

# Sources et oscillations de neutrinos

Mini-school - L2 Physique - Subatech

**Mathieu BONGRAND**

mathieu.bongrand@in2p3.fr

19 juin 2024



# Table des matières

## Sources de neutrinos

- Neutrinos solaires

- Neutrinos de supernova

- Neutrinos atmosphériques

- Neutrinos de réacteur nucléaire

## Oscillations de neutrinos

- Introduction à la mécanique quantique

- Oscillations à trois saveurs

- Oscillations à deux saveurs

- Principaux résultats expérimentaux

# Table des matières

## Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

## Oscillations de neutrinos

Introduction à la mécanique quantique

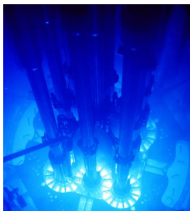
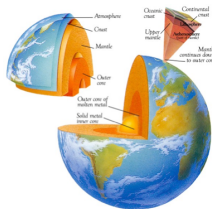
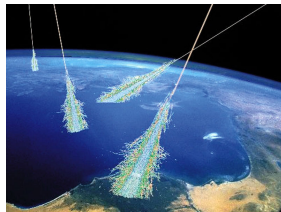
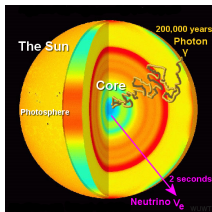
Oscillations à trois saveurs

Oscillations à deux saveurs

Principaux résultats expérimentaux

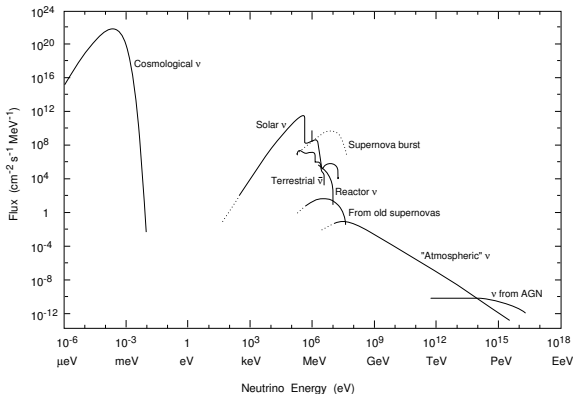
# Sources de neutrinos

Après la découverte du neutrino auprès des réacteurs nucléaires, des trois saveurs de neutrinos et des courants de l'interaction faible, les expérimentateurs ont cherché à détecter de nouvelles sources de neutrinos.



## Sources variées de 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.

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

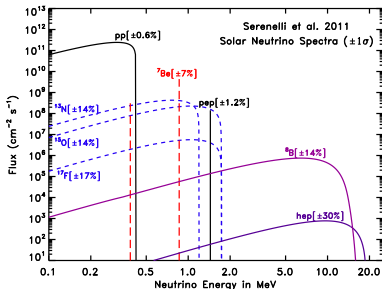
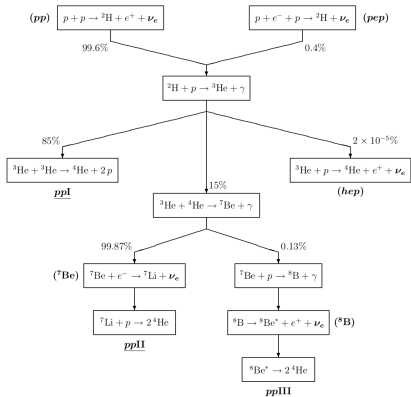
# Neutrinos solaires

Les chercheurs se sont alors 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 (chaînes  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ ).
- 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 dans les années 60 permet de prédire le flux de neutrinos solaires attendus sur Terre et leurs énergies.

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

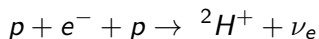
# Chaîne de fusion thermonucléaire et neutrinos solaires



Chaîne de fusion thermonucléaire au sein du Soleil produisant des neutrinos.  
Flux et énergie des neutrinos correspondants à chaque réaction.

## Exercice 10

**Exercice 10** : Calculer l'énergie (en eV) des neutrinos produits par la fusion proton-proton avec capture électronique 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).



## Exercice 10 (correction)

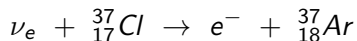
Le noyau produit est très lourd par rapport au neutrino, c'est donc ce dernier qui emportera toute l'énergie  $Q$  libérée par la réaction, sous forme d'énergie cinétique.

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

On peut d'ailleurs le constater sur la figure précédente.

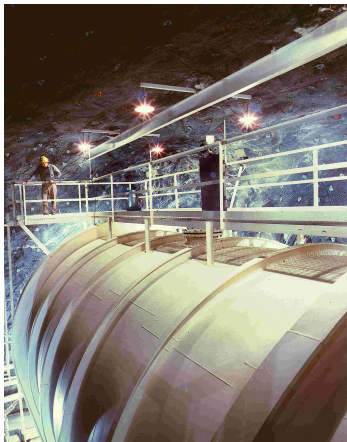
## Expérience Chlorine de R. Davis

- R. Davis, avait déjà essayé de détecter les neutrinos de réacteurs nucléaires sans savoir qu'il s'agissait d'anti-neutrinos, et que la réaction envisagée était impossible.
- Suivant une proposition de B. Pontecorvo, Davis chercha la réaction des neutrinos sur le chlore :

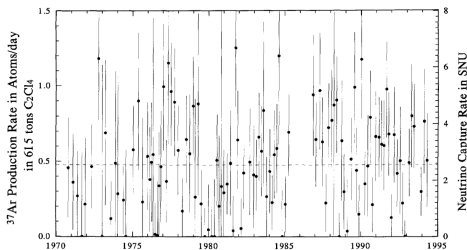


- Davis réunit environ 400 m<sup>3</sup> de C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> et construisit l'expérience Chlorine dans la mine à Homestake.
- L'argon produit étant un gaz rare, il peut être extrait par bullage d'hélium dans le détecteur.
- L'argon-37 étant radioactif ( $T_{1/2}^{ec} = 35 \text{ j}$ ) on peut l'accumuler dans un compteur et mesurer le nombre de décroissances.

# Résultats de l'expérience Chlorine



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



Tank contenant  $400 \text{ m}^3$  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 de l'énergie de fusion produite au cœur du Soleil 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 instrumenté par 13 000 PMTs qui permet de distinguer les neutrinos électroniques ou muoniques, grâce à l'effet Cherenkov.
- Installée dans la mine Kamioka au Japon.

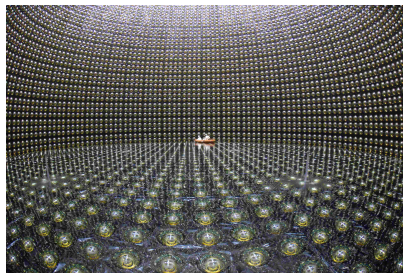
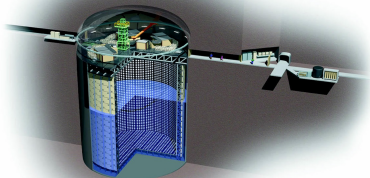
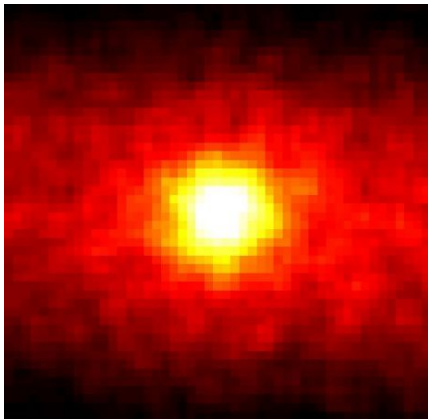
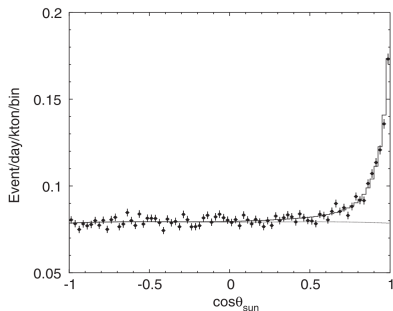


Schéma du détecteur Super-Kamiokande et photo prise lors de son remplissage.

## Détection par Super-Kamiokande

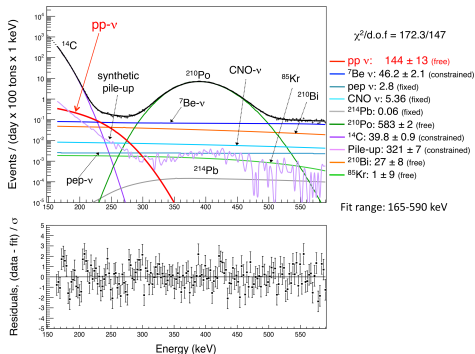
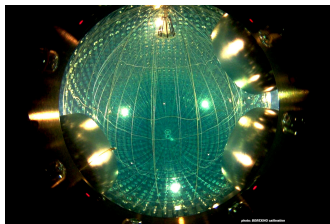
Elle s'est également intéressée aux neutrinos solaires mais le déficit d'environ 30% par rapport aux prédictions y a été confirmé.



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

# Neutrinos scolaires dans Borexino

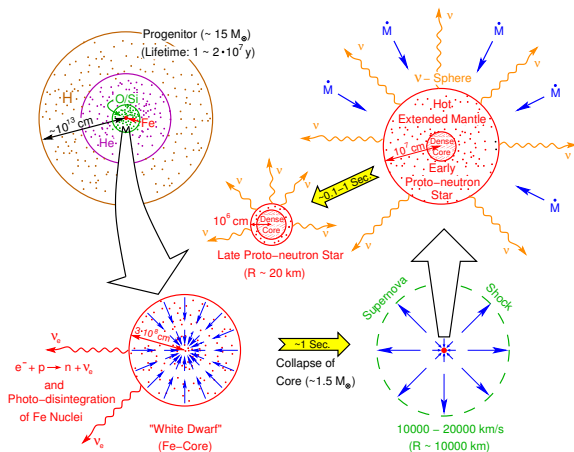
Avec 300 t de liquide scintillant et 2200 PMTs, l'expérience Borexino cherche les neutrinos solaires à très basse énergie.



Détection des différents neutrinos solaires dans l'expérience Borexino en Italie.

# Neutrinos de supernova

Lorsqu'une étoile massive a brûlé tout son combustible, on assiste à un effondrement de son cœur suivi de l'explosion de l'étoile : c'est une **supernova** [arXiv:1702.08713].

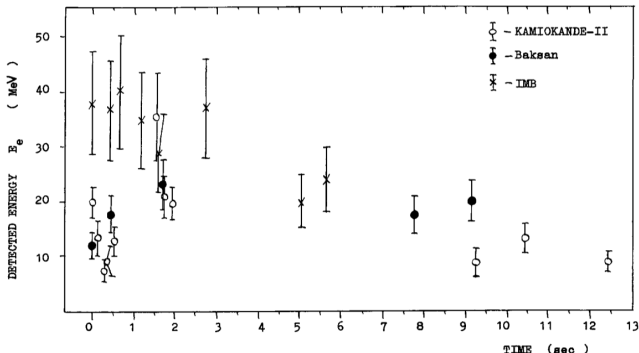


Mécanisme d'explosion d'une étoile massive, plus de 90% de son énergie gravitationnelle est émise sous forme de neutrinos.



## Neutrinos de la supernova SN1987a

En 1987, trois expériences sur Terre détectent en douze secondes 25 événements  $\bar{\nu}_e$  de 12.5 MeV d'énergie moyenne, provenant d'une supernova du grand nuage de Magellan à 50 kpc (163000 al).

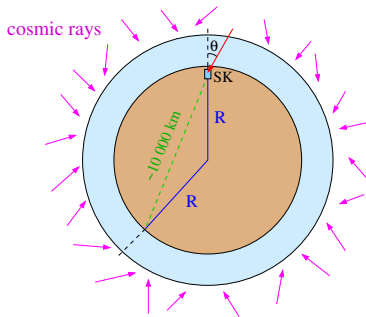
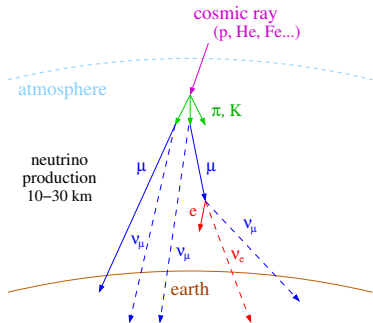


Détection des anti-neutrinos électroniques de la SN1987a par Baksan (0.2 kt), Kamiokande (2.1 kt) et IMB (6.8 kt).

De beaucoup plus grandes expériences attendent aujourd'hui la prochaine supernova.

# 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.

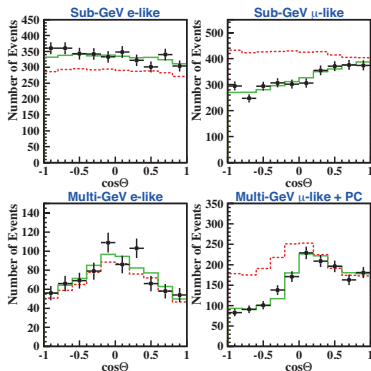


Production de neutrinos par les rayons cosmiques dans l'atmosphère.

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.

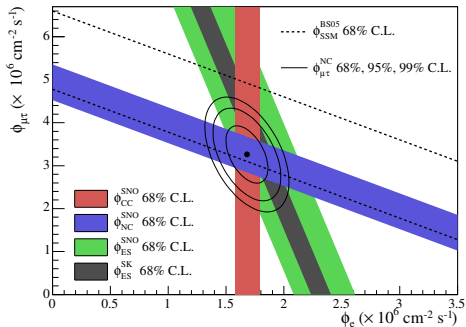
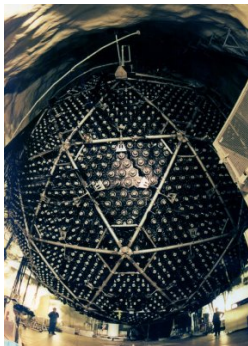
Est-ce que les neutrinos muoniques pourraient changer de saveur en traversant la Terre ?

# 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 ( $e, \mu, \tau$ ) de neutrino selon des réactions différentes :

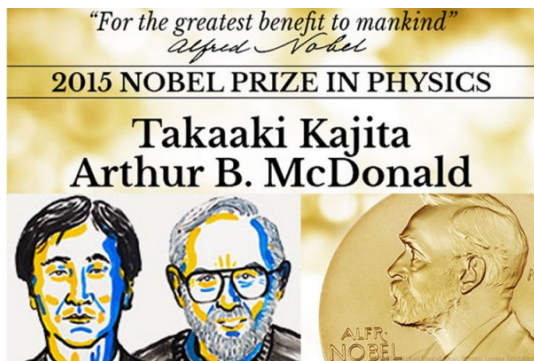
ES :  $\nu_\alpha e^- \rightarrow e^- \nu_\alpha$ , CC :  $\nu_e d \rightarrow p p e^-$  et NC :  $\nu_\alpha d \rightarrow p n \nu_\alpha$



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

# Prix Nobel de Physique 2015

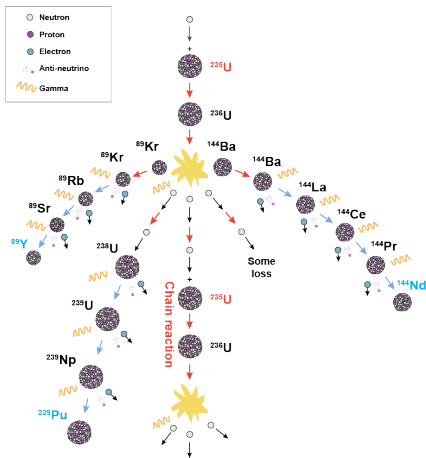
Les portes paroles des expériences Super-Kamiokande et SNO ont été récompensées du prix Nobel de Physique en 2015 pour la découverte des oscillations de neutrinos, qui prouvent que les neutrinos ont une masse.



# Production de neutrinos par fission

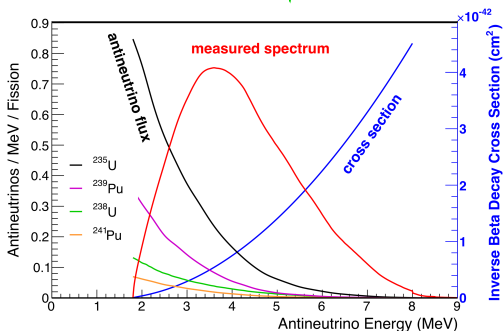
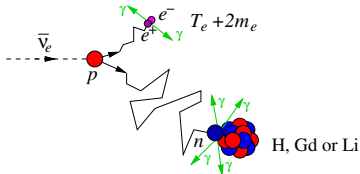
Comme nous l'avons déjà évoqué les neutrinos sont une source extrêmement intense et pure d'anti-neutrinos électroniques.

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



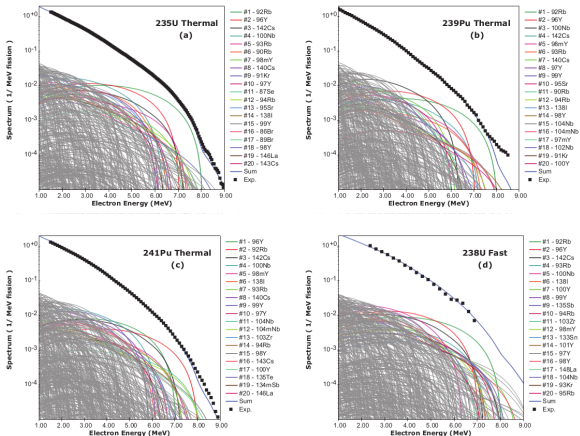
# Production de neutrinos par fission

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.

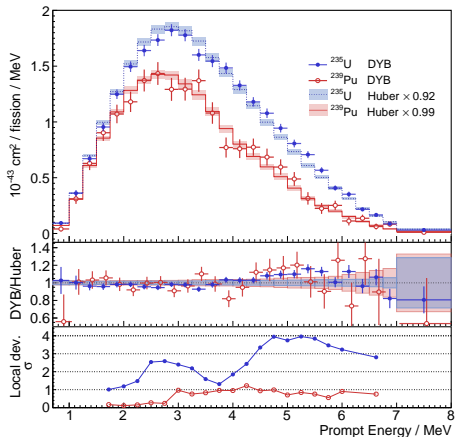


Sommation de  $4 \times 800$  fragments de fissions et plusieurs milliers de branches de désintégration bêta des 4 isotopes qui fissionnent dans le cœur du réacteur.



## Mesure du specter 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.

## 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 observé.
- On observe également un déficit de neutrino atmosphériques muoniques traversant la Terre.
- L'expérience SNO a montré qu'il y a un changement de saveurs ( $e, \mu, \tau$ ) lors de la propagation des neutrinos.
- On appelle ce phénomène l'oscillation de saveur des neutrinos que nous expliquerons au prochain cours.

# Table des matières

## Sources de neutrinos

- Neutrinos solaires

- Neutrinos de supernova

- Neutrinos atmosphériques

- Neutrinos de réacteur nucléaire

## Oscillations de neutrinos

- Introduction à la mécanique quantique

- Oscillations à trois saveurs

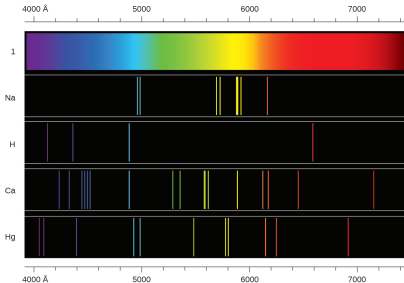
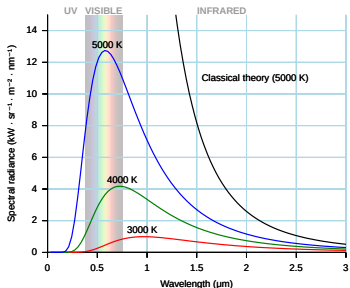
- Oscillations à deux saveurs

- Principaux résultats expérimentaux

# Naissance de la mécanique quantique

La mécanique quantique est née au début du 20<sup>ème</sup> 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* (A. Einstein 1905) : l'émission d'électrons par un métal soumis à des radiations lumineuses, qui 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 de l'éclairement.
- Les *raies spectrales* des atomes : 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, la position d'un électron dans un atome d'hydrogène, chaque mesure 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**.

Serge Haroche : [https://youtu.be/gQCQ48I81JQ?si=pct9vDWyBIJQ\\_zda](https://youtu.be/gQCQ48I81JQ?si=pct9vDWyBIJQ_zda)

## 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).

Les **observables** d'un système (position, spin, énergie...) sont représentées par des opérateurs agissant sur cet espace de Hilbert.

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 (probabilité de la position d'une particule, son moment cinétique ou son spin).

L'équation de Schrödinger prédit l'évolution temporelle d'un état :

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

Pour la position, on peut 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  $P(\mathbf{r}, t) = |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 = |\langle \mathbf{r} | \Psi \rangle|^2$ .

# 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 :

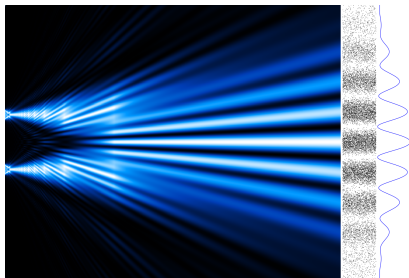
$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$$

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

## 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 !

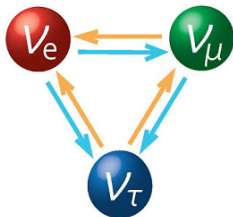


Simulation de l'expérience des fentes de Young avec des électrons, qui sont dans une superposition d'états quantiques et passent à la fois à travers les deux fentes sans choisir.



## Mélange des neutrinos

La mécanique quantique permet que les états propres de saveur des neutrinos ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) soient des superpositions des états propres de masse ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ).



Cette relation est encapsulée par 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.

## Oscillations à deux saveurs

Du point de vue expérimental, on peut souvent se contenter d'une approximation à deux saveurs de neutrinos. On peut alors réduire la matrice de mélange à une matrice de rotation, qui répond aux conditions d'unitarité et qui ne dépend plus que d'un seul paramètre, l'**angle de mélange**  $\theta$  :

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

On peut alors écrire la probabilité d'oscillation de la manière suivante :

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

$$\delta_{\alpha\beta} = 1 \text{ si } \alpha = \beta, \text{ sinon } \delta_{\alpha\beta} = 0$$

## Principe expérimental

Les expériences cherchent à mesurer les probabilités d'oscillation à une distance ou une énergie donnée afin de déterminer les paramètres  $\theta$  et  $\Delta m_{ji}^2$ .

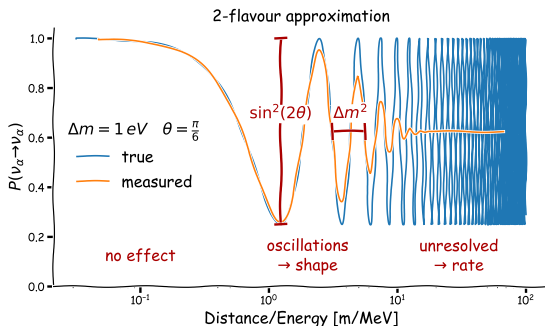


Illustration de la probabilité de disparition de neutrinos de saveur  $\nu_\alpha$  en fonction du rapport  $L/E$  [S. Böser et al., 2019].

L'amplitude des oscillations est gouvernée par l'angle  $\theta$  alors que la fréquence d'oscillation dépend de  $\Delta m_{ji}^2$ .

# 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 de saveur.

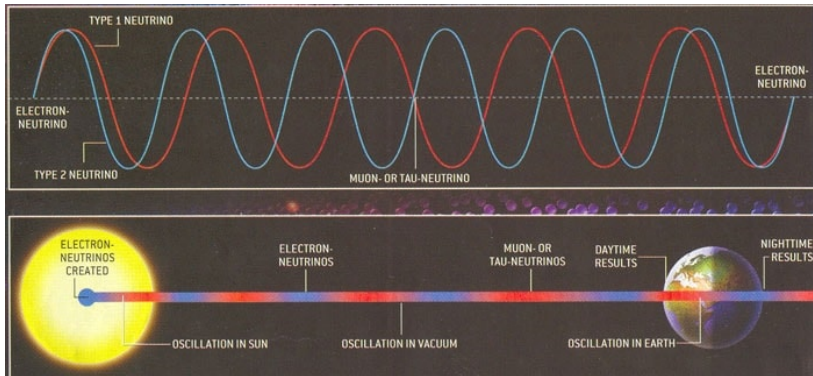


Illustration de l'oscillation des neutrinos solaires sur Terre.

## Retour à trois saveurs

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  $\theta_{ij}$  et une phase  $\delta$  de violation de  $CP$ , qui décrit une différence entre matière et anti-matière.

## Retour à trois saveurs (suite)

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

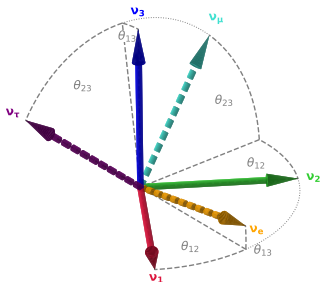


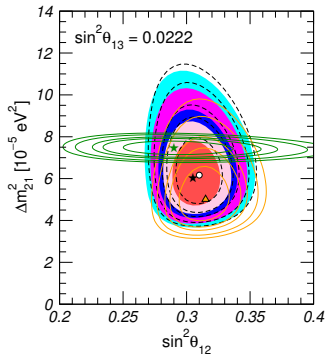
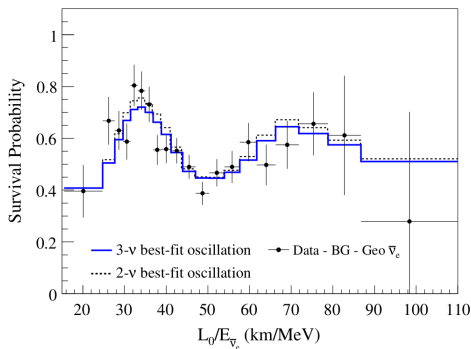
Illustration des angles de mélange des neutrinos et du changement entre les états propres de masse et de saveur [S. Böser et al., 2019].

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.



## KamLAND au Japon

L'expérience KamLAND au Japon a été construite pour étudier les paramètres 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.

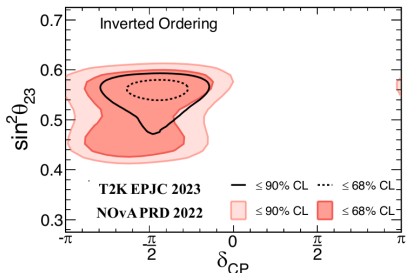
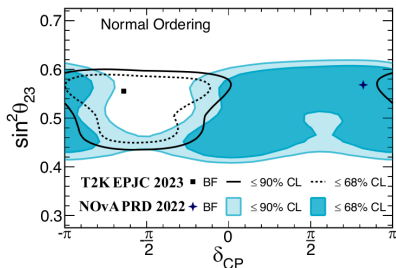
# Résultats sur les neutrinos atmosphérique

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

On mesure en parallèle la disparition de  $\nu_\mu$  et l'apparition de  $\nu_e$ .

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  $\delta$  de violation de  $CP$

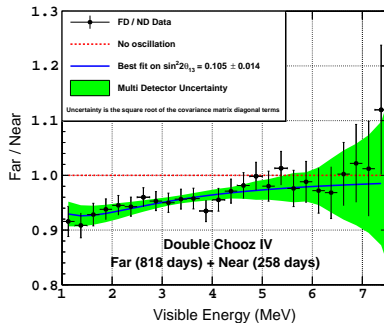
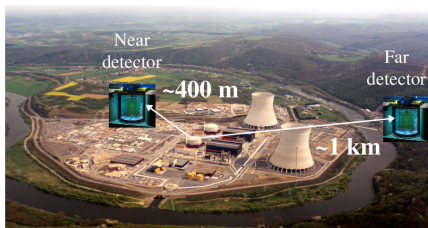


Résultat commun de T2K et NOvA sur l'angle  $\theta_{23}$  et la violation de  $CP$ .

# L'expérience Double Chooz en France

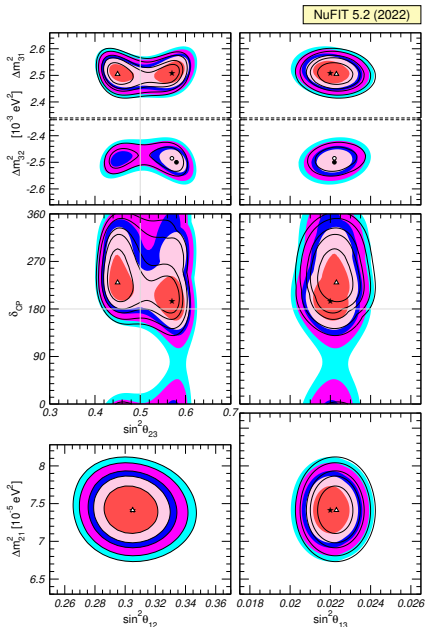
Le dernier paramètre à avoir été mesuré est l'angle de mélange  $\theta_{13}$ , qui est plus faible que les autres.

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



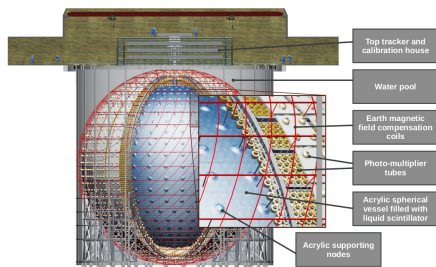
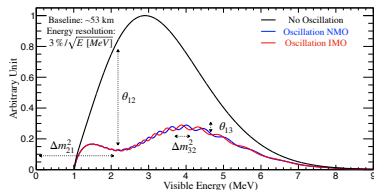
Principe de mesure d'oscillation des anti-neutrinos de réacteur avec deux détecteurs dans l'expérience Double Chooz.

# Résumé des résultats expérimentaux - NuFit



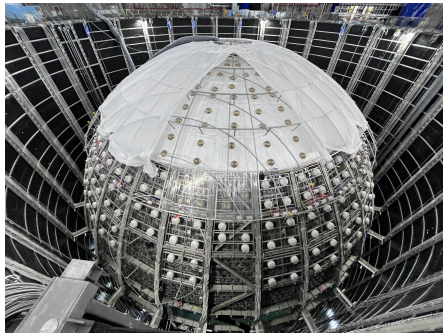
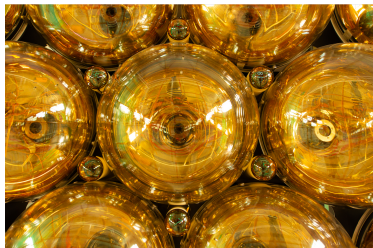
# JUNO en Chine

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



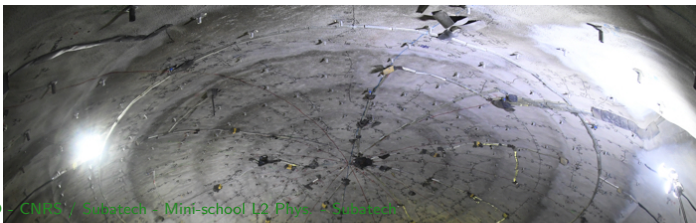
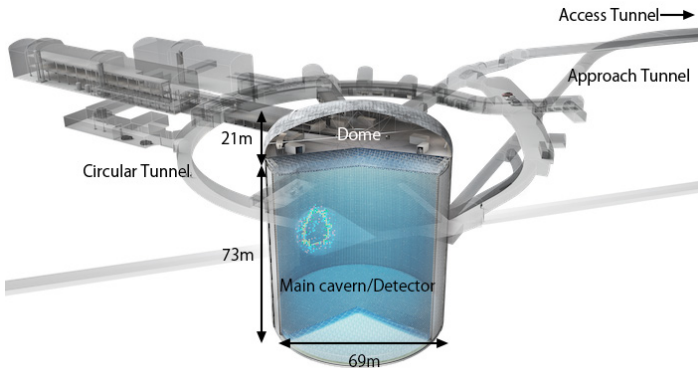
Principe de mesure de la double oscillation des anti-neutrinos de réacteur dans JUNO et schéma de l'immense détecteur.

# Photos de la construction de JUNO



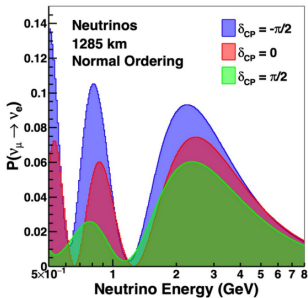
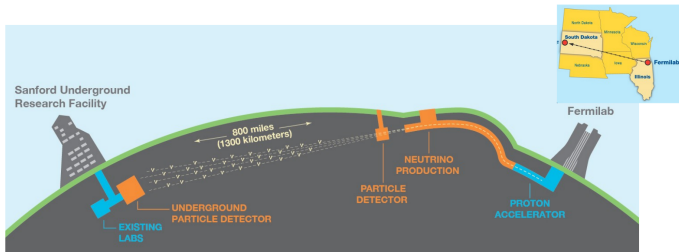
# Hyper-Kamiokande au Japon

Successeur de Super-Kamiokande et amélioration de T2K  $\rightarrow$  T2HK

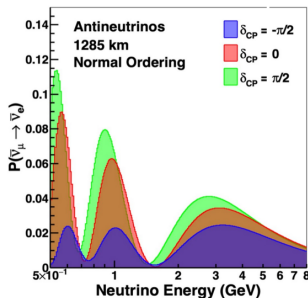


# DUNE aux USA

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



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



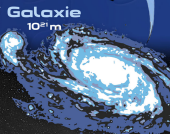
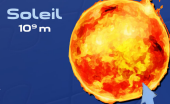
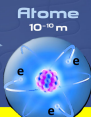
Eur. Phys. J. C (2020) 80:978



## Résumé et conclusion

- La mécanique quantique a bouleversé notre compréhension des phénomènes physiques au 20<sup>ème</sup> siècle
- La superposition des états quantiques permet le mélange de trois saveurs des neutrinos ( $e, \mu, \tau$ )
- 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  $\delta_{CP}$
- Ces paramètres sont connus à quelques pourcent aujourd'hui mais il reste à mesurer  $\theta_{23}$ , l'ordre des masses ( $m_1 < m_2 \ll m_3$  ou  $m_3 \ll m_1 < m_2$ ) et  $\delta_{CP}$
- D'autres phénomènes physiques pourraient se manifester dans les mesures de précision d'oscillation de neutrinos

# Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	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.
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charm / charm	s étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

## INTERACTIONS FONDAMENTALES



Champ de Higgs	
<b>Bosons Z, W<sup>±</sup></b>	Désintégrations radioactives (β <sup>-</sup> et β <sup>+</sup> ) de certains noyaux instables
<b>Photon γ</b>	Électricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
<b>Gluons g</b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

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

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.

# Composants élémentaires de la matière



Cellule  $10^{-6}$  m    Molécule  $10^{-9}$  m    Atome  $10^{-10}$  m    Noyau  $10^{-14}$  m    Proton  $10^{-16}$  m    Neutron  $10^{-16}$  m

Être humain  
1 m

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

Terre  
 $10^7$  m

1 <sup>re</sup> famille Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down
2 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charm / charm	s strange / strange
3 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ 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 séparation entre interactions électromagnétique et faible.



Soleil  
 $10^9$  m

pourquoi les masses des neutrinos sont si faibles ?



Bosons Z, W<sup>±</sup>

Photon  $\gamma$

Gluons

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

Galaxie  
 $10^{21}$  m

symétrie matière-antimatière ?

Chaque des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des galaxies, et en particulier dans 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.