

Désintégration bêta et neutrinos

École de physique Subatomique de printemps - Subatech

Mathieu BONGRAND
mathieu.bongrand@in2p3.fr

21 mai 2025



Table des matières

Introduction

Le besoin d'un neutrino

Désintégrations bêta

Désintégrations bêta

Réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

Table des matières

Introduction

Le besoin d'un neutrino

Désintégrations bêta

Désintégrations bêta

Réaction bêta inverse

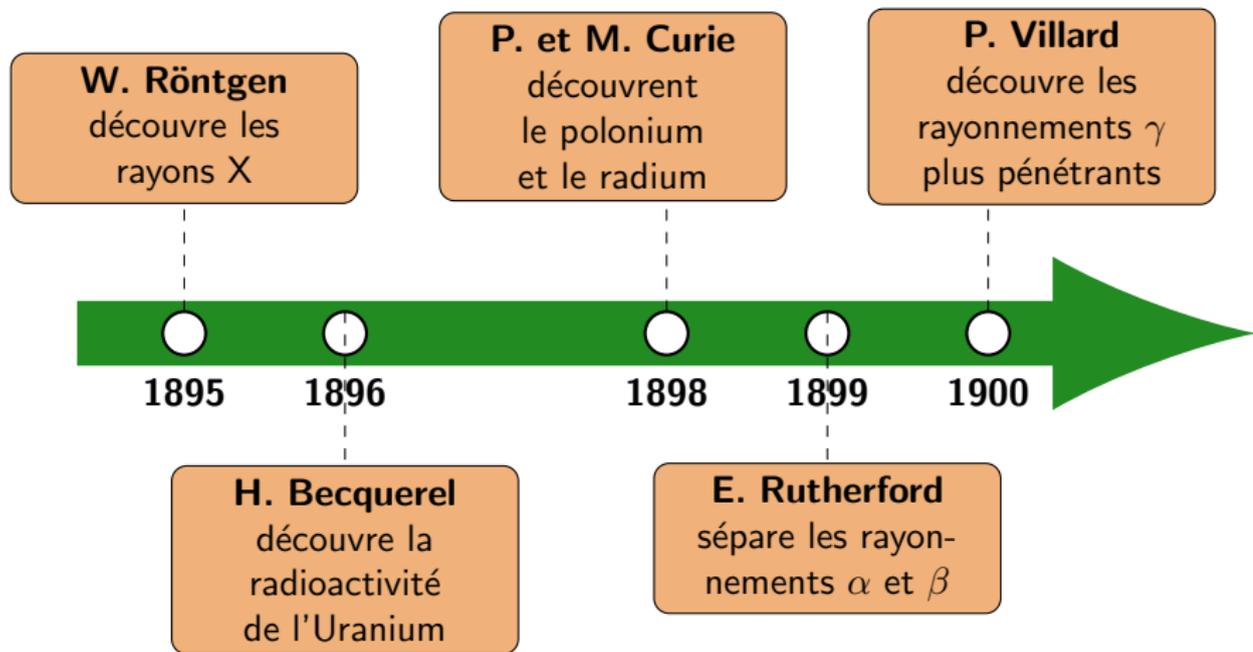
La découverte du neutrino

L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

Découverte de la radioactivité

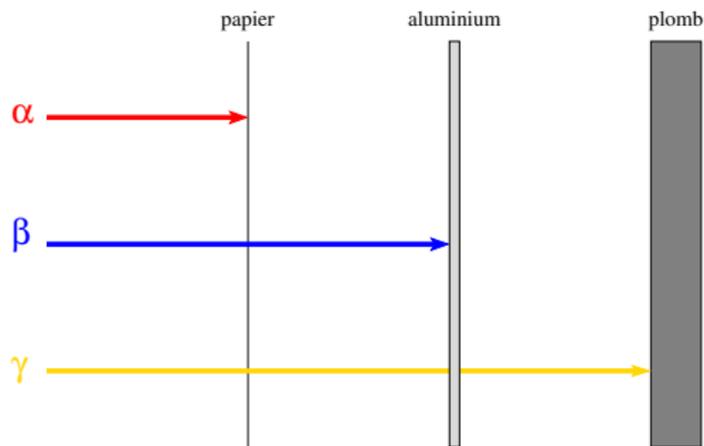


Biographie de Marie Curie :

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

Radioactivité : 3 types de rayonnements

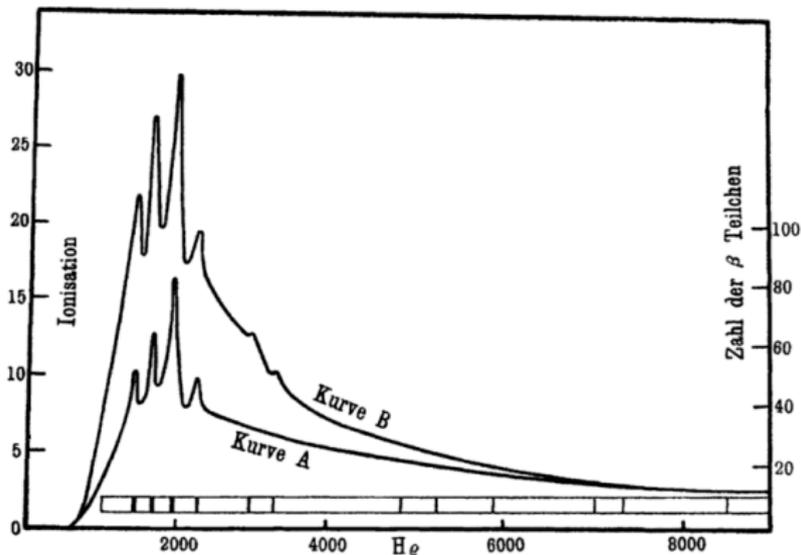
Après la découverte de la radioactivité, les scientifiques pensaient donc que seul un rayonnement était émis lors de la désintégration β , comme pour la radioactivité α et la désexcitation γ .



Différence de pénétration des trois types de rayonnements radioactifs.

Spectre en énergie

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

Le besoin d'un neutrino

Désintégrations bêta

Désintégrations bêta

Réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

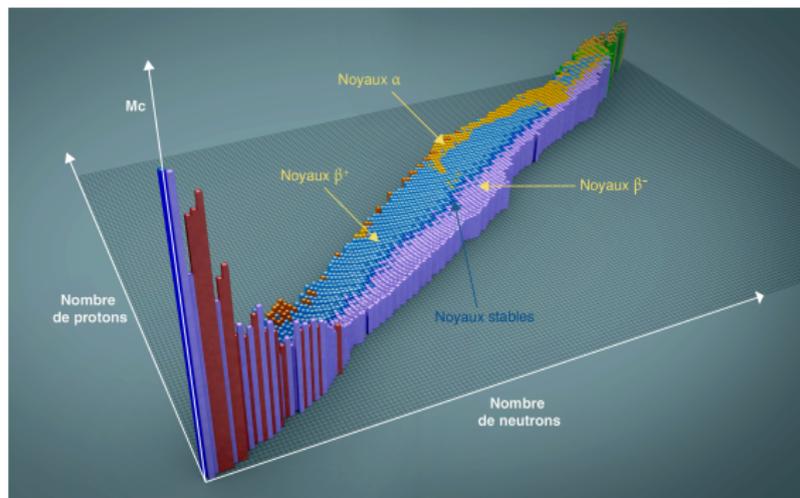
L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

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**.

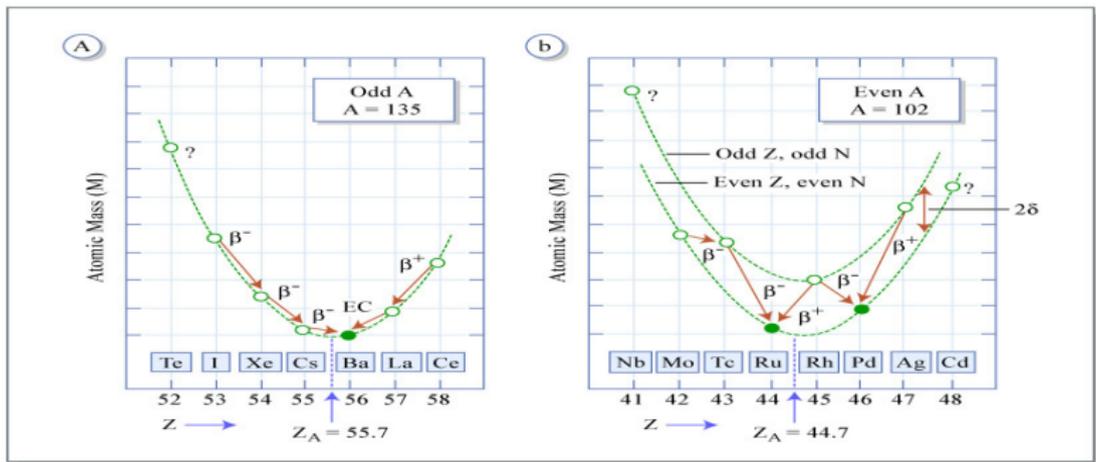


Page web du CEA à consulter :
<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-noyaux-des-atomes.aspx>

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.

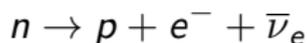
Pour les **nombre de masse pairs**, la parabole est dédoublée à cause de l'énergie d'appariement des nucléons, qui apporte plus de stabilité si les protons et les neutron sont regroupés par paires.



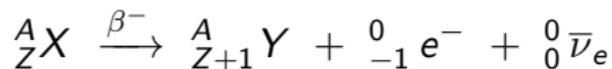
Répartition des noyaux isobares en fonction du nombre de charge Z .

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 :

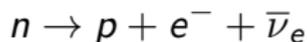


Ce qui s'écrit à l'échelle du noyau par la réaction :



Exercice 1

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



Données :

$$u = 1.660\,539\,066 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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

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

Exercice 1 (rappel)

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

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

ou utiliser la fameuse relation d'Albert Einstein : $E = m c^2$

$$\begin{aligned} u [J] &= u [kg] \times c^2 [m]^2 [s]^{-2} \\ &= 1.660 \times 10^{-27} [kg] \times (2.998 \times 10^8)^2 [m]^2 [s]^{-2} \\ &= 1.492 \times 10^{-10} \text{ J} \end{aligned}$$

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 :

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

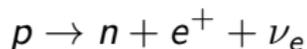
Exercice 1 (correction)

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

$$\begin{aligned} Q &= m_n - m_p - m_e \\ &= 1.008\,665\,u - 1.007\,276\,u - 0.000\,548\,6\,u \\ &= 0.000\,840\,3\,u \times 931.494\,\text{MeV} \\ &= 0.782\,7\,\text{MeV} \\ &= 782.7\,\text{keV} \end{aligned}$$

Désintégrations bêta plus

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

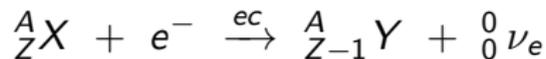


Mais cette réaction ne peut se produire pour un proton isolé, car le neutron est plus lourd que le proton. Cette décroissance peut cependant se produire à l'échelle du noyau, par la réaction :



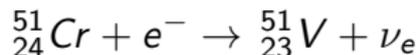
Désintégration par capture électronique

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.

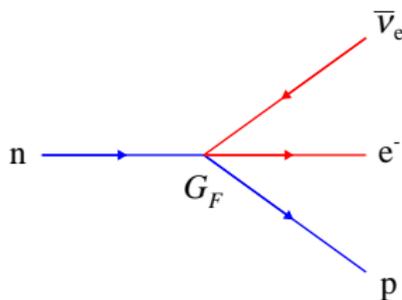
Par exemple, on peut fabriquer une source très intéressante de neutrinos de 752 keV à partir du chrome-51 :



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 $G_F = 1.166\,378 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$



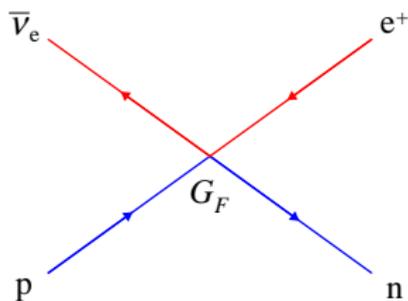
Désintégration β^- dans la théorie de Fermi.

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.

Notion de section efficace

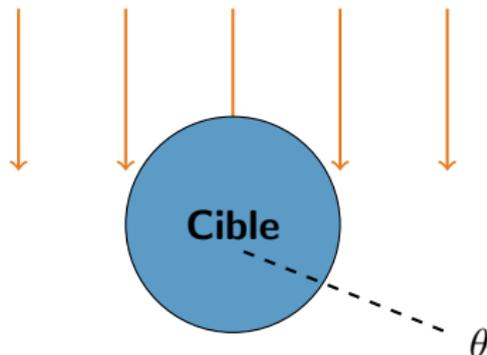
La **section efficace** σ est une mesure de la probabilité d'une interaction entre un projectile et une cible. Elle s'exprime en unités de surface : $[\sigma] = \text{m}^2$, $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 10^{-24} \text{ cm}^2$

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

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

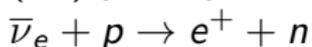
- **Particules incidentes**

- **Noyau cible**



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 :



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

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

Le besoin d'un neutrino

Désintégrations bêta

Désintégrations bêta

Réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

A la recherche du neutrino

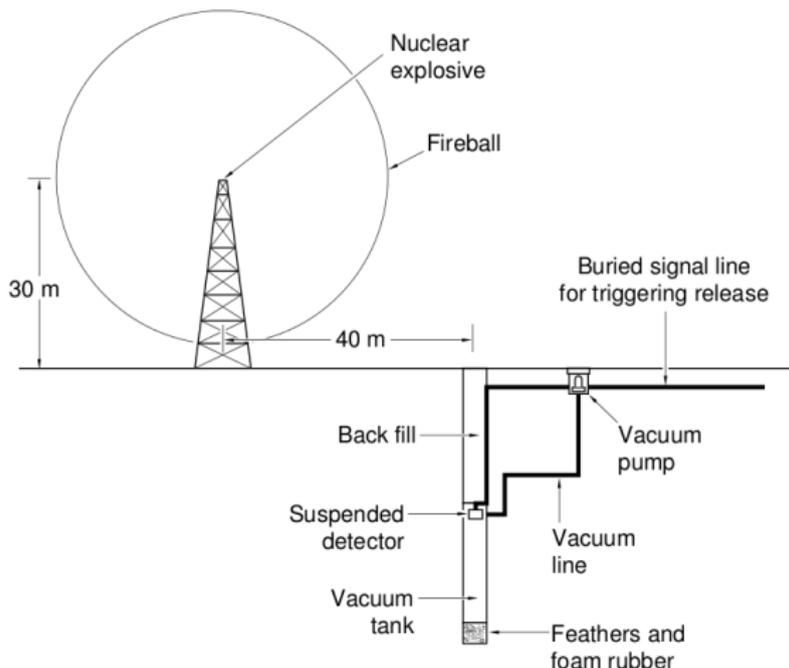
Dans les années 50, les physiciens C. Cowan et F. Reines se lancent dans le *projet 'Poltergeist'* à la recherche du neutrino à Los Alamos, lieu de recherche créé pour le *projet Manhattan* visant le développement de la bombe atomique.



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

Première expérience imaginée

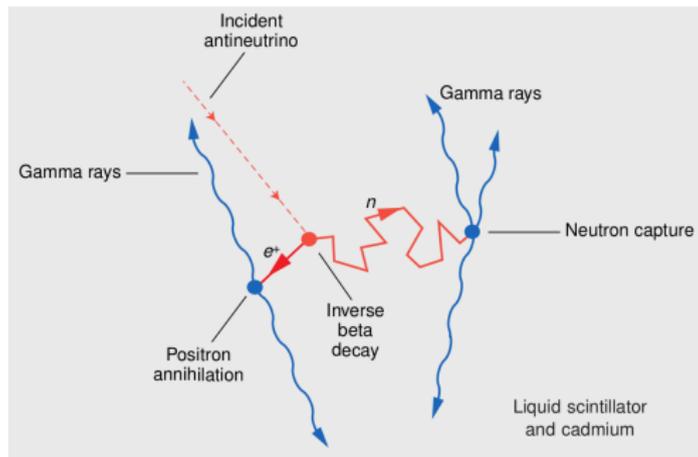
Ils imaginent l'expérience présentée ci-dessous pour détecter des neutrinos grâce à la désintégration bêta inverse.



Première expérience imaginée pour tenter de détecter le neutrino.

Réacteur nucléaire vs 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.

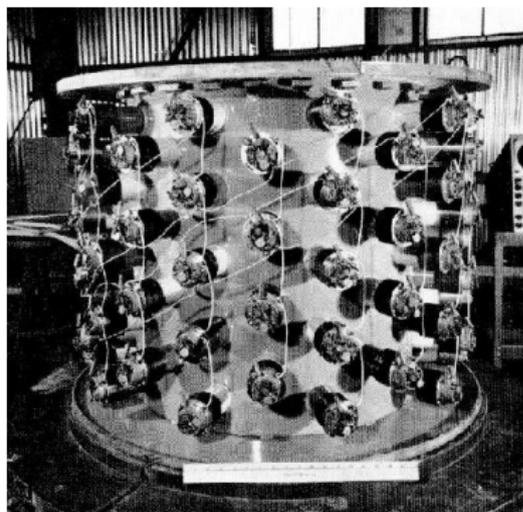
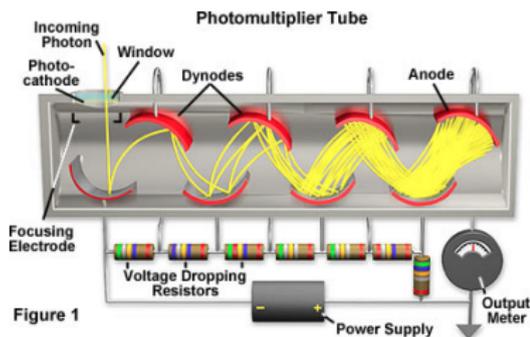


Détail des réactions successives à la réaction bêta inverse.

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.

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

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 :

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

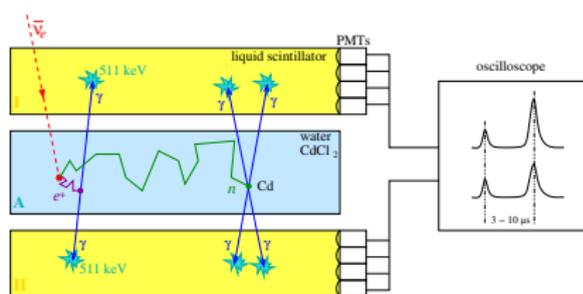
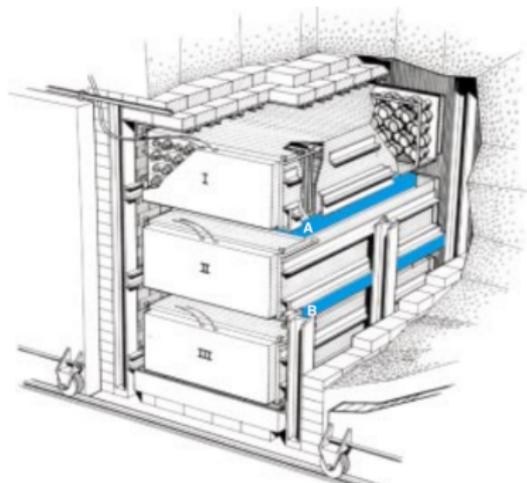
On peut donc calculer le flux de neutrinos :

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

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 auprès du réacteur de Savannah River.
- 5 mois de travail et de mesure montrent que le taux de coïncidences est cinq 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 en 1995.**

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.

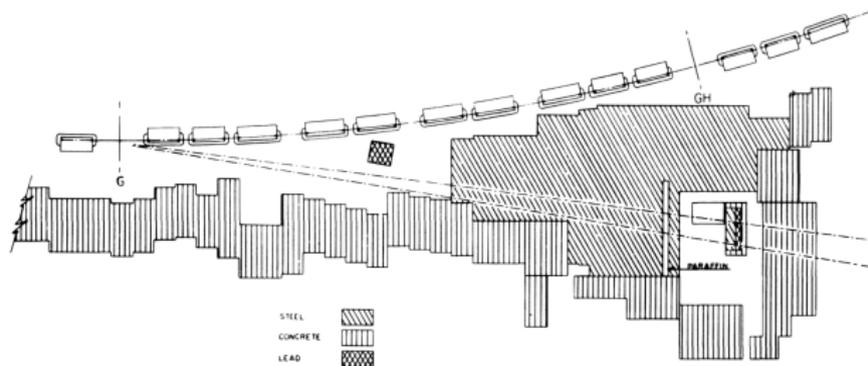


Schéma illustrant l'expérience avec un faisceau de neutrinos muoniques détectés dans une chambre à étincelles.

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.

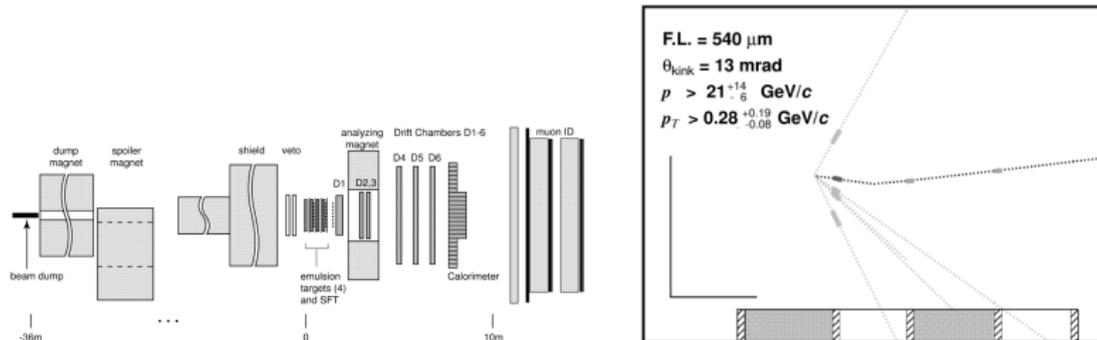
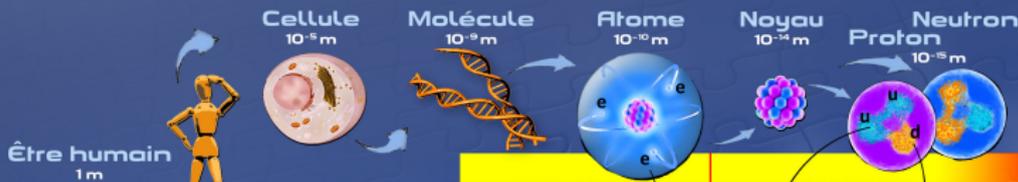


Schéma illustrant l'expérience DONUT avec un faisceau de neutrinos tauique et un exemple d'événement.

Composants élémentaires de la matière



Être humain
1m

Terre
10⁷ m

Soleil
10⁹ m

Galaxie
10²¹ m

	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électronique $m = 2.3 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	e électron $m = 9.1 \cdot 10^{-31}$ GeV/c ²	u haut / up $m = 2.3$ GeV/c ²	d bas / down $m = 4.8$ GeV/c ²	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.
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon $m = 2.1 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	μ muon $m = 1.056$ GeV/c ²	c charm / charm $m = 1.273$ GeV/c ²	s étrange / strange $m = 0.5$ GeV/c ²	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau $m = 2.1 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	τ tau $m = 1.777$ GeV/c ²	t top $m = 172.5$ GeV/c ²	b beau / beauty / bottom $m = 4.2$ GeV/c ²	

INTERACTIONS FONDAMENTALES



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

Champ de Higgs

Bosons Z, W[±]
Déintégrations radioactives (β⁻ et β⁺) de certains noyaux instables

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

Gluons g
Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire

Graviton (?)
Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

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.

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.
- Il est découvert en 1956 auprès d'un réacteur nucléaire.
- Trois saveurs de neutrinos sont connues à ce jour : e, μ, τ .

Dans les prochains cours, nous détaillerons les sources de neutrinos et discuterons une propriété étonnante : les oscillations de neutrinos.

Ressources

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