

Oscillation de saveur des neutrinos

École de physique Subatomique de printemps - Subatech

Mathieu BONGRAND
mathieu.bongrand@in2p3.fr

23 mai 2025



Table des matières

Introduction à la mécanique quantique

Oscillations des neutrinos à deux saveurs

Oscillations des neutrinos à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Masses des neutrinos

Table des matières

Introduction à la mécanique quantique

Oscillations des neutrinos à deux saveurs

Oscillations des neutrinos à trois saveurs

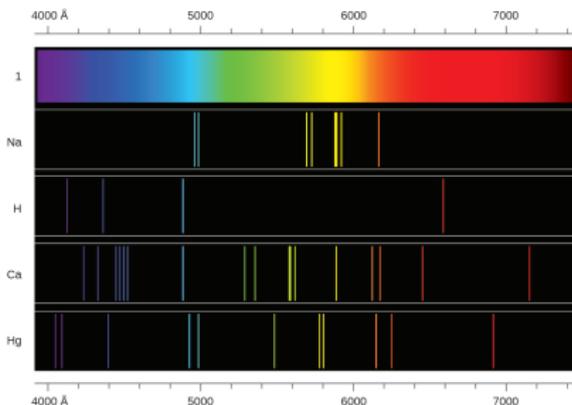
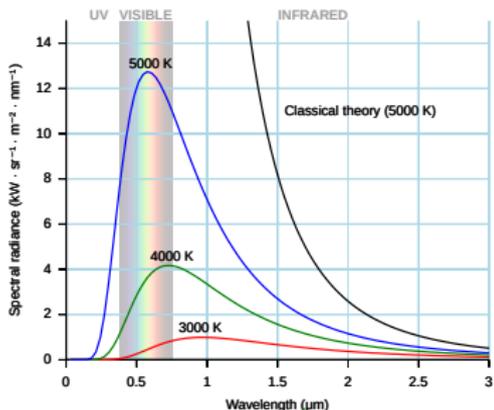
Principaux résultats expérimentaux

Masses des neutrinos

Naissance de la mécanique quantique

La mécanique quantique est née au début du 20^{ème} siècle, pour expliquer de nouveaux phénomènes non classiques :

- **Le spectre d'émission du corps noir** (M. Planck 1900) : l'énergie est rayonnée sous forme de quanta de lumière $E = h\nu$.
- **L'effet photoélectrique** (H. Hertz 1887 - A. Einstein 1905) : l'émission d'électrons par un métal soumis à un éclairage, ne se produit qu'au delà d'un seuil en fréquence $E_e = h\nu - W$ et ne dépend pas de l'intensité ou de la durée.
- **Les raies spectrales** des atomes sont expliquées par le modèle de l'atome de N. Bohr en 1913, qui prédit les raies de l'hydrogène.



Naissance de la mécanique quantique (suite)

Après les années 1925, il y a une véritable explosion des développements théoriques de la mécanique quantique grâce aux travaux de L. de Broglie, W. Pauli, N. Bohr, W. Heisenberg, P. Jordan, M. Born, E. Schrödinger, D. Hilbert, P. Dirac et d'autres.

L'idée de certitude ou de déterminisme présente en mécanique classique (l'évolution d'un système est prédite à partir des conditions initiales) est abandonnée. Seul un effet moyen peut être anticipé sur un très grand nombre de mesures. Nous pouvons seulement déterminer la **probabilité des résultats**.

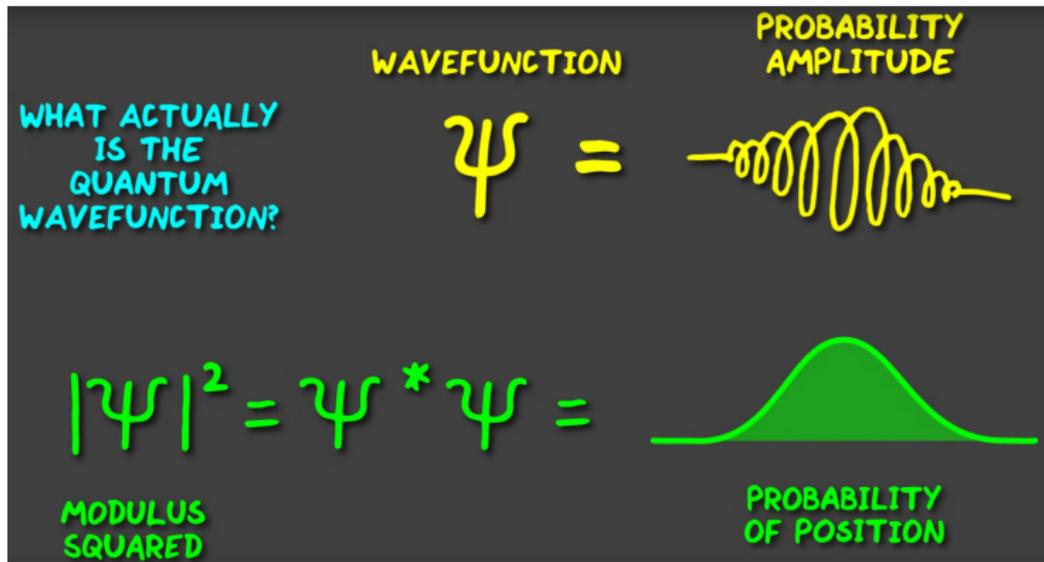
Toute mesure effectuée sur un système quantique produit un **résultat aléatoire**. Par exemple, chaque mesure de la position d'un électron dans un atome d'hydrogène donne un résultat différent. Mais en répétant un grand nombre de mesures, on trace la carte de probabilité de présence de l'électron, la **fonction d'onde Ψ** .

Serge Haroche (médaille d'or CNRS 2009 - prix Nobel de Physique 2012) :

https://youtu.be/gQCQ48I81JQ?si=pct9vDWyBIJQ_zda

La fonction d'onde

La fonction d'onde ne se propage pas dans un milieu (son dans l'air, onde à la surface de l'eau) et ne peut pas être mesurée directement, mais elle décrit le comportement de la particule.

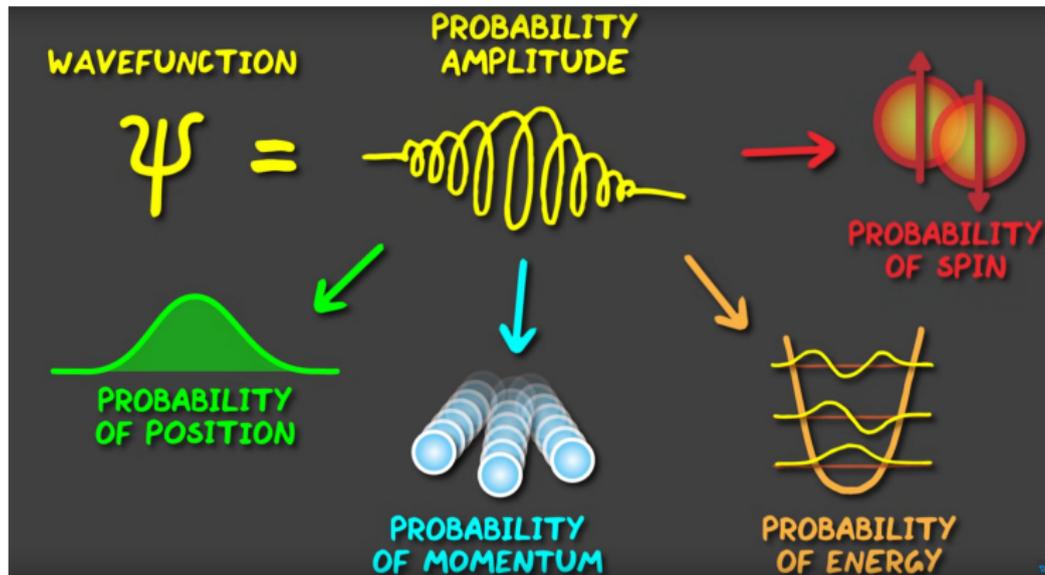


The Quantum Wavefunction Explained - Domain of Science -

https://www.youtube.com/watch?v=sOI4DIWQ_1w

Les observables d'un système

Toutes les quantités mesurables d'un système (position, spin, énergie...) sont appelées **observables** et sont représentées par des **opérateurs** agissant sur la fonction d'onde.



The Quantum Wavefunction Explained - Domain of Science -

https://www.youtube.com/watch?v=sOI4DIWQ_1w

Notion d'états quantique

Afin de formaliser l'incertitude inhérente à la mécanique quantique, on recourt à la notion d'**état quantique**, représenté par un vecteur d'état dans un espace de Hilbert (espace vectoriel complexe).

L'état quantique d'un système est décrit par un **vecteur** $|\Psi\rangle$ qui contient toutes les informations du système et les probabilités des différentes mesures (position, moment cinétique, spin...).

L'équation de Schrödinger prédit l'évolution temporelle :

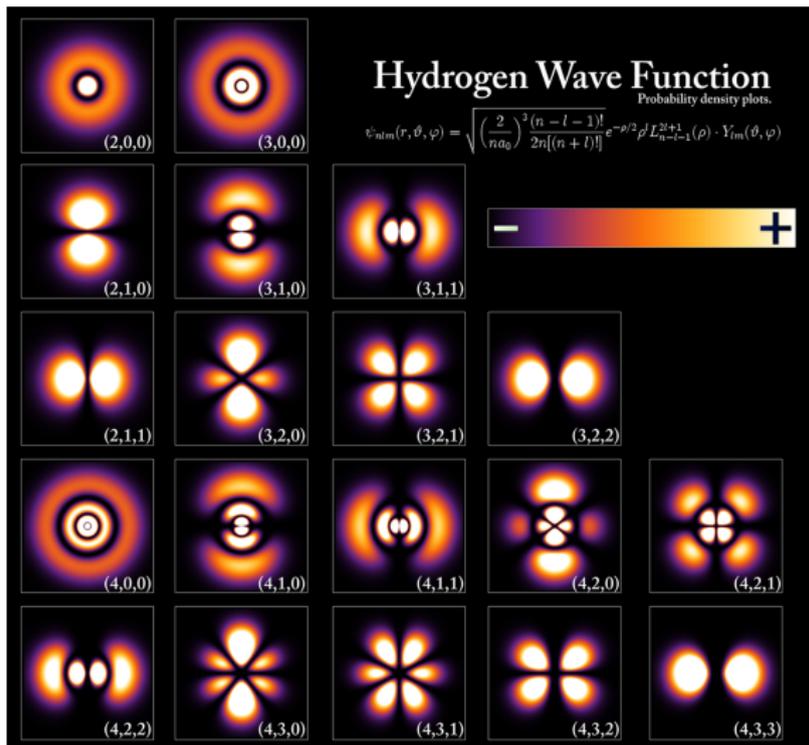
$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H} |\Psi(t)\rangle$$

où \hat{H} est l'Hamiltonien qui décrit l'énergie totale du système.

On peut par exemple décomposer un vecteur d'état sur la base des positions $|\mathbf{r}\rangle$ en décrivant la fonction d'onde $\Psi(\mathbf{r}, t) = \langle \mathbf{r} | \Psi \rangle$.

La densité de probabilité est $P(\mathbf{r}, t) = |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 = |\langle \mathbf{r} | \Psi \rangle|^2$.

Exemple de l'atome d'hydrogène



Simulation des orbitales de l'électron dans l'atome d'hydrogène en fonction des trois nombres quantiques (n, l, m_l) .

Superposition d'états quantique

L'un des principes fondamentaux de la physique quantique est la **superposition quantique des états**, qui signifie qu'un système quantique peut exister dans plusieurs états simultanément.

Mathématiquement, cela se traduit par la **combinaison linéaire des vecteurs d'état** possibles dans l'espace de Hilbert. Par exemple, pour un système à deux états possibles $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$, l'état quantique total peut être décomposé comme :

$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$$

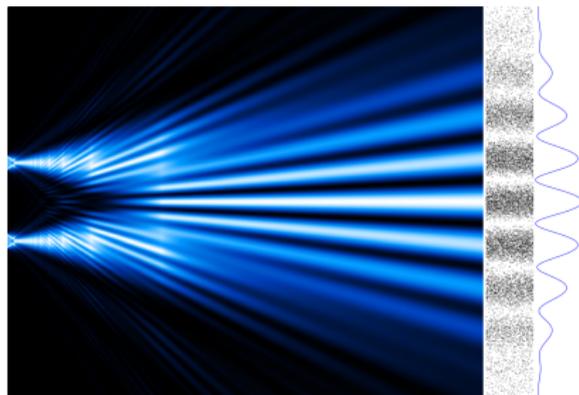
où c_1 et c_2 sont des coefficients complexes, tels que $c_1^2 + c_2^2 = 1$.

$|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ sont des solutions de l'équation de Schrödinger, donc $|\psi\rangle$ l'est également.

Superposition d'états quantique (suite)

Une conséquence de la superposition est la possibilité de former des **interférences quantiques** : deux états peuvent se combiner et former un motif d'interférences.

Les interférences des fentes de Young en 1801 s'expliquaient déjà par le caractère ondulatoire de la lumière, mais le même phénomène peut être observé avec des électrons par exemple !



Simulation de l'expérience des fentes de Young avec des électrons, qui sont dans une superposition d'états quantiques et passent à la fois à travers les deux fentes sans choisir.

Table des matières

Introduction à la mécanique quantique

Oscillations des neutrinos à deux saveurs

Oscillations des neutrinos à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Masses des neutrinos

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 .

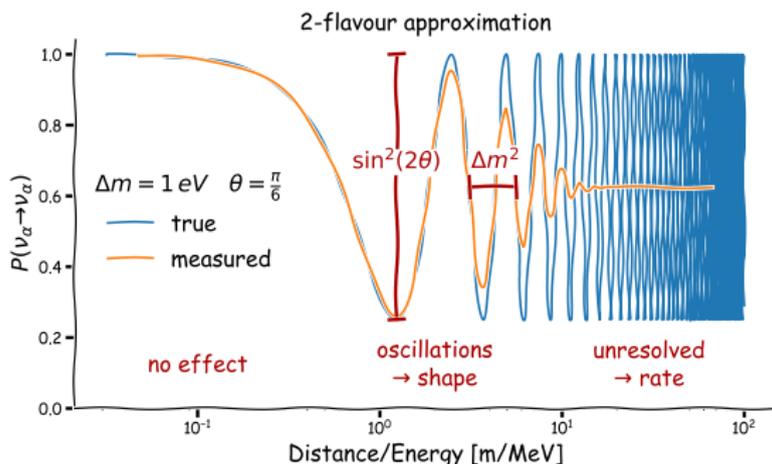


Illustration de la probabilité de disparition de neutrinos de saveur ν_α en fonction du rapport L/E [S. Böser et al., 2019].

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

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.

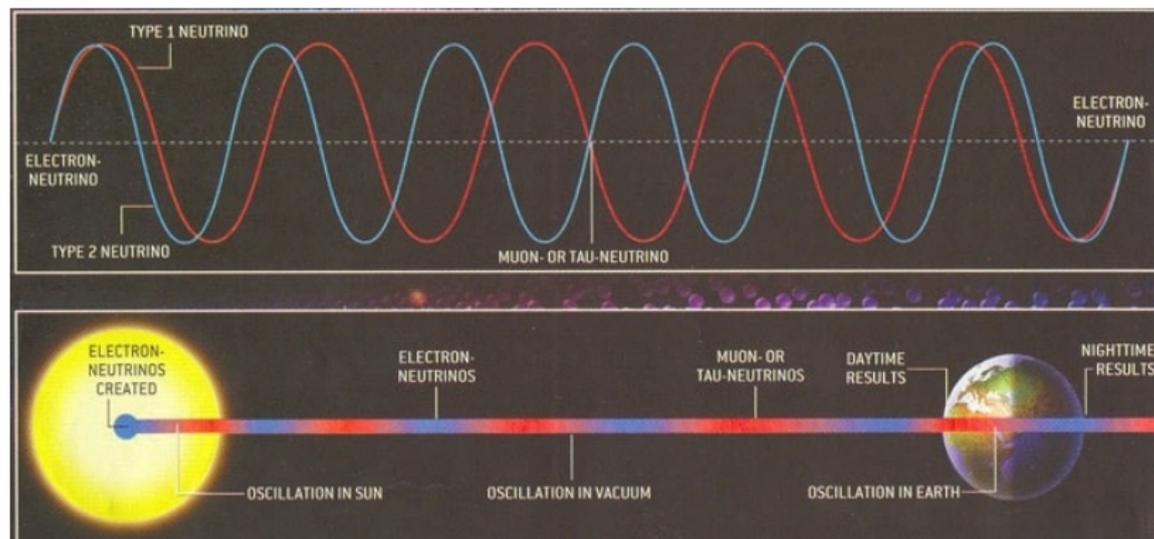


Illustration de l'oscillation des neutrinos solaires sur Terre.

Table des matières

Introduction à la mécanique quantique

Oscillations des neutrinos à deux saveurs

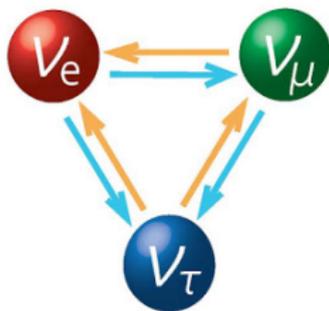
Oscillations des neutrinos à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Masses des neutrinos

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

Probabilité d'oscillation

La matrice de mélange permet de quantifier les probabilités de transition entre les différents états de saveur et de masse. On peut ainsi décrire un état propre de saveur lors de sa création selon sa décomposition sur la base des états propres de masse :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad \text{et réciproquement} \quad |\nu_i\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha i}^* |\nu_\alpha\rangle$$

L'évolution dans le temps de chaque état propre de masse est décrite par une onde plane, solution de l'équation de Schrödinger :

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-i(E_i t - \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{x})} |\nu_i\rangle$$

Cette décomposition permet alors de déterminer la probabilité de transition d'un neutrino vers une nouvelle saveur :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 = \left| \sum_i U_{\beta i}^* U_{\alpha i} e^{-i(E_i t - \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{x})} \right|^2$$

Probabilité d'oscillation (suite)

Comme les masses des neutrinos sont très faibles et peu différentes entre elles, on peut faire les approximations :

$$E_i = \sqrt{m_i^2 + p_i^2} \approx E + m_i^2/2E \quad \text{et} \quad p_i \approx E$$

Les neutrinos se propageant pratiquement à la vitesse de la lumière c , on peut remplacer le temps t et la position x par la distance parcourue L (unités naturelles $c = 1$) :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \left| \sum_i U_{\beta i}^* U_{\alpha i} \exp \left(-i \frac{m_i^2 L}{2 E} \right) \right|^2$$

Qui produit un **terme d'interférence** en $\exp \left(-i \frac{\Delta m_{ji}^2 L}{2 E} \right)$, qui fait apparaître la différence de masse au carré $\Delta m_{ji}^2 = m_j^2 - m_i^2$.

On appelle $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ la **probabilité d'apparition** et $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ **probabilité de survie**.

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 rotations :

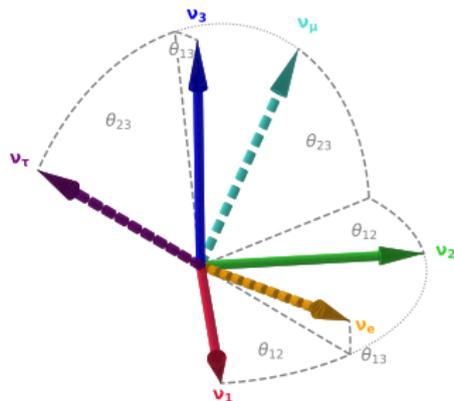


Illustration des angles de mélange des neutrinos et du changement entre les états propres de masse et de saveur [S. Böser et al., 2019].

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

Introduction à la mécanique quantique

Oscillations des neutrinos à deux saveurs

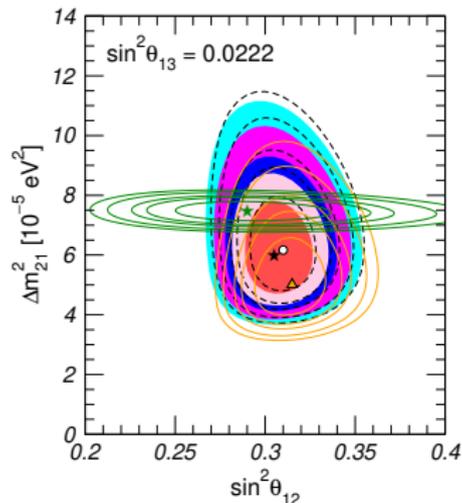
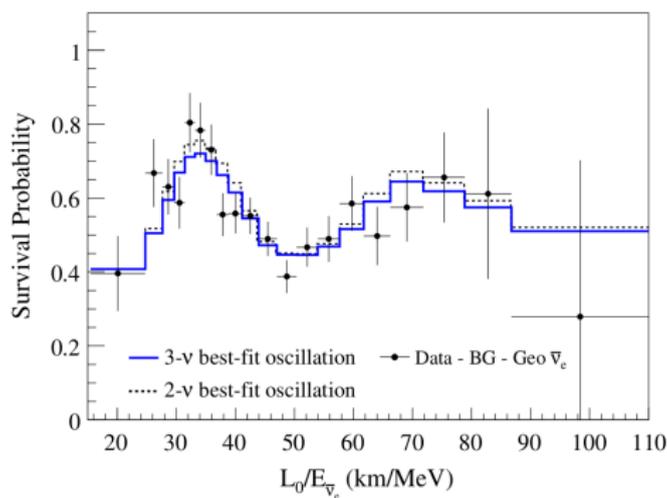
Oscillations des neutrinos à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Masses des neutrinos

KamLAND au Japon - 2011

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.

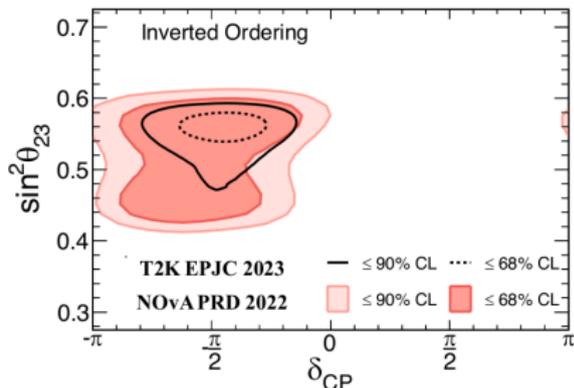
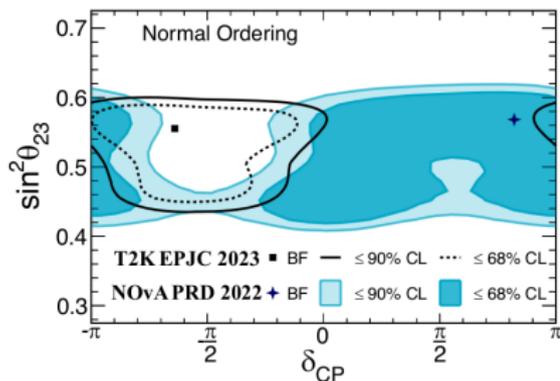
Résultats sur les neutrinos atmosphérique - 2023

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

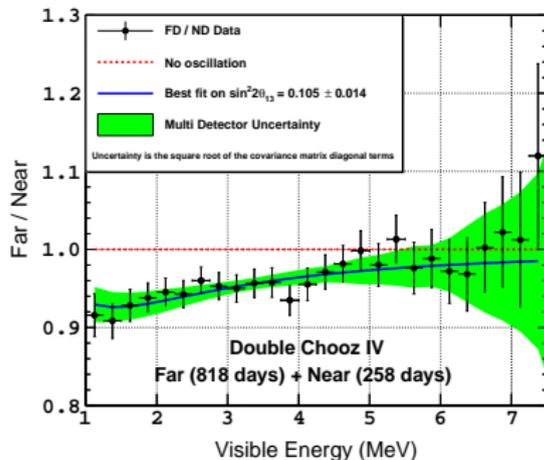
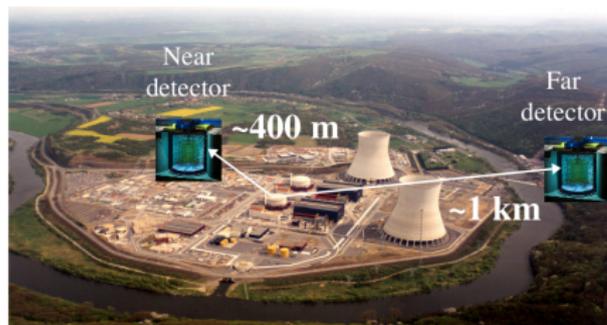


Résultat commun de T2K et NOvA sur l'angle θ_{23} et la violation de CP .

L'expérience Double Chooz en France - 2019

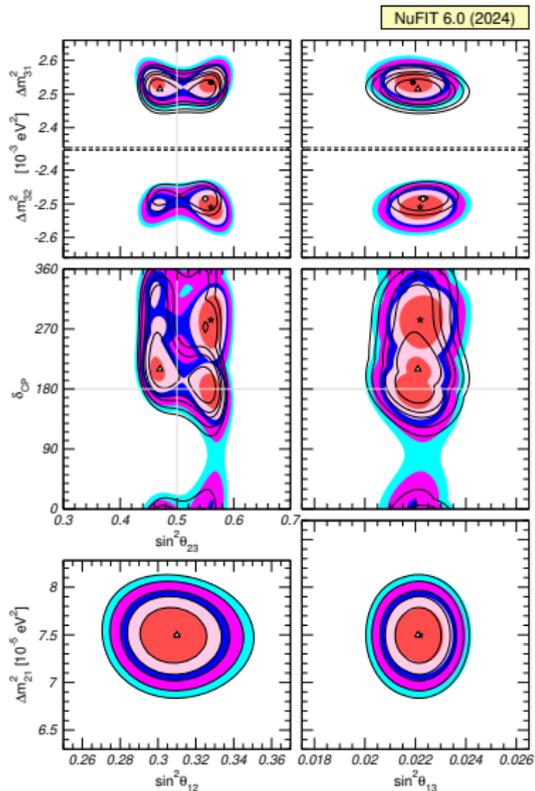
Le dernier paramètre à avoir été mesuré est l'angle de mélange θ_{13} , qui est plus faible que les autres.

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.

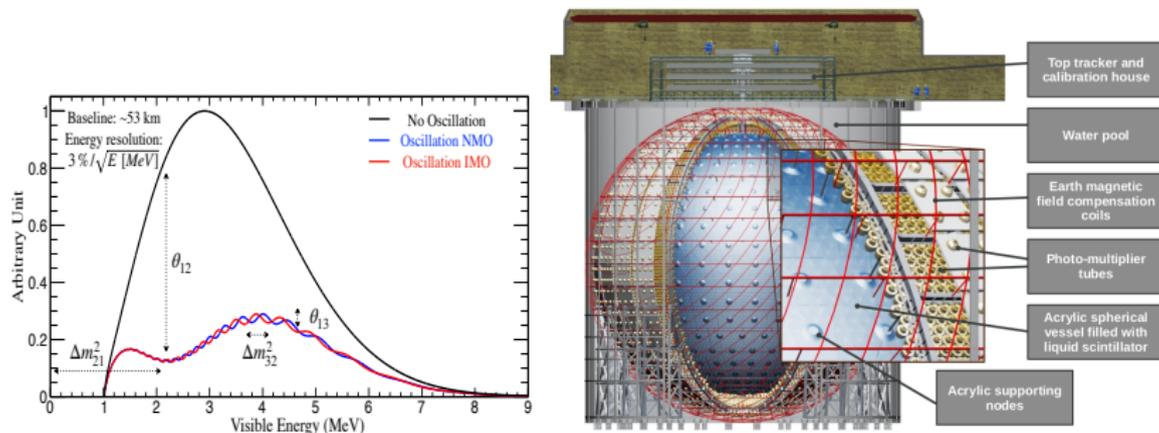
Résumé des résultats mondiaux - NuFit - 2024



| | | Normal Ordering ($\Delta\chi^2 = 0.6$) | | Inverted Ordering (best fit) | | |
|--|--|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| | | bfp $\pm 1\sigma$ | 3σ range | bfp $\pm 1\sigma$ | 3σ range | |
| IC19 without SK atmospheric data | $\sin^2 \theta_{12}$ | $0.307^{+0.012}_{-0.011}$ | 0.275 → 0.345 | $0.308^{+0.012}_{-0.011}$ | 0.275 → 0.345 | |
| | $\theta_{12}/^\circ$ | $33.68^{+0.73}_{-0.70}$ | 31.63 → 35.95 | $33.68^{+0.73}_{-0.70}$ | 31.63 → 35.95 | |
| | $\sin^2 \theta_{23}$ | $0.561^{+0.012}_{-0.015}$ | 0.430 → 0.596 | $0.562^{+0.012}_{-0.015}$ | 0.437 → 0.597 | |
| | $\theta_{23}/^\circ$ | $48.5^{+0.7}_{-0.9}$ | 41.0 → 50.5 | $48.6^{+0.7}_{-0.9}$ | 41.4 → 50.6 | |
| | $\sin^2 \theta_{13}$ | $0.02195^{+0.00054}_{-0.00058}$ | 0.02023 → 0.02376 | $0.02224^{+0.00056}_{-0.00057}$ | 0.02053 → 0.02397 | |
| | $\theta_{13}/^\circ$ | $8.52^{+0.11}_{-0.11}$ | 8.18 → 8.87 | $8.58^{+0.11}_{-0.11}$ | 8.24 → 8.91 | |
| | $\delta_{CP}/^\circ$ | 177^{+19}_{-20} | 96 → 422 | 285^{+25}_{-28} | 201 → 348 | |
| | $\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$ | $7.49^{+0.19}_{-0.19}$ | 6.92 → 8.05 | $7.49^{+0.19}_{-0.19}$ | 6.92 → 8.05 | |
| | $\frac{\Delta m_{32}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$ | $+2.534^{+0.025}_{-0.023}$ | +2.463 → +2.606 | $-2.510^{+0.024}_{-0.025}$ | -2.584 → -2.438 | |
| | IC23 with SK atmospheric data | | | Normal Ordering (best fit) | | Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 6.1$) |
| | | bfp $\pm 1\sigma$ | 3σ range | bfp $\pm 1\sigma$ | 3σ range | |
| $\sin^2 \theta_{12}$ | | | $0.308^{+0.012}_{-0.011}$ | 0.275 → 0.345 | $0.308^{+0.012}_{-0.011}$ | 0.275 → 0.345 |
| $\theta_{12}/^\circ$ | | | $33.68^{+0.73}_{-0.70}$ | 31.63 → 35.95 | $33.68^{+0.73}_{-0.70}$ | 31.63 → 35.95 |
| $\sin^2 \theta_{23}$ | | | $0.470^{+0.017}_{-0.015}$ | 0.435 → 0.585 | $0.550^{+0.012}_{-0.015}$ | 0.440 → 0.584 |
| $\theta_{23}/^\circ$ | | | $43.3^{+1.0}_{-0.8}$ | 41.3 → 49.9 | $47.9^{+0.7}_{-0.9}$ | 41.5 → 49.8 |
| $\sin^2 \theta_{13}$ | | | $0.02215^{+0.00056}_{-0.00058}$ | 0.02030 → 0.02388 | $0.02231^{+0.00056}_{-0.00056}$ | 0.02060 → 0.02409 |
| $\theta_{13}/^\circ$ | | | $8.56^{+0.11}_{-0.11}$ | 8.19 → 8.89 | $8.59^{+0.11}_{-0.11}$ | 8.25 → 8.93 |
| $\delta_{CP}/^\circ$ | | | 212^{+26}_{-41} | 124 → 364 | 274^{+22}_{-25} | 201 → 335 |
| $\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$ | | | $7.49^{+0.19}_{-0.19}$ | 6.92 → 8.05 | $7.49^{+0.19}_{-0.19}$ | 6.92 → 8.05 |
| $\frac{\Delta m_{32}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$ | | $+2.513^{+0.021}_{-0.019}$ | +2.451 → +2.578 | $-2.484^{+0.020}_{-0.020}$ | -2.547 → -2.421 | |

JUNO en Chine - 2025

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



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 - 2025

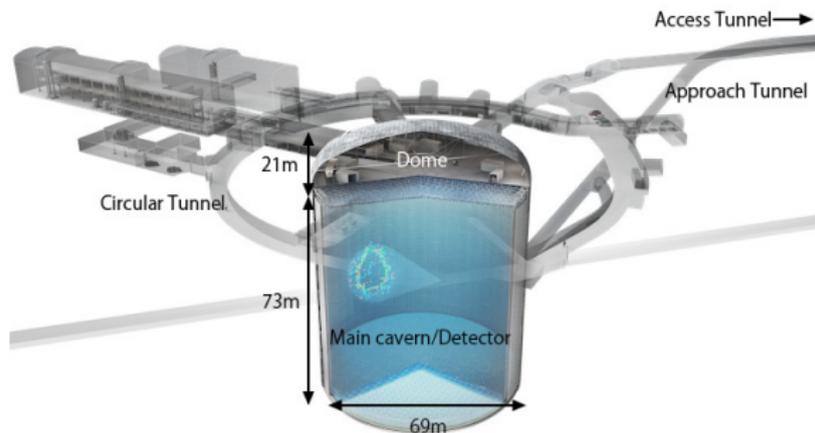
La construction du détecteur s'est achevée en 2024 et le remplissage en liquide scintillant est en cours.



Les premières détections de neutrinos vont commencer cet été.

Hyper-Kamiokande au Japon - 2028

Successeur de Super-Kamiokande et amélioration de T2K → T2HK



Résumé sur les oscillations de neutrinos

- La mécanique quantique à bouleversé notre compréhension des phénomènes physique au 20^{ème} siècle
- La superposition des états quantiques permet le mélange de trois saveur des neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ)
- L'oscillation des neutrinos le long de leur parcours permet d'expliquer les déficits de neutrinos solaires et atmosphériques
- Les expériences s'attellent maintenant à mesurer les paramètres de mélange ($\theta_{13}, \theta_{12}, \theta_{23}$), ($\Delta m_{13}^2, \Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2$) et δ_{CP}
- Ces paramètres sont connus à quelques pourcent aujourd'hui mais il reste à mesurer θ_{23} , l'ordre des masses ($m_1 < m_2 \ll m_3$ ou $m_3 \ll m_1 < m_2$) et δ_{CP}
- D'autres phénomènes physiques pourraient se manifester dans les mesures de précision d'oscillation de neutrinos

Table des matières

Introduction à la mécanique quantique

Oscillations des neutrinos à deux saveurs

Oscillations des neutrinos à trois saveurs

Principaux résultats expérimentaux

Masses des neutrinos

Contraintes des oscillations sur la masse des neutrinos

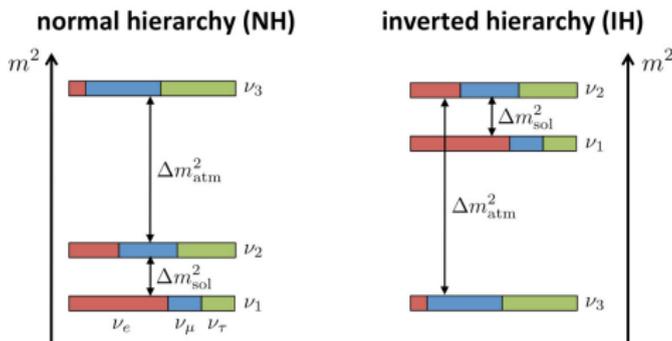
Nous avons vu que les mesures des expériences d'oscillations de neutrinos ont prouvées que **les neutrinos sont massifs** mais elles ne peuvent mesurer que la **différence des masses au carré**.

L'ordre des masses est encore inconnu :

$$(m_1 < m_2 \ll m_3) \text{ ou } (m_3 \ll m_1 < m_2)$$

$$\Delta m_{21}^2 = 7.49 \pm 0.19 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

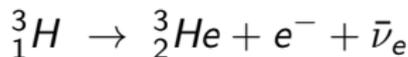
$$\Delta m_{32}^2 = +2.534_{-0.023}^{+0.025} \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ ou } \Delta m_{32}^2 = -2.510_{-0.025}^{+0.024} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$



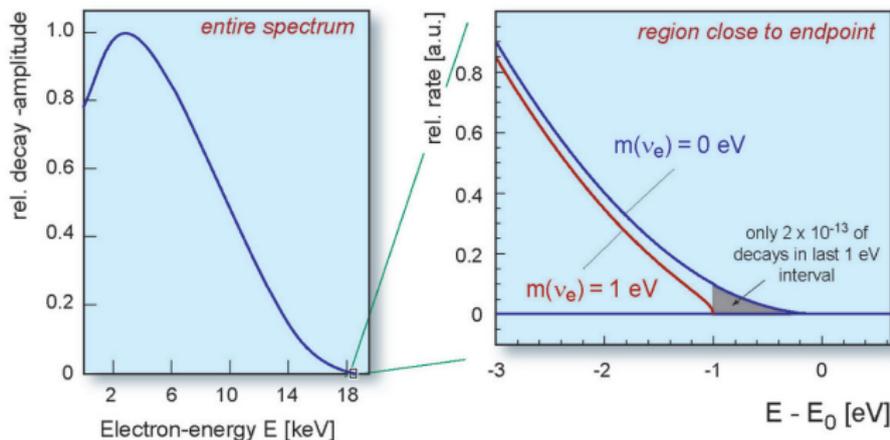
Mesure directe de la masse des neutrinos

L'extrémité du spectre en énergie des électrons émis lors de la désintégration bêta pourrait nous permettre de mesurer la masse des neutrinos, par le décalage du *point-final*.

On utilise par exemple la désintégration bêta β^- du tritium :



$$\tau_{1/2} = 12.32 \text{ ans et } Q_\beta = 18.592 \text{ keV}$$



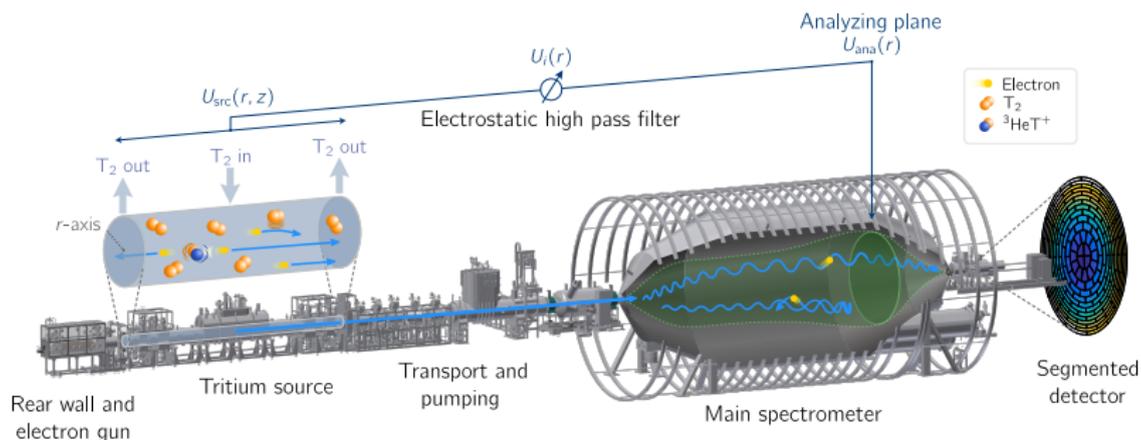
Katrin une expérience hors norme

The KARlsruhe TRItium Neutrino experiment (KATRIN)



Principe de Katrin

Les électrons émis par la source de tritium gazeuse de 100 GBq sont dirigés sur une ligne de 70 m à travers un spectromètre avant de déposer leur énergie dans le calorimètre segmenté.

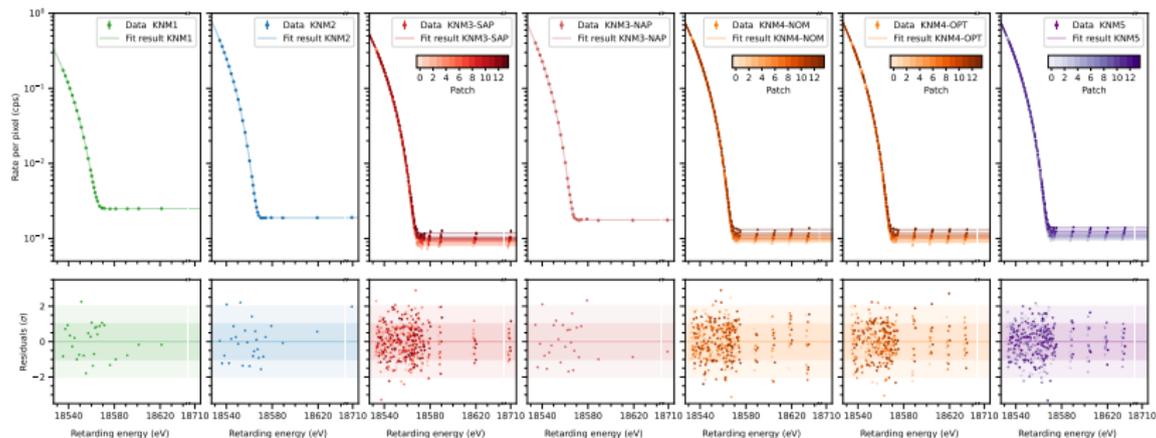


<https://www.pourlascience.fr/sd/physique-particules/masse-des-neutrinos-l-experience-katrin-resserre-l-etau-27675.php> - [arXiv:2406.13516]

Nouvelle limite directe de Katrin

En 2024, l'expérience a fourni son troisième résultat après 259 jours de mesure et 36×10^6 électrons détectés :

$$m_\nu < 0.45 \text{ eV (90\% CL)}$$



<https://www.pourlascience.fr/sd/physique-particules/masse-des-neutrinos-l-experience-katrin-resserre-l-etau-27675.php> - [arXiv:2406.13516]

Composants élémentaires de la matière



| | LEPTONS | | QUARKS | | BOSON de HIGGS H |
|--|----------------------------------|---------------|--------------------|-----------------------------|---|
| 1^{re} famille Constituants de la matière usuelle | ν_e neutrino électronique | e électron | u haut / up | d bas / down | <p>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.</p>  |
| 2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille | ν_μ neutrino muon | μ muon | c charm / charm | s étrange / strange | |
| 3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles | ν_τ neutrino tau | τ tau | t top | b beau / beauty / bottom | |

| INTERACTIONS FONDAMENTALES | | Bosons Z, W [±] | |
|--|---------------------|---|--|
| Portée | 10 ⁻¹⁷ m | Interaction faible | |
| | infinie | Interaction électromagnétique | |
| | 10 ⁻¹⁵ m | Interaction forte | |
| | infinie | Gravitation | |
| Chaque interaction fondamentale est transmise par des particules qui lui sont associées | | <p>Photon γ Électricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie</p> <p>Glueons g Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire</p> <p>Graviton (?) Gravité, pesantier, système solaire, galaxies</p> | |

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

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.

Être humain
1m

Terre
10⁷ m

Soleil
10⁹ m

Galaxie
10²¹ m

Composants élémentaires de la matière



Être humain
1m

seulement 3 saveurs de neutrino ?
existe-t'il un neutrino stérile ?

Terre
10^7 m

| | | | | |
|--|------------------------------|---------------|--------------------|----------------------------|
| 1 ^{re} famille Constituants de la matière usuelle | ν_e neutrino electron | e electron | u haut / up | d bas / down |
| 2 ^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille | ν_{μ} neutrino muon | μ muon | c charm / charm | s strange / strange |
| 3 ^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles | ν_{τ} neutrino tau | τ tau | t top | b bas / beauty / bottom |

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 déviation entre interactions électromagnétique et faible.

Soleil
10^9 m

pourquoi les masses des neutrinos sont si faibles ?

Galaxie
10^21 m



Champ de Higgs

Bosons Z, W[±]
Responsables de l'interaction faible et de certains noyaux instables

Photon γ
Électrisme, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie

Gluons
Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, interactions fortes, physique nucléaire

Graviton (?)
Gravitation

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

symétrie matière-antimatière ?

Chaque des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement de la matière. L'interaction électromagnétique est liée 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.

