ) de neutrino selon des réactions différentes :

ES : $\nu_\alpha e^- \rightarrow e^- \nu_\alpha$, CC : $\nu_e d \rightarrow p p e^-$ et NC : $\nu_\alpha d \rightarrow p n \nu_\alpha$



Vue extérieure de SNO et flux des trois saveurs de neutrinos solaires.

Prix Nobel de Physique 2015

Les portes paroles des expériences Super-Kamiokande et SNO ont été récompensées du prix Nobel de Physique en 2015 pour la découverte des oscillations de neutrinos, qui prouvent que les neutrinos ont une masse.

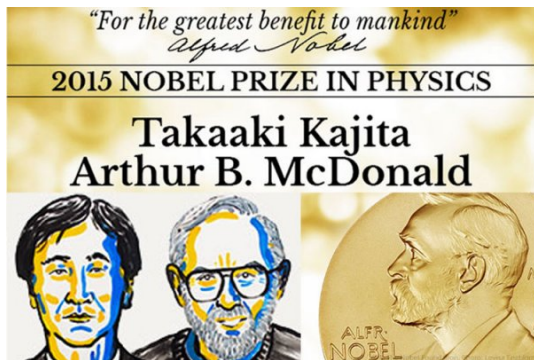


Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Oscillations des neutrinos

Oscillations à deux saveurs

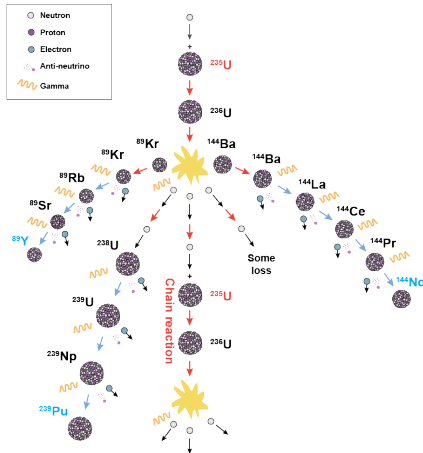
Oscillations à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Production de neutrinos par fission

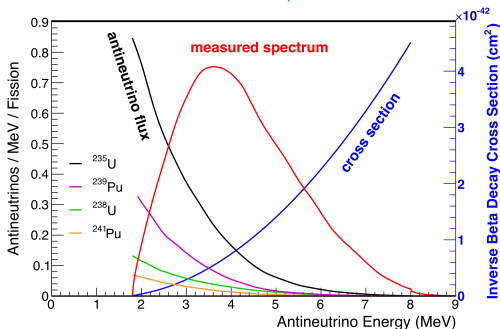
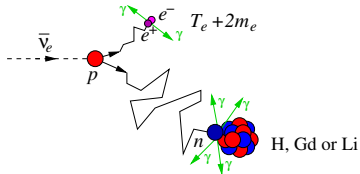
Comme nous l'avons déjà évoqué, les réacteurs nucléaires sont une source extrêmement intense et pure d'anti-neutrinos électroniques.

La fission de l'uranium-235 produit de nombreux émetteurs bêta et on attend environ $6 \bar{\nu}_e$ par fission.



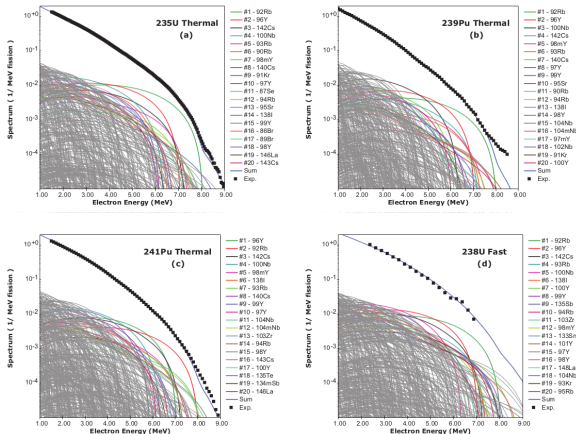
Production de neutrinos par fission

Grâce à nos connaissances en physique nucléaire et de l'interaction des anti-neutrinos par réaction bêta inverse, on peut prédire le taux d'interaction et le spectre en énergie des neutrinos attendus.



Production de neutrinos par fission

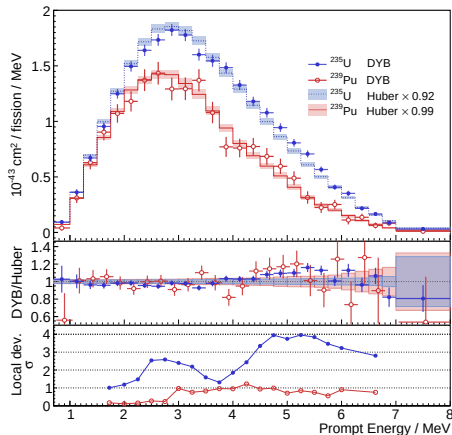
Une grande activité de recherche en physique nucléaire consiste à prédire à chaque instant le spectre et le flux des neutrinos émis par les réacteurs nucléaires.



Sommation de 4×800 fragments de fissions et plusieurs milliers de branches de désintégration bêta des 4 isotopes qui fissionnent dans le cœur du réacteur.

Mesure du spectre en énergie

La mesure la plus précise du spectre en énergie a été réalisée pendant plusieurs années par l'expérience Daya Bay en Chine.

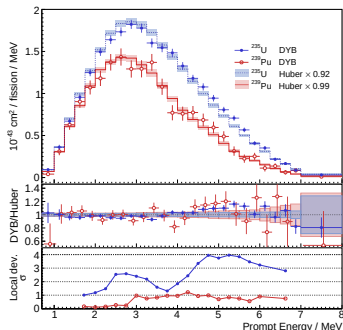
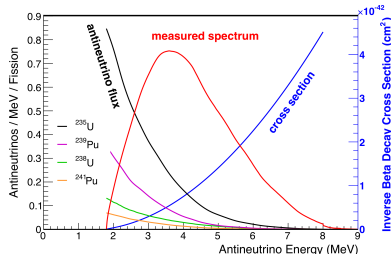


Comparaison des spectres d'uranium-235 et de plutonium-239 mesurés par Daya Bay à la prédiction de Huber-Mueller.

Exercice 2

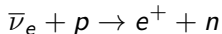
Exercice 2 : Pourquoi le seuil en énergie mesuré par l'expérience Daya Bay montre un seuil autour de 0.8 MeV alors que le spectre théorique commence à 1.8 MeV ?

Données :



Exercice 2 (correction)

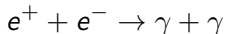
La réaction utilisée pour détecter les anti-neutrinos de réacteur est la réaction bêta inverse :



Nous avons calculé le seuil au premier cours : $E_{IBD}^{\bar{\nu}_e} > 1.805 \text{ MeV}$.

Le liquide scintillant répond à l'excitation (scintillation) des particules qui y déposent leur énergie (ionisation). Dans cette réaction bêta inverse c'est le positron qui dépose son énergie.

Mais le positron va s'annihiler avec un électron dans le milieu :



Ces deux γ vont à leur tour déposer leur énergie dans le détecteur, avec l'énergie $E_{anni} = 2 \times E_\gamma = 2 \times 511 \text{ keV} = 1022 \text{ keV}$.

L'énergie visible sera donc : $E_{vis} > 1.805 - 1.022 = 783 \text{ keV}$.

Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Oscillations des neutrinos

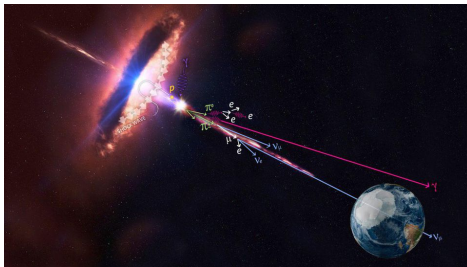
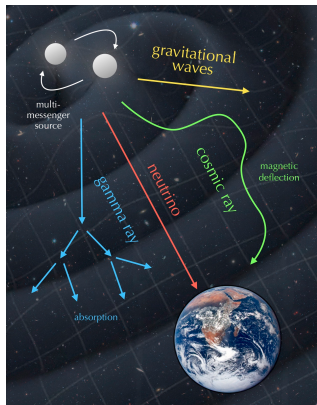
Oscillations à deux saveurs

Oscillations à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Les neutrinos astrophysiques

Comme pour le Soleil et les Supernova dont nous avons parlé, les neutrinos sont des messagers astrophysiques uniques



(gauche) Illustration des différents messagers émis lors de la fusion de deux trous noirs (ou étoiles à neutrons). (droite) Émission de particules de ultra-haute énergie par un *noyau actif de galaxie*.

Télescope à neutrinos KM3NeT

Des modules optiques, constitués de PMTs, assemblés en lignes sont plongés à 2500 m (ORCA en France) et 3500 m (ARCA en Sicile) sous la mer Méditerranée

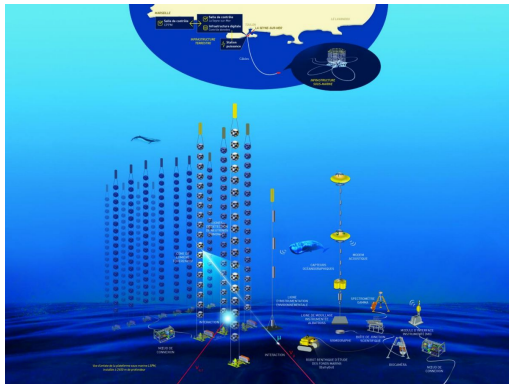


Illustration d'ORCA avec les lignes de modules optiques et ses systèmes annexes. Deux types de neutrinos interagissants sont représentés : ν_e (boule de lumière) et ν_μ (cône Cherenkov). (CNRS/CPPM et Siences et Avenir) .

Le neutrino le plus énergétique jamais détecté

En février 2023 KM3NeT a détecté un neutrino record d'environ 220 PeV (10^{15} eV) - son origine est encore inconnue

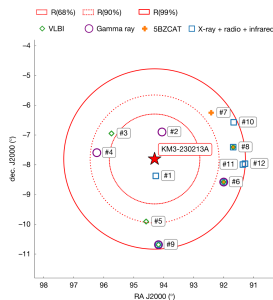
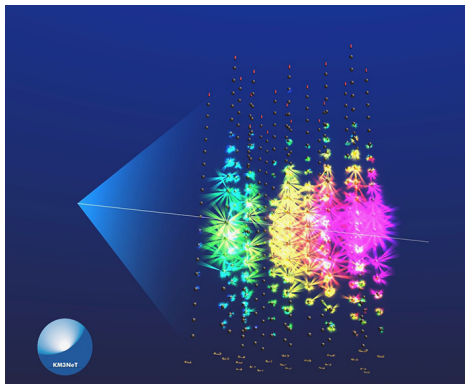


Fig. 4 | Sky map in the direction of KM3-230213A. KM3-230213A is indicated by the red star, with the error regions within R(68%), R(90%) and R(99%) shown as dotted, dashed and solid contours, respectively. The directions of the selected source candidates are shown as coloured markers, whose colours and marker type indicate the criterion according to which the source was selected. The sources are numbered according to their proximity to KM3-230213A, as reported in Methods.

Illustration de l'événement KM3-20230213A détecté par 21 lignes composées de 18 modules optiques. Les cônes colorés indiquent l'intensité du signal lumineux détecté et la couleur correspond à sa durée (de violet vers le bleu). La ligne blanche symbolise la trajectoire du neutrino et avec son cône Cherenkov.

Exercice 3

Exercice 3 : Comparer l'énergie de ce neutrino ultra-énergétique (220 PeV) à celle d'un moustique en vol.

Données :

$$m_{moustique} = [2.5; 10] \text{ mg et } v_{moustique} = [1.6; 2.4] \text{ km h}^{-1}$$
$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Préfixe	Symbole	Puissance	Valeur décimale
électrovolt	eV	10^0	1
kiloélectrovolt	keV	10^3	1 000
mégaélectrovolt	MeV	10^6	1 000 000
gigaélectrovolt	GeV	10^9	1 000 000 000
téraélectrovolt	TeV	10^{12}	1 000 000 000 000
pétaélectrovolt	PeV	10^{15}	1 000 000 000 000 000

Exercice 3 (correction)

L'énergie cinétique du moustique est donnée par :

$$\begin{aligned}E_{moustique} &= \frac{1}{2} \times m_{moustique} [kg] \times v_{moustique}^2 [m]^2[s]^{-2} \\&= 0.5 \times 5 \times 10^{-6} [kg] \times \left(\frac{2 \times 10^3}{3600}\right)^2 [m]^2[s]^{-2} \\&= 0.5 \times 5 \times 10^{-6} [kg] \times \frac{4}{12.96} [m]^2[s]^{-2} \\&= 7.7 \times 10^{-7} \text{ J}\end{aligned}$$

On peut convertir cette énergie en électronvolts :

$$E_{moustique} [eV] = \frac{E_{moustique} [J]}{e [J][eV]^{-1}} = \frac{7.7 \times 10^{-7}}{1.602 \times 10^{-19}} = 4.8 \times 10^{12} \text{ eV} = 4.8 \text{ TeV}$$

Ce neutrino possède donc l'énergie d'environ 46 000 moustiques.

Sur Terre, le record est l'énergie d'un proton accéléré par le LHC au CERN avec 7 TeV par proton (collision de 2 protons à 14 TeV).

Notre galaxie vue par différents messagers

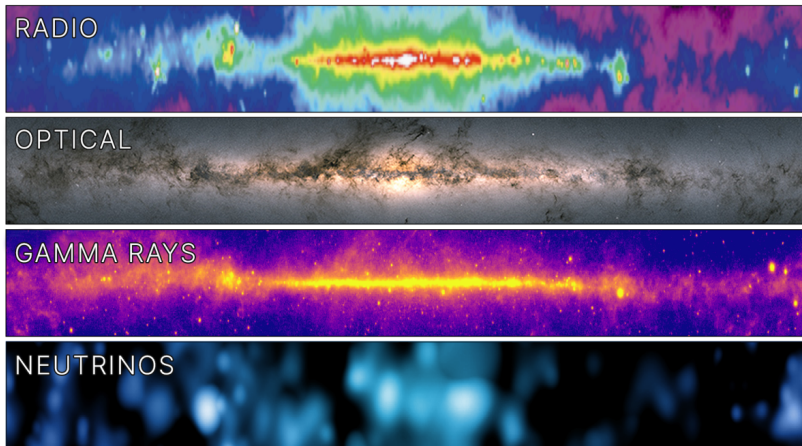


Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Oscillations des neutrinos

Oscillations à deux saveurs

Oscillations à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Oscillations à deux saveurs

Les oscillations de neutrino existent parce que les **états propres de saveur** (ν_α, ν_β) des neutrinos, impliqués dans les interactions, sont en réalité des superposition quantiques des **états propres de masse** (ν_i, ν_j), qui se propagent.

On peut donc écrire les superpositions d'états quantiques :

$$|\nu_\alpha\rangle = U_{\alpha i} |\nu_i\rangle + U_{\alpha j} |\nu_j\rangle \quad \text{et} \quad |\nu_\beta\rangle = U_{\beta i} |\nu_i\rangle + U_{\beta j} |\nu_j\rangle$$

Dans l'**approximation à deux saveurs** de neutrinos, on peut décrire cette superposition par une matrice de rotation, qui répond aux conditions d'unitarité et qui ne dépend que d'un seul paramètre (au lieu de 4), l'**angle de mélange** θ_{ij} :

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

Probabilité d'oscillation

On démontrera plus loin qu'on peut écrire la **probabilité d'oscillation à deux saveurs** de la manière suivante :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \left| \delta_{\alpha\beta} - \sin^2(2\theta_{ij}) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ji}^2 L}{4E} \right) \right|$$

Avec : $\delta_{\alpha\beta} = 1$ si $\alpha = \beta$ sinon $\delta_{\alpha\beta} = 0$, L la distance parcourue par le neutrino, E son énergie et $\Delta m_{ji}^2 = m_j^2 - m_i^2$ la différence de masse au carré des états ν_i et ν_j .

En utilisant les unités de la physique des particules on peut écrire :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \left| \delta_{\alpha\beta} - \sin^2(2\theta_{ij}) \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{ji}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E [\text{MeV}]} \right) \right|$$

Principe expérimental

Les expériences cherchent à mesurer les probabilités d'oscillation à une distance ou une énergie donnée afin de déterminer les paramètres θ_{ij} et Δm_{ji}^2 .

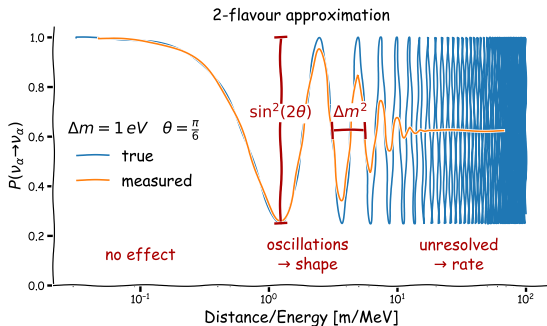


Illustration de la probabilité de disparition de neutrinos de saveur ν_α en fonction du rapport L/E [S. Böser et al., 2019].

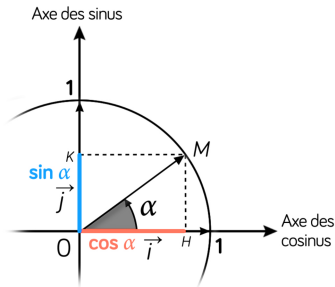
L'amplitude des oscillations est gouvernée par l'angle θ_{ij} alors que la fréquence d'oscillation dépend de Δm_{ji}^2 .

Exercice 4

Exercice 4 : A quelle distance optimale L dois-je placer un détecteur pour étudier l'oscillation des anti-neutrinos de réacteur avec une énergie moyenne $E = 4$ MeV, pour mesurer l'angle de mélange θ_{13} associé à la différence de masse Δm_{31}^2 ?

Données :

$$\theta_{13} = 8.62^\circ \text{ et } \Delta m_{31}^2 = 2.521 \times 10^{-3} \text{ eV}^2.$$



Exercice 4 (correction)

L'angle de mélange θ peut-être mesuré au premier minimum d'oscillation qui est donné dans le second terme en $\sin^2$ de la probabilité d'oscillation : $\sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{ji}^2 L}{E} \right)$, dans laquelle la différence de masse est en $[\text{eV}^2]$, l'énergie en $[\text{MeV}]$ et la distance en $[\text{m}]$.

La fonction sinus $\sin x$ est maximale lorsque $x = \pi/2$, donc il en est de même pour $\sin^2 x$.

Il faut donc résoudre l'équation suivante : $\pi/2 = 1.27 \frac{\Delta m_{ji}^2 L}{E}$

$$\begin{aligned} L &= \frac{\pi/2 \times E}{1.27 \times \Delta m_{31}^2} \\ &= \frac{\pi/2 \times 4}{1.27 \times 2.521 \times 10^{-3}} \\ &= 1962 \text{ m} = 1.962 \text{ km} \end{aligned}$$

Explication de la disparition des neutrinos solaires

Cette illustration à deux saveurs de neutrinos permet d'appréhender la disparition de neutrinos solaires à cause des oscillations, comme dans l'expérience de Davis.

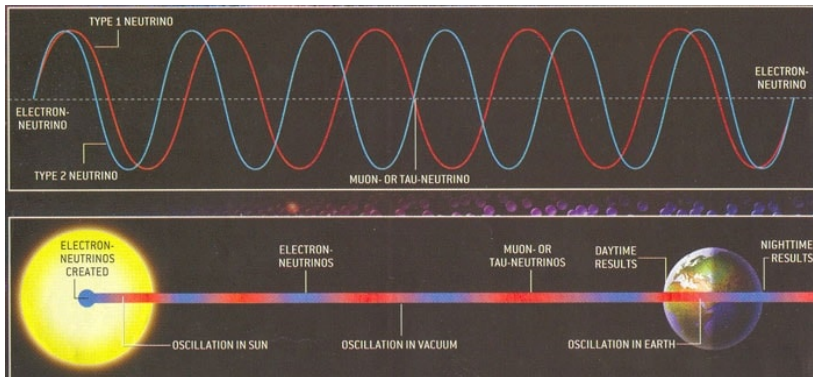
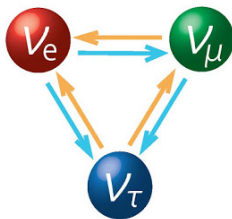


Illustration de l'oscillation des neutrinos solaires sur Terre.

Mélange des neutrinos

La mécanique quantique permet que les états propres de saveur des neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) soient des superpositions des états propres de masse (ν_1, ν_2, ν_3).



Cette relation est encapsulée dans la matrice de mélange des neutrinos, appelée matrice PMNS*, souvent exprimée comme suit :

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

*B. Pontecorvo, Z. Maki, M. Nakagawa et S. Sakata

Paramétrisation de la matrice PMNS

La grande précision atteinte par les expériences actuelles nous impose à utiliser le formalisme à trois saveurs de neutrinos.

On peut cependant également simplifier la matrice PMNS en utilisant une matrice de rotation à trois dimensions :

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

où $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ et $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$.

Faisant donc apparaître trois angles de mélange θ_{ij} et une phase δ de violation de CP , qui décrit une asymétrie entre matière et anti-matière.

Cette dernière est activement recherchée car elle pourrait expliquer la disparition de l'anti-matière dans l'Univers.

Paramétrisation de la matrice PMNS (suite)

On peut illustrer cette représentation de la matrice PMNS par les trois rotations suivantes :

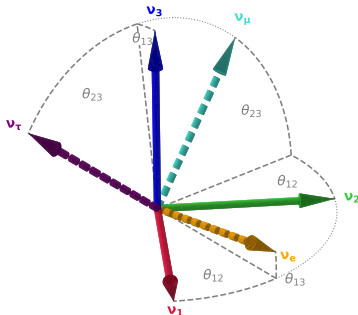


Illustration des angles de mélange des neutrinos et du changement entre les états propres de masse et de saveur [S. Böser et al., 2019].

A partir de cette matrice, on peut toujours calculer les probabilités d'oscillation des neutrinos. De nombreuses expériences auprès de différentes sources de neutrinos sont nécessaires afin de mesurer l'ensemble des paramètres de la matrice PMNS.

Table des matières

Interactions des neutrinos

- L'interaction faible dans le Modèle Standard
- Les trois saveurs de neutrinos

Sources de neutrinos

- Neutrinos solaires
- Neutrinos de supernova
- Neutrinos atmosphériques
- Neutrinos de réacteur nucléaire
- Neutrinos astrophysiques

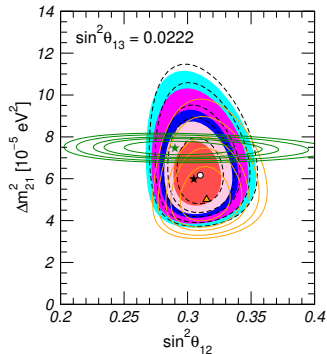
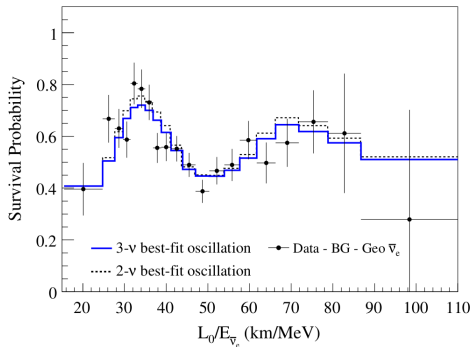
Oscillations des neutrinos

- Oscillations à deux saveurs
- Oscillations à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

KamLAND au Japon

L'expérience KamLAND au Japon a été construite pour étudier les paramètres dits solaires ($\Delta m_{21}^2, \theta_{12}$) à partir d'anti-neutrinos de réacteurs nucléaires (rapports L/E similaires).



Survie des anti-neutrinos électroniques de réacteur dans KamLAND et comparaison de son résultat (en vert) avec des expériences solaires.

La combinaison de KamLAND avec les expériences solaires permet également d'améliorer la précision des résultats.

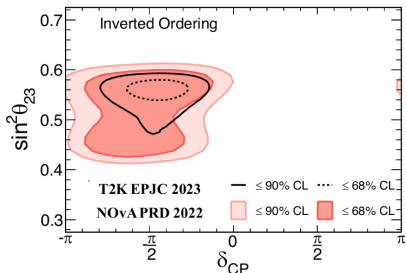
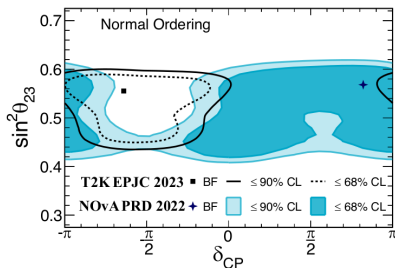
Résultats sur les neutrinos atmosphérique

Les paramètres atmosphériques ($\Delta m_{31}^2, \theta_{23}$) sont étudiés à partir de neutrinos atmosphériques ou de faisceaux (SK, T2K ou NOvA).

On mesure en parallèle la disparition de ν_μ et l'apparition de ν_e .

Ces expériences cherchent :

- l'ordre des masses : $m_1 < m_2 \ll m_3$ ou $m_3 \ll m_1 < m_2$
- une différence d'oscillation neutrino / anti-neutrinos à la recherche de la phase δ de violation de CP

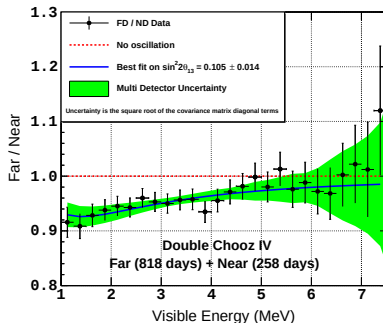
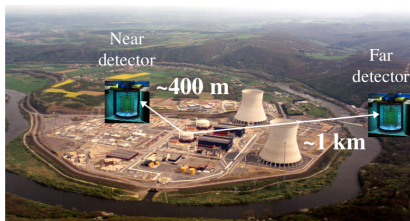


Résultat commun de T2K et NOvA sur l'angle θ_{23} et la violation de CP .

L'expérience Double Chooz en France

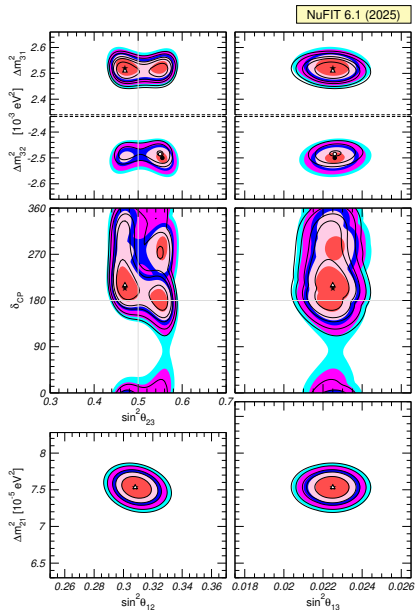
Le dernier paramètre à avoir été mesuré est l'angle de mélange θ_{13} , qui est plus faible que les autres.

L'expérience Double Chooz en France a fait partie des trois expériences à avoir mesuré cet angle, durant la dernière décennie, avec deux détecteurs identiques placés à deux distances différentes.



Principe de mesure d'oscillation des anti-neutrinos de réacteur avec deux détecteurs dans l'expérience Double Chooz.

Résumé des résultats mondiaux - NuFit



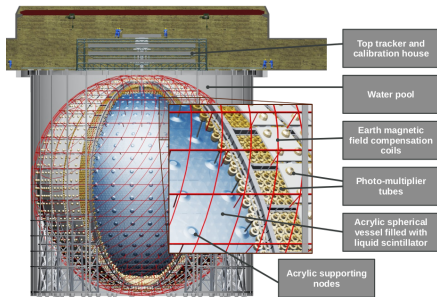
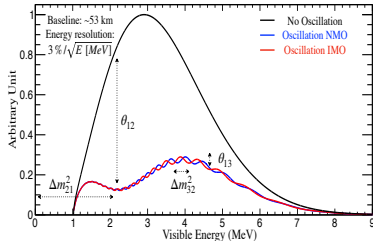
		NuFIT 6.1 (2025)			
		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 1.5$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3 σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3 σ range
IC23 without SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.3088^{+0.0067}_{-0.0066}$	$0.2893 \rightarrow 0.3295$	$0.3088^{+0.0067}_{-0.0066}$	$0.2893 \rightarrow 0.3295$
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.76^{+0.42}_{-0.41}$	$32.54 \rightarrow 35.03$	$33.76^{+0.42}_{-0.41}$	$32.54 \rightarrow 35.03$
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.470^{+0.017}_{-0.014}$	$0.432 \rightarrow 0.587$	$0.555^{+0.013}_{-0.016}$	$0.437 \rightarrow 0.590$
	$\theta_{23}/^\circ$	$43.27^{+1.0}_{-0.82}$	$41.11 \rightarrow 50.02$	$48.15^{+0.75}_{-0.92}$	$41.40 \rightarrow 50.21$
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02249^{+0.00057}_{-0.00057}$	$0.02070 \rightarrow 0.02420$	$0.02261^{+0.00056}_{-0.00056}$	$0.02091 \rightarrow 0.02433$
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.62^{+0.11}_{-0.11}$	$8.27 \rightarrow 8.95$	$8.65^{+0.11}_{-0.11}$	$8.31 \rightarrow 8.97$
	$\delta_{CP}/^\circ$	207^{+23}_{-20}	$114 \rightarrow 405$	283^{+24}_{-28}	$202 \rightarrow 347$
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.537^{+0.094}_{-0.10}$	$7.236 \rightarrow 7.823$	$7.537^{+0.094}_{-0.10}$	$7.236 \rightarrow 7.822$
	$\frac{\Delta m_{3l}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.521^{+0.026}_{-0.018}$	$+2.454 \rightarrow +2.592$	$-2.500^{+0.024}_{-0.023}$	$-2.569 \rightarrow -2.430$
		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 5.9$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3 σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3 σ range
IC24 with SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.3088^{+0.0067}_{-0.0066}$	$0.2893 \rightarrow 0.3295$	$0.3088^{+0.0067}_{-0.0066}$	$0.2893 \rightarrow 0.3295$
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.76^{+0.42}_{-0.41}$	$32.54 \rightarrow 35.03$	$33.76^{+0.42}_{-0.41}$	$32.54 \rightarrow 35.03$
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.470^{+0.017}_{-0.014}$	$0.435 \rightarrow 0.584$	$0.550^{+0.013}_{-0.016}$	$0.439 \rightarrow 0.584$
	$\theta_{23}/^\circ$	$43.29^{+0.96}_{-0.79}$	$41.27 \rightarrow 49.86$	$47.90^{+0.73}_{-0.92}$	$41.51 \rightarrow 49.83$
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02248^{+0.00055}_{-0.00059}$	$0.02064 \rightarrow 0.02418$	$0.02262^{+0.00057}_{-0.00056}$	$0.02093 \rightarrow 0.02441$
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.62^{+0.11}_{-0.11}$	$8.26 \rightarrow 8.95$	$8.65^{+0.11}_{-0.11}$	$8.32 \rightarrow 8.99$
	$\delta_{CP}/^\circ$	212^{+26}_{-26}	$125 \rightarrow 365$	274^{+22}_{-21}	$203 \rightarrow 335$
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.537^{+0.094}_{-0.10}$	$7.236 \rightarrow 7.823$	$7.537^{+0.094}_{-0.10}$	$7.236 \rightarrow 7.822$
	$\frac{\Delta m_{3l}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.511^{+0.021}_{-0.020}$	$+2.450 \rightarrow +2.576$	$-2.483^{+0.020}_{-0.020}$	$-2.547 \rightarrow -2.421$

JUNO en Chine

L'expérience JUNO située à 53 km de deux centrales nucléaires va rechercher l'ordre des masses grâce à la détection de deux oscillations simultanément.

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{12} c_{13}^4 \sin^2 \Delta_{21} - \sin^2 2\theta_{13} (c_{12}^2 \sin^2 \Delta_{31} + s_{12}^2 \sin^2 \Delta_{32})$$

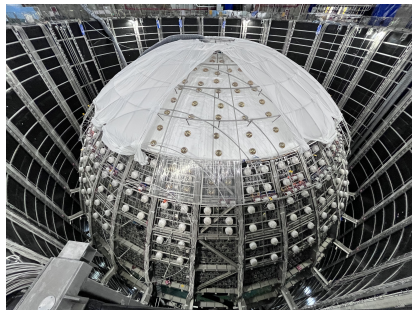
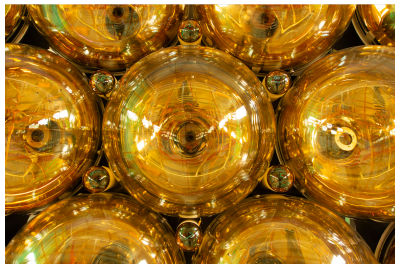
(notation $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$ et $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$)



Principe de mesure de la double oscillation des anti-neutrinos de réacteur dans JUNO et schéma du détecteur situé 650 m sous terre.

Photos de la construction de JUNO

La construction du détecteur s'est achevée fin 2024 et le remplissage en liquide scintillant a pris quelques mois.



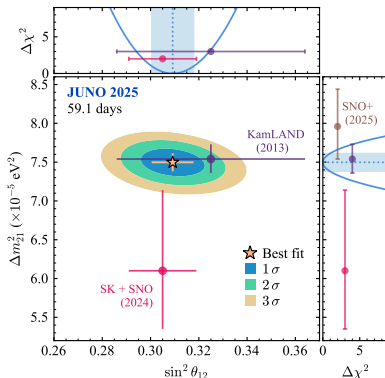
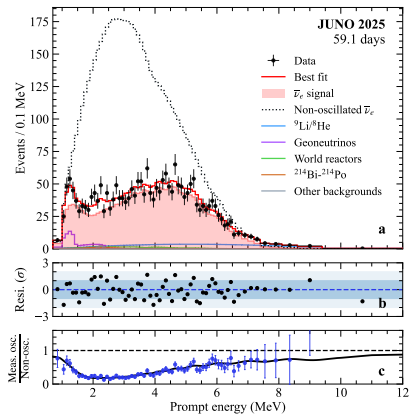
Les premières détections d'anti-neutrinos électroniques ont commencé à l'été 2025.

Vidéos du CNRS :

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLtILbuEpXFoEwVvSDDf8HhvO7fRvBpRih>

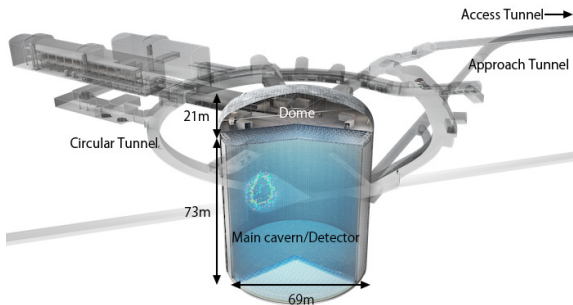
Premiers résultats de JUNO

Après seulement deux mois de mesures, JUNO a fourni ses premiers résultats sur les paramètres d'oscillation solaires, avec une précision de 1.6% sur Δm_{21}^2 et 2.8% sur $\sin^2 \theta_{12}$.



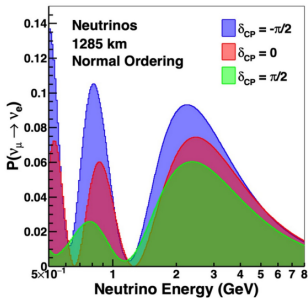
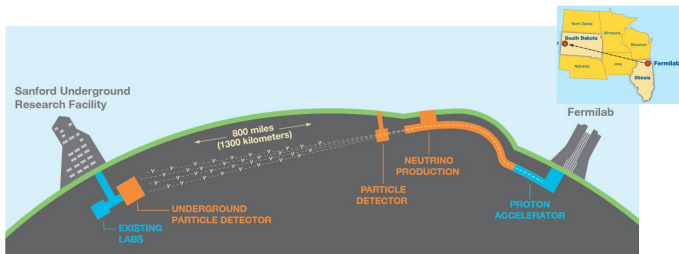
Hyper-Kamiokande au Japon

Successeur de Super-Kamiokande et amélioration de T2K → T2HK

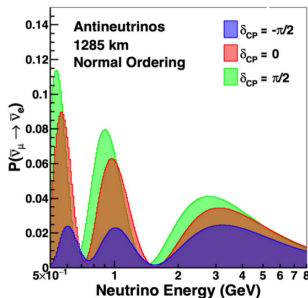


DUNE aux USA

L'expérience ultime de mesure d'oscillation de neutrinos en 2030



Eur. Phys. J. C (2020) 80:978



Eur. Phys. J. C (2020) 80:978

Résumé et conclusion

- Nous avons détaillé les différentes sources de neutrinos que l'on peut détecter sur Terre.
- Dès les années 70, un déficit d'environ 30% de neutrinos solaires est découvert.
- On observe également un déficit de neutrino atmosphériques muoniques traversant la Terre (expérience Super-Kamiokande).
- L'expérience SNO a montré qu'il y a un changement de saveurs (e, μ, τ) lors de la propagation des neutrinos.
- On appelle ce phénomène l'oscillation de saveur des neutrinos.
- Le télescope KM3NeT a détecté le neutrino le plus énergétique jamais observé.
- Nous avons présenté quelques résultats récents d'expériences d'oscillations de neutrinos.

Ressources

- Lecture du livre (en anglais) de Franck Close - *Neutrino* - Oxford Press Libri - 2012
- <https://www.cnrs.fr/fr/presse/premiere-detection-dun-neutrino-dultra-haute-energie>
- <https://lejournel.cnrs.fr/articles/un-neutrino-eblouit-lastrophysique>
- <https://www.pourlascience.fr/sd/physique-particules/un-neutrino-flashe-avec-une-energie-record-au-fond-de-la-mediterranee-27447.php>
- <https://www.youtube.com/playlist?list=PLtLLbuEpXFoEwVvSDDf8H>