

Désintégration bêta et neutrinos

École de printemps de Subatech - 2026

Mathieu BONGRAND

mathieu.bongrand@in2p3.fr

CNRS / Subatech

27 mai 2026



Table des matières

Introduction

- La découverte de la radioactivité

- Le besoin d'un neutrino

Les désintégrations bêta

- Les désintégrations bêta

- La réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

- L'expérience d'Hanford

- L'expérience de Savannah River

- Découverte des autres types de neutrinos

Mesure de la masse des neutrinos

- Principe de mesure

- L'expérience KATRIN

Double désintégration bêta

Table des matières

Introduction

La découverte de la radioactivité

Le besoin d'un neutrino

Les désintégrations bêta

Les désintégrations bêta

La réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

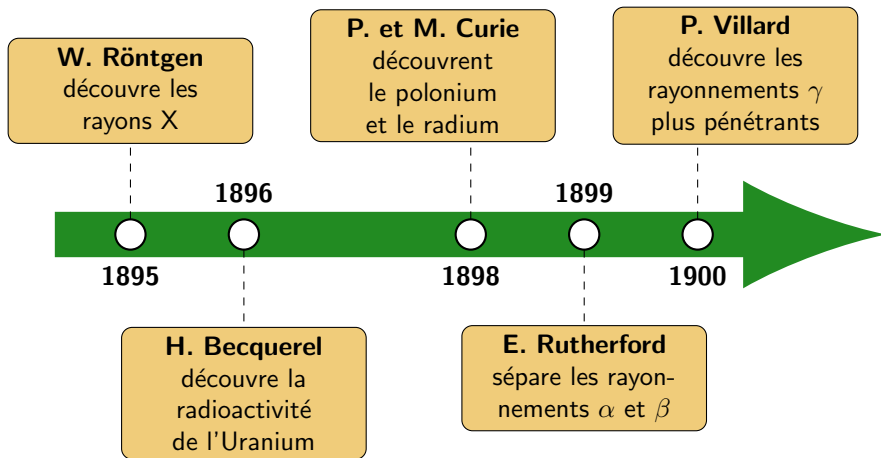
Mesure de la masse des neutrinos

Principe de mesure

L'expérience KATRIN

Double désintégration bêta

La découverte de la radioactivité

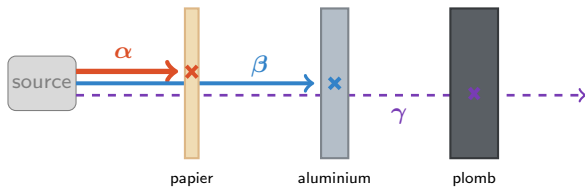


Pour en savoir plus, lire la biographie de Marie Curie :

<https://musee.curie.fr/decouvrir/la-famille-curie/biographie-de-marie-curie>

Les trois types de rayonnements radioactifs

Les scientifiques ont donc découvert trois types de rayonnements radioactifs : α , β , γ qui se différencient par leur pouvoir de pénétration dans la matière :



α : stoppés par une feuille de papier

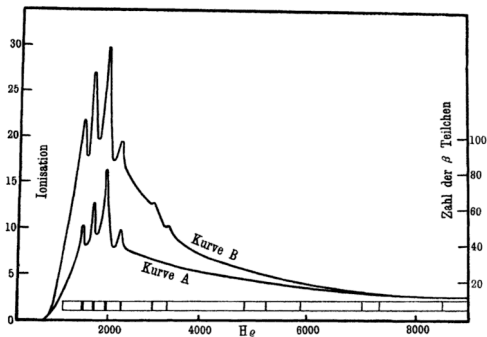
β : stoppés par une feuille d'aluminium

γ : atténués par une grande épaisseur de plomb

Le spectre en énergie de la désintégration β

Lors des premières études de la radioactivité, les scientifiques pensaient qu'un seul rayonnement était émis par la désintégration β , comme pour la radioactivité α et la désexcitation γ .

Cependant, les premières mesures du spectre en énergie de ces particules β montraient un **spectre en énergie continu** :



Énergie du rayonnement β mesuré par J. Chadwick en 1914.

L'hypothèse du neutrino

C'est une crise qui dura jusqu'en 1930, jusqu'à ce que W. Pauli propose **l'émission d'une particule supplémentaire** lors de la réaction, mais qui n'est pas détectée.

4th December, 1930,

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

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

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

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

Your humble servant,

W. Pauli

Table des matières

Introduction

La découverte de la radioactivité

Le besoin d'un neutrino

Les désintégrations bêta

Les désintégrations bêta

La réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

Mesure de la masse des neutrinos

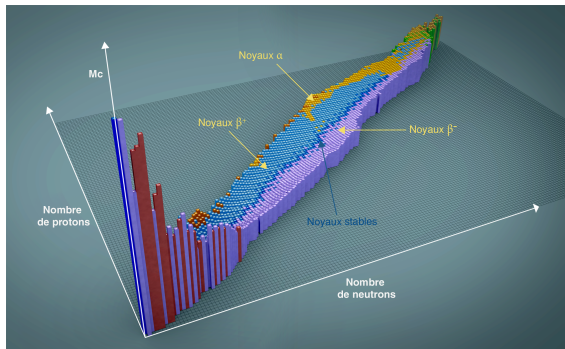
Principe de mesure

L'expérience KATRIN

Double désintégration bêta

La carte des noyaux

En classant les noyaux connus en fonction de leur nombre de protons Z et de neutrons N , et qu'on ajoute l'énergie de liaison sous forme d'un histogramme, on obtient un graphe en trois dimensions, qu'on appelle la **vallée de la stabilité**.

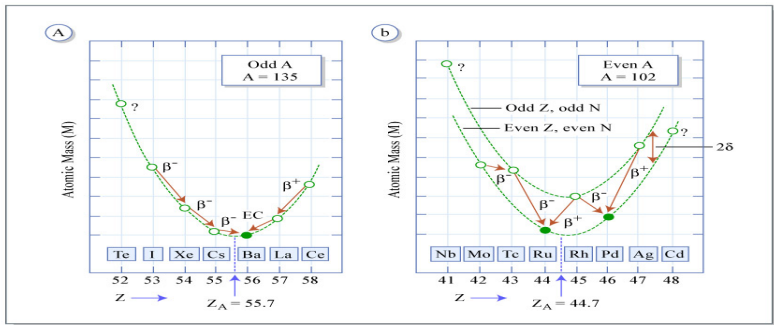


Page web du CEA à consulter :
<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-noyaux-des-atomes.aspx>

Désintégrations bêta moins

Les masses des noyaux isobares se répartissent en fonction de Z , sous forme de **paraboles de masse**. Les isotopes le long de ces courbes vont décroître vers les noyaux les plus stables.

Pour les nombres de masse pairs, la parabole est dédoublée à cause de l'énergie d'appariement des nucléons, qui apporte plus de stabilité si les protons et les neutrons sont regroupés par paires.



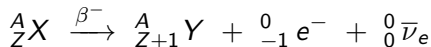
Répartition des noyaux isobares en fonction du nombre de charge Z .

Désintégrations bêta moins (suite)

Les noyaux à gauche du minimum des paraboles de masse ($Z < Z_A$) décroissent par **désintégration** β^- , pour transformer un neutron en proton :

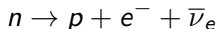
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Ce qui s'écrit à l'échelle du noyau par la réaction :



Exercice 1

Exercice 1 : Calculer en électron-volt (eV) l'énergie libérée lors de la désintégration β^- d'un neutron :



Données :

$$u = 1.660\,539 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

$$e = 1.602\,176 \times 10^{-19} \text{ C}$$

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

$$m_n = 1.008\,665 \text{ } u \text{ et } m_\nu \ll 1 \text{ eV}.$$

Exercice 1 (rappel)

Pour convertir la masse u de kg à énergie en J, on peut se rappeler le formule de l'énergie cinétique :

$$E_C = 1/2 m v^2 : \quad [J] = [kg] [m]^2 [s]^{-2}$$

Alors :

$$\begin{aligned} u [J] &= u [kg] \times c^2 [m]^2 [s]^{-2} \\ &= 1.661 \times 10^{-27} [kg] \times (2.998 \times 10^8)^2 [m]^2 [s]^{-2} \\ &= 1.493 \times 10^{-10} \text{ J} \end{aligned}$$

Pour convertir une énergie de J vers eV, il suffit de diviser par la valeur d'un électron-volt :

$$E [eV] = E [J] / e [J][eV]^{-1} = E [J] / 1.602 \times 10^{-19} [J][eV]^{-1}$$

On peut donc convertir la masse atomique u de J vers eV/c^2 :

$$u [\text{eV}/c^2] = u [J] / e [J][eV]^{-1} = 931.494 \text{ MeV}/c^2$$

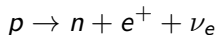
Exercice 1 (correction)

L'énergie libérée par la désintégration β^- d'un neutron $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ est :

$$\begin{aligned} Q &= m_n - m_p - m_e \\ &= 1.008\,665\, u - 1.007\,276\, u - 0.000\,548\,6\, u \\ &= 0.000\,840\,3\, u \times 931.494\, \text{MeV} \\ &= 0.782\,8\, \text{MeV} \\ &= 782.8\, \text{keV} \end{aligned}$$

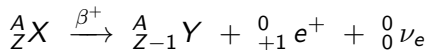
Désintégrations bêta plus

Les noyaux à droite du minimum des paraboles de masse ($Z > Z_A$), trop riches en protons, vont décroître par **désintégration β^+** :



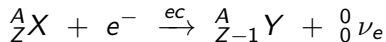
Mais cette réaction ne peut se produire pour un proton isolé, car le neutron est plus lourd que le proton ($m_n > m_p$).

Cette décroissance peut cependant se produire à l'échelle du noyau, par la réaction :



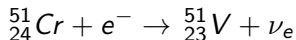
Désintégration par capture électronique

En concurrence avec la désintégration β^+ , où lorsque celle-ci est énergétiquement impossible, les noyaux trop riches en protons peuvent décroître par **capture électronique ec** :



où le noyau capture un électron du cortège électronique de l'atome. Seul **un neutrino mono-énergétique** est alors émis lors de la désintégration.

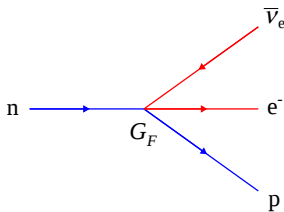
Par exemple, on peut fabriquer une source très intéressante de neutrinos de 752 keV à partir du chrome-51 :



Théorie de Fermi

En 1933, E. Fermi propose une théorie pour décrire la désintégration bêta par une interaction **ponctuelle** à 4 fermions :

- le courant **leptonique** décrit le passage de l'électron au neutrino
- le courant **hadronique** décrit la conversion du neutron en proton
- la **force de l'interaction** est donnée par la constante de Fermi
 $G_F = 1.166\,378 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$



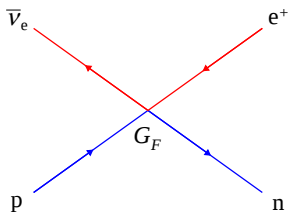
Désintégration β^- dans la théorie de Fermi.

Cette théorie est encore valide aujourd'hui à basse énergie.

La réaction bêta inverse

En 1934, H. Bethe and R. Peierls comprennent que la théorie de Fermi permet d'inverser la réaction bêta.

Un anti-neutrino électronique peut ainsi interagir par la réaction de **désintégration bêta inverse** avec un proton : $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$.



Désintégration β inverse dans la théorie de Fermi.

Cette réaction offre donc une chance de **tenter de détecter le neutrino**, que Pauli pensait indétectable. Cependant, le taux d'événements prédit, à partir de la section efficace d'interaction : $\sigma_{\bar{\nu}_e p} = 0.0952 \times 10^{-43} \text{ cm}^2$ à 1 MeV, est extrêmement faible.

Exercice 2

Exercice 2 : Calculer le **seuil en énergie** (énergie minimale de l'anti-neutrino pour que la réaction ait lieu) en électron-volt (eV) pour que la réaction bêta inverse puisse se produire :

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

Données :

$m_n = 939.6 \text{ MeV}$, $m_p = 938.3 \text{ MeV}$, $m_e = 511.0 \text{ keV}$ et $m_\nu \ll 1 \text{ eV}$.

Exercice 2 (correction)

Puisque la masse du neutrino est négligeable, le seuil de la réaction $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ est :

$$\begin{aligned} Q &= m_p - m_n - m_e \\ &= 1.007\,276\,u - 1.008\,665\,u - 0.000\,548\,6\,u \\ &= -0.001\,937\,599\,u \times 931.5 \times 10^3\,\text{keV} \\ &= -1.805\,\text{MeV} \end{aligned}$$

Remarque : ce calcul est similaire à celui de l'énergie libérée par la désintégration β^+ du proton, qui est donc énergétiquement impossible.

Table des matières

Introduction

La découverte de la radioactivité

Le besoin d'un neutrino

Les désintégrations bêta

Les désintégrations bêta

La réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

Mesure de la masse des neutrinos

Principe de mesure

L'expérience KATRIN

Double désintégration bêta

A la recherche du neutrino

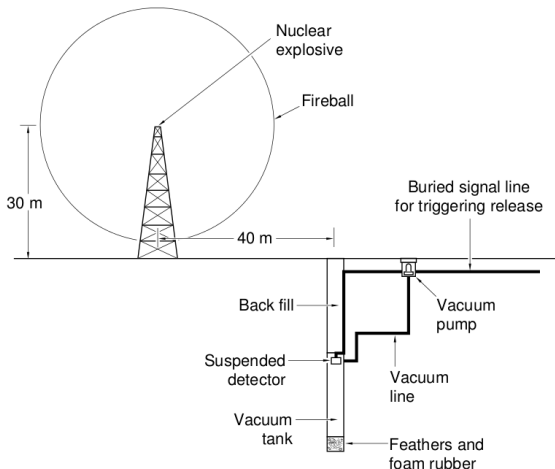
Dans les années 50, les physiciens C. Cowan et F. Reines se lancent dans le *projet 'Poltergeist'* à la recherche du neutrino à Los Alamos, lieu de recherche créé pour le *projet Manhattan* visant le développement de la bombe atomique.



L'équipe du projet Poltergeist menée par Cowan (gauche) et Reines (droite).

Première expérience imaginée

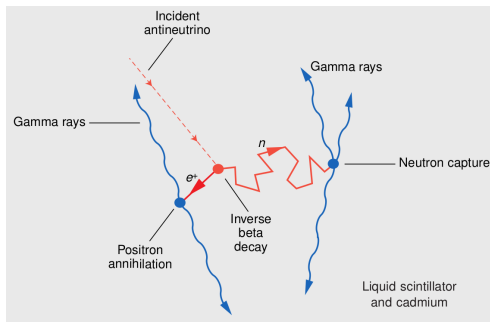
Ils imaginent l'expérience présentée ci-dessous pour détecter des neutrinos grâce à la désintégration bêta inverse.



Première expérience imaginée pour tenter de détecter le neutrino.

Réacteur nucléaire préféré à une explosion nucléaire

- En 1951, il est suggéré de conduire l'expérience auprès d'un réacteur nucléaire, plutôt qu'auprès d'une explosion nucléaire.
- En scrutant la réaction bêta inverse, ils comprennent que d'autres réactions suivent l'interaction d'un anti-neutrino.

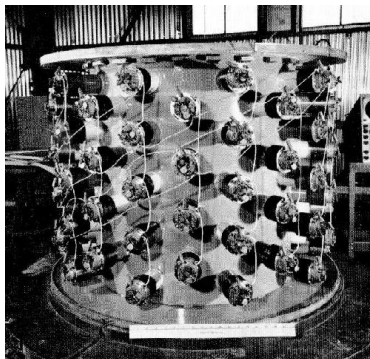
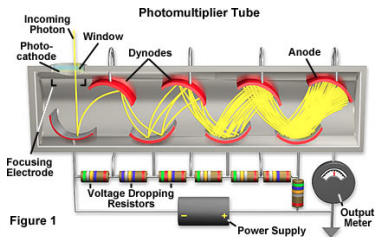


Détail des réactions successives à la réaction bêta inverse.

Détecteurs à liquides scintillateurs

Première expérience réalisée en 1953 auprès du réacteur d'Hanford

- Les **liquides scintillateurs** émettent de faibles flashes de lumière lorsque les particules interagissent dans le milieu.
- Utilisation de **photomultiplicateurs** pour convertir un faible signal lumineux en signal électrique mesurable.



(gauche) Schéma de principe d'un photomultiplicateur. (droite) Vue extérieure du détecteur '*El Monstro*' utilisé à Hanford.

Notion de section efficace nucléaire

La **section efficace** σ nucléaire est une mesure de la probabilité d'une interaction entre un projectile et une cible.

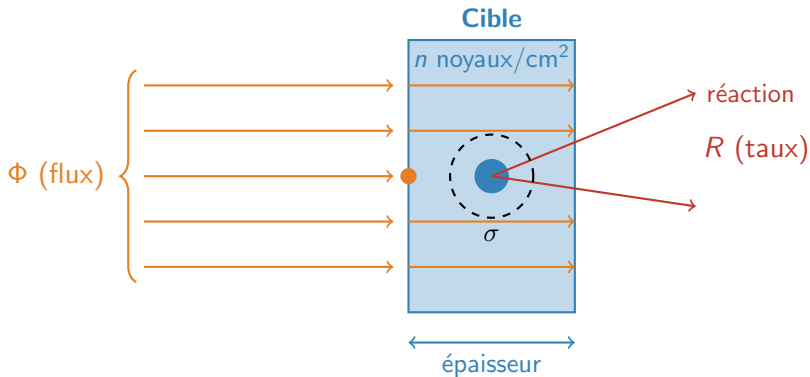
Elle s'exprime en unités de surface : $[\sigma] = \text{m}^2$, plus souvent exprimée en 1 barn $= 10^{-28} \text{ m}^2 = 10^{-24} \text{ cm}^2$

$$\sigma = \frac{R}{\Phi \cdot n}$$

- R : nombre d'événements détectés par unité de temps,
- Φ : flux de particules incidentes
(*nombre de particules par unité de surface et de temps*),
- n : densité des cibles (*nombre de cibles par unité de volume*).

Notion de section efficace nucléaire (suite)

La section efficace σ peut être interprétée comme la surface effective d'une cible pour une interaction donnée.



$$\sigma = \frac{R}{\Phi \cdot n}$$

Exercice 3

Exercice 3 : Calculer le flux d'anti-neutrinos $\phi_{\bar{\nu}_e}$ [$\bar{\nu}_e \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] qu'il faudrait pour voir 1 événement par seconde dans le détecteur *El Monstro* à partir de la formule :

$$N_{\text{evt}} = \sigma_{\bar{\nu}_e p} \times \phi_{\bar{\nu}_e} \times N_{\text{cible}}$$

où N_{cible} est le nombre de protons dans la cible qu'il faut calculer pour le détecteur contenant 1 tonne de toluène (C_7H_8) pour une section d'environ 1 m^2 .

A noter que cette équation ne prend pas en compte l'efficacité de détection qui n'est jamais 100%.

Rappel : $\sigma_{\bar{\nu}_e p} = 0.0952 \times 10^{-43} \text{ cm}^2$ à 1 MeV.

Données du toluène : densité $\rho = 0.867 \text{ g cm}^{-3}$, répartition massique $c_C = 91.25\%$ - $c_H = 8.75\%$ et masse molaire $M = 92.14 \text{ g mol}^{-1}$.

Exercice 3 (correction)

Pour détecter un événement par seconde ($N_{evt} = 1$) on doit avoir :

$$\phi_{\bar{\nu}_e} = \frac{1}{\sigma_{\bar{\nu}_e p} \times N_{cible}}$$

Le détecteur d'une tonne de toluène contient :

$$\begin{aligned} N_{cible} &= \frac{m_{cible} \times c_H \times \mathcal{N}_A}{M} \\ &= \frac{10^6 \times 0.0875 \times 6.022 \times 10^{23}}{92.14} \\ &= 5.719 \times 10^{26} \end{aligned}$$

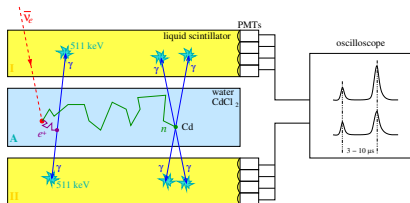
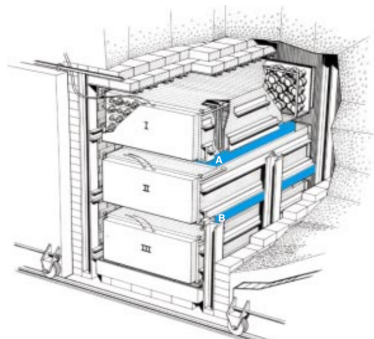
On peut donc calculer le flux de neutrinos nécessaire pour détecter un événement par seconde :

$$\begin{aligned} \phi_{\bar{\nu}_e} &= \frac{1}{0.0952 \times 10^{-43} \times 10^{-4} \times 5.719 \times 10^{26}} \\ &= 1.84 \times 10^{21} \bar{\nu}_e m^{-2} s^{-1} \end{aligned}$$

Nouveau design de l'expérience

L'expérience d'Hanford n'est pas suffisamment concluante.

- Le groupe de Cowan et Reines repense l'expérience pour un meilleur design.
- Utilisation de deux tanks d'eau comme cible pour les anti-neutrinos.



(gauche) Schéma de principe du nouveau détecteur pour la recherche du neutrino. (droite) Illustration d'un événement anti-neutrino dans le détecteur.

Résultats de Savannah River

- Détecteur installé en 1955 près du réacteur de Savannah River.
- 5 mois de travail et de mesure montrent que le taux de coïncidences est 5 fois plus élevé lorsque le réacteur est allumé.

We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from fission fragments by observing inverse beta decay of protons. Observed cross section agrees well with expected six times ten to minus forty-four square centimeters.

- **Prix Nobel de physique
décerné pour moitié
à F. Reines en 1995**
(C. Cowan décède en 1974).

Nobel Prize in Physics 1995



Photo from the Nobel Foundation archive.
Martin L. Perl
Prize share: 1/2



© University of California
Berkeley
Frederick Reines
Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 1995 was awarded "for pioneering experimental contributions to lepton physics" jointly with one half to Martin L. Perl "for the discovery of the tau lepton" and with one half to Frederick Reines "for the detection of the neutrino"

Neutrino muonique

- En 1962, M. Lederman, M. Schwartz et J. Steinberger découvrent le neutrino muonique avec une chambre à étincelles de 10 tonnes.
- Création d'un faisceau de neutrinos $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ en envoyant des protons de 15 GeV sur une cible métallique à Brookhaven.

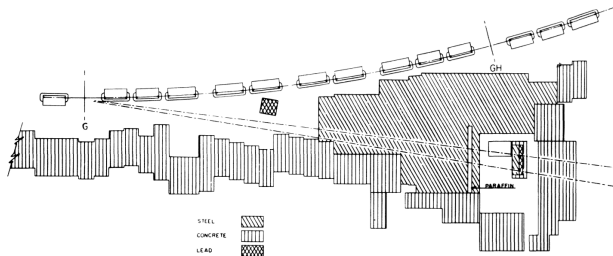


Schéma illustrant l'expérience avec un faisceau de neutrinos muoniques détectés dans une chambre à étincelles.

Neutrino tauique

- En 2000, la collaboration DONUT découvre le neutrino tauique à Fermilab aux USA.
- Faisceau contenant 5% de $\nu_\tau/\bar{\nu}_\tau$ produit par l'accélérateur avec des protons de 800 GeV.

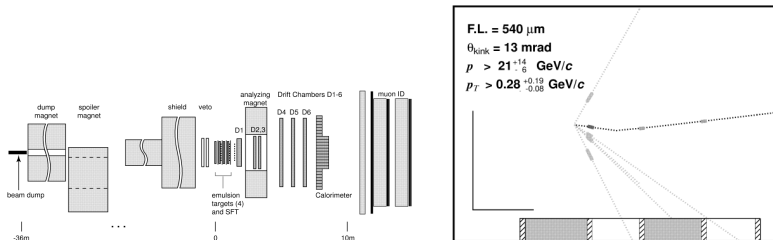


Schéma illustrant l'expérience DONUT avec un faisceau de neutrinos tauique et un exemple d'événement.

Composants élémentaires de la matière

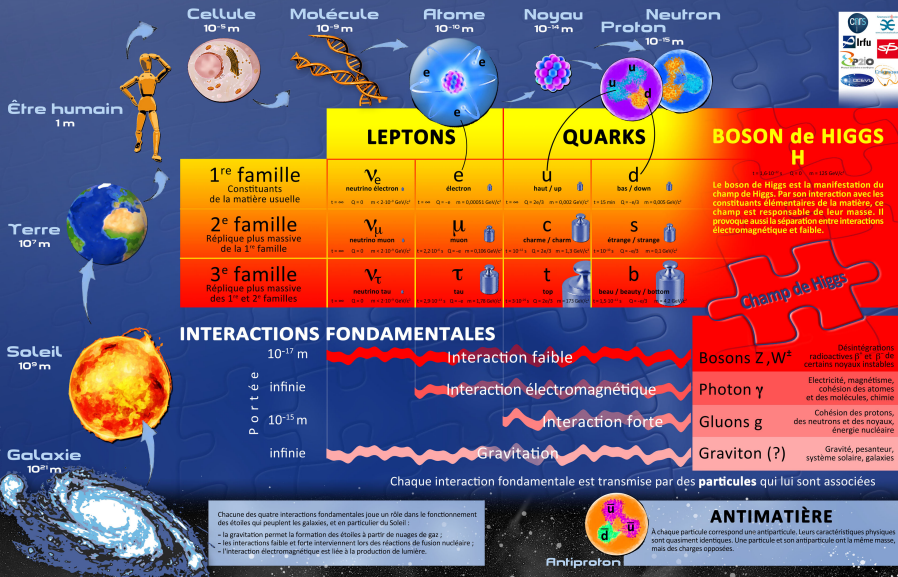


Table des matières

Introduction

La découverte de la radioactivité

Le besoin d'un neutrino

Les désintégrations bêta

Les désintégrations bêta

La réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

Mesure de la masse des neutrinos

Principe de mesure

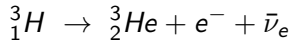
L'expérience KATRIN

Double désintégration bêta

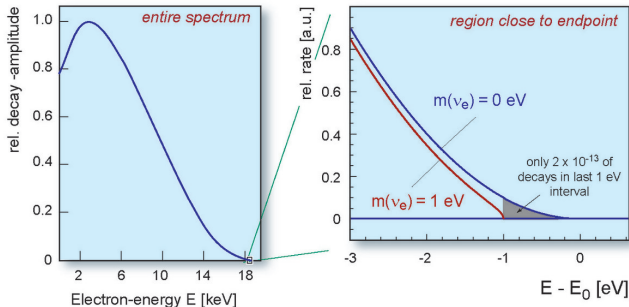
Mesure directe de la masse des neutrinos

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 :



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



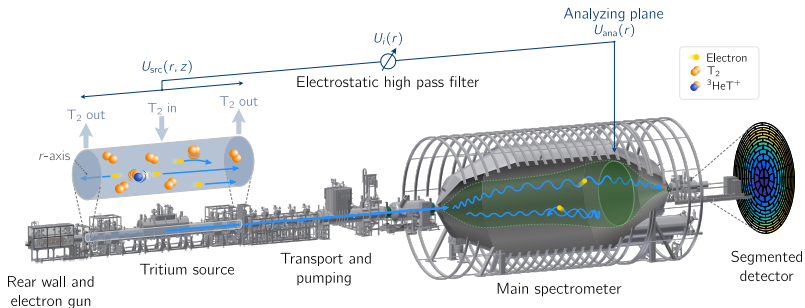
Katrin une expérience hors norme

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.

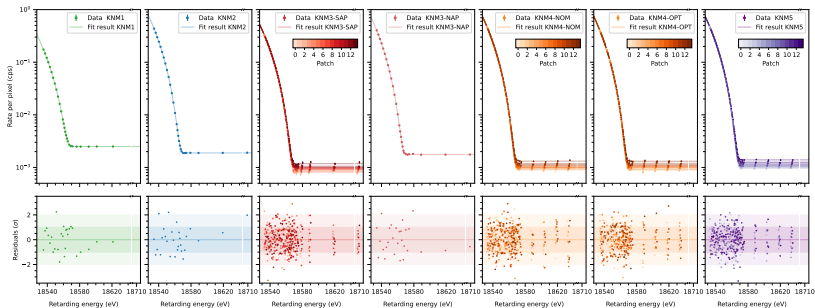


<https://www.pourlascience.fr/sd/physique-particules/masse-des-neutrinos-l-experience-katrin-resserre-l-etau-27675.php> - [arXiv:2406.13516]

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]

Table des matières

Introduction

La découverte de la radioactivité

Le besoin d'un neutrino

Les désintégrations bêta

Les désintégrations bêta

La réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

Mesure de la masse des neutrinos

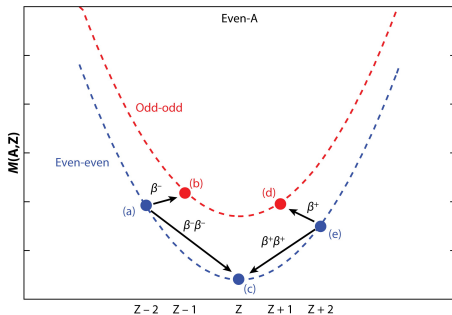
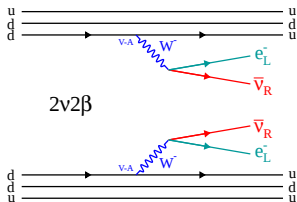
Principe de mesure

L'expérience KATRIN

Double désintégration bêta

Double désintégration bêta à deux neutrinos

M. Goeppert-Mayer propose en 1935 une interaction faible du 2nd ordre de la théorie de E. Fermi : $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$ avec $Q_{\beta\beta} \sim \text{MeV}$



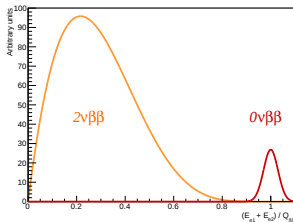
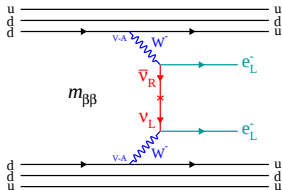
Les taux de désintégration sont donnés par :

$$\Gamma^{2\nu} / \ln 2 = [T_{1/2}^{2\nu}]^{-1} = G^{2\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M^{2\nu}|^2$$

Processus extrêmement rare avec $T_{1/2}^{2\nu} > 10^{18}$ ans détecté pour 11/35 isotopes

Double désintégration bêta sans neutrino

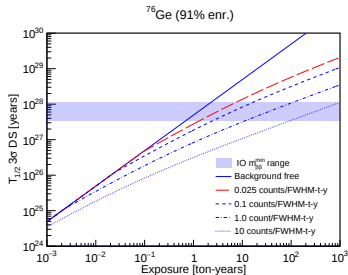
W. Furry à partir de la théorie de E. Majorana ($\nu \equiv \bar{\nu}$) en 1939 :
 $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$



$$R^{0\nu} / \ln 2 = [T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

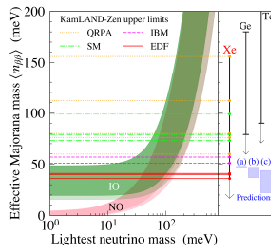
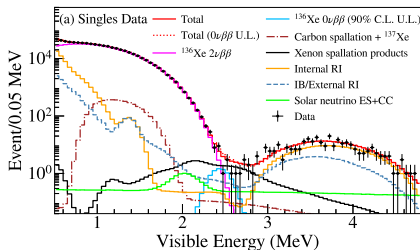
Critères expérimentaux :

$$(T_{1/2}^{0\nu})_{lim} \propto \begin{cases} \epsilon_{0\nu} \frac{m t}{b \Delta E} & \text{sans bruit} \\ \epsilon_{0\nu} \sqrt{\frac{m t}{b \Delta E}} & \text{avec bruit} \end{cases}$$

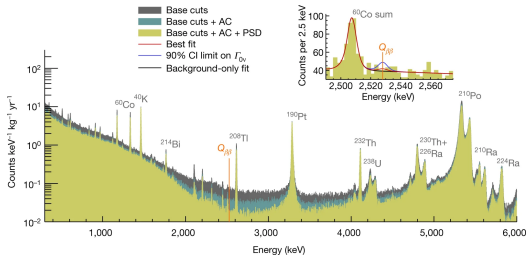
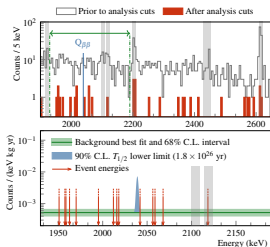


Résultats expérimentaux actuels

Meilleure sensibilité de KamLAND-Zen avec ^{136}Xe : $< 36\text{-}156$ meV



GERDA ^{76}Ge : $< 79\text{-}180$ meV - CUORE ^{130}Te : $< 90\text{-}305$ meV



Résumé et conclusion

- Nous avons brièvement rappelé la découverte de la radioactivité.
- Nous avons présenté les différentes désintégrations bêta.
- Le manque d'énergie des électrons émis lors des désintégrations bêta a conduit à l'introduction du neutrino en 1930 par Pauli.
- Il est découvert en 1956 par Cowan et Reines auprès d'un réacteur nucléaire.
- Trois saveurs de neutrinos sont connues à ce jour : ν_e, ν_μ, ν_τ .
- La masse des neutrinos est encore inconnue mais les expériences d'oscillations ont prouvé qu'ils sont massifs.
- La double désintégration bêta sans neutrino pourrait nous permettre de mesurer la masse effective des neutrinos et de prouver qu'ils sont des fermions de Majorana.

Ressources

- Biographie de Marie Curie :
<https://musee.curie.fr/decouvrir/la-famille-curie/biographie-de-marie-curie>
- Publication Los Alamos No. 25, 1997 :
<http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?25-02.pdf>
- Page web du CEA à consulter :
<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-noyaux-des-atomes.aspx>