

Désintégration bêta et physique des neutrinos

Mini-school - L2 Physique - Subatech

Mathieu BONGRAND

mathieu.bongrand@in2p3.fr

17 juin 2024



NUCLÉAIRE
& PARTICULES



Table des matières

Rappel sur les atomes et les noyaux

Description de l'atome et du noyau

Masse des noyaux et énergie de liaison

Réactions nucléaires

Réactions nucléaires

Décroissance radioactive

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

Rappel sur les atomes et les noyaux

Description de l'atome et du noyau

Masse des noyaux et énergie de liaison

Réactions nucléaires

Réactions nucléaires

Décroissance radioactive

Désintégrations bêta

Désintégrations bêta

Réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

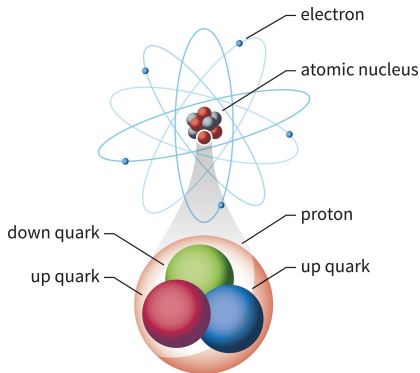
L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

Description de l'atome et du noyau

La matière est constituée d'atomes formés d'un **noyau** central très dense, entouré d'**électrons**.



Représentation d'un atome et de ses constituants.

La taille du noyau est de l'ordre de $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ (femtomètre) et celle de l'atome est de l'ordre de $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ (angström).

Description de l'atome et du noyau (suite)

Le noyau est constitué de **protons** et de **neutrons**, qui appartiennent à la famille des **nucléons**.

L'interaction électromagnétique assure la cohésion de l'atome par l'attraction entre les protons et les électrons.

Ils ont des charges électriques opposées, de **charge électrique élémentaire** :

$$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$$

- Charge de l'électron : $-e$
- Charge du proton : $+e$
- Charge du neutron : 0

Les protons et les neutrons sont liés entre eux par **l'interaction forte** (cf. cours de F. Arléo).

Description de l'atome et du noyau (suite)

L'atome est électriquement neutre, il possède le même nombre de protons que d'électrons, noté Z , appelé le **nombre de charges**.

Le nombre total de nucléons dans le noyau, noté A , est appelé le **nombre de masse**.



Le **nombre de neutrons**, noté N , est déterminé par $N = A - Z$.

Exemple : le carbone-13, noté ${}^{13}_6\text{C}$, possède 6 protons, 7 neutrons et 6 électrons.

On définit les noyaux :

- **isotopes** : mêmes Z mais A différents
- **isotones** : mêmes N mais A différents
- **isobares** : mêmes A mais Z différents

Masse des noyaux et énergie de liaison

La masse du noyau d'un atome est toujours inférieure à la masse de ses constituants pris séparément.

On appelle le **défaut de masse** $\Delta M(A, Z)$ la différence de masse entre la masse de A nucléons indépendants (Z protons et $A - Z$ neutrons) et la masse du noyau $M(A, Z)$:

$$\Delta M(A, Z) = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M(A, Z)$$

L'**unité de masse atomique** est définie comme le douzième de la masse de l'atome de carbone-12 :

$$u = M(12, 6)/12 = 1.660\,539\,066 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Pour connaître les masses des noyaux et leurs désintégrations :

<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

Masse des noyaux et énergie de liaison (suite)

Le **nombre d'Avogadro** est défini par le nombre d'atomes contenus dans 12 g de carbone-12 :

$$\mathcal{N}_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

L'**électron-volt** (eV) est préféré pour mesurer masses et énergies :

$$1 \text{ eV} = 1 \text{ e} \times 1 \text{ V} = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$[1 \text{ meV} = 10^{-3} \text{ eV} / 1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} / 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} / 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}]$$

1905 A. Einstein établit la relation d'**équivalence masse-énergie** :

$$E = mc^2$$

La vitesse de la lumière dans le vide est constante :

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

Exercice 1

Exercice 1 : Calculer la masse atomique u en électron-volt (eV/c^2).

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

Exercice 1 (correction)

L'unité de l'énergie est le **Joule (J)**, que l'on peut exprimer dans le système international d'unité grâce à l'expression de l'énergie cinétique $E_C = 1/2 m v^2$: $[J] = [kg] [m]^2 [s]^{-2}$.

La masse atomique peut être convertie en énergie grâce à la formule $E = m c^2$:

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

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 2

Exercice 2 : Calculer les masses des particules suivantes en électron-volt (eV/c^2).

Données : $m_e = 5.485\,799 \times 10^{-4} u$, $m_p = 1.007\,276 u$,
 $m_n = 1.008\,665 u$.

Exercice 2 (correction)

Pour passer d'une masse en unité atomique en électron-volt (eV/c^2), il suffit de calculer le produit :

$$m [\text{eV}/c^2] = m [u] \times 931.494 \text{ MeV}$$

- $m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg} = 5.486 \times 10^{-4} u = 511.0 \text{ keV}$
- $m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.007 276 u = 938.3 \text{ MeV}$
- $m_n = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.008 665 u = 939.6 \text{ MeV}$

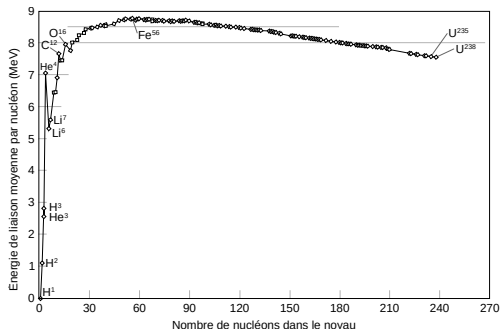
Chiffres à retenir

Énergie de liaison

De la même façon, on peut donc s'intéresser à l'**énergie de liaison** plutôt qu'au défaut de masse :

$$B(A, Z) = \Delta M(A, Z) \times c^2$$

qui permet de décrire le gain de **stabilité** d'un noyau ou l'énergie qu'il faut pour le **dissocier** en nucléons.



Énergie de liaison par nucléon B/A en fonction du nombre de masse A .

Exercice 3

Exercice 3 : Calculer l'énergie de liaison du deutérium 2_1H en électron-volt (eV/c^2).

Donnée : $m_e = 5.485\,799 \times 10^{-4} u$, $m_p = 1.007\,276 u$,
 $m_n = 1.008\,665 u$ et $M(2, 1) = 2.014\,102 u$.

Exercice 3 (correction)

L'énergie de liaison du deutérium 2_1H en électron-volt (eV/c^2) se calcule par la différence entre la masse des composants pris individuellement et sa masse atomique :

$$\begin{aligned} B(2, 1) &= m_n + m_p + m_e - M(2, 1) \\ &= 1.008\,665\, u + 1.007\,276\, u + 0.000\,548\,6\, u - 2.014\,102\, u \\ &= 0.002\,387\,6\, u \times 931.5\, \text{MeV} \\ &= 2.225\, \text{MeV} \end{aligned}$$

Table des matières

Rappel sur les atomes et les noyaux

Description de l'atome et du noyau

Masse des noyaux et énergie de liaison

Réactions nucléaires

Réactions nucléaires

Décroissance radioactive

Désintégrations bêta

Désintégrations bêta

Réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

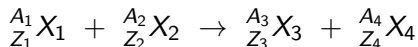
L'expérience d'Hanford

L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

Réactions nucléaires

Une **réaction nucléaire** peut s'écrire selon le même principe que les réactions chimiques :



L'**énergie libérée** par la réaction, notée Q , s'exprime en fonction des masses des produits et des réactifs :

$$Q = [M(A_1, Z_1) + M(A_2, Z_2) - M(A_3, Z_3) - M(A_4, Z_4)] \times c^2$$

ou en fonction des énergies de liaison :

$$Q = B(A_3, Z_3) + B(A_4, Z_4) - B(A_1, Z_1) - B(A_2, Z_2)$$

Si $Q > 0$ la réaction est spontanée, si $Q < 0$ elle nécessite un apport d'énergie (collision)

Réactions nucléaires (suite)

Les réactions nucléaires et les désintégrations radioactives obéissent aux **lois de conservation** suivantes :

- conservation de l'énergie et de l'impulsion

- conservation du nombre de masse total

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$

- conservation du nombre de charge total

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

Comme nous le verrons plus loin, d'autres **nombres quantiques** doivent également être conservés à l'échelle des particules.

Exercice 4

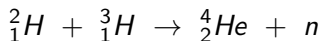
Exercice 4 : Écrire la réaction de fusion de deutérium 2_1H et de tritium 3_1H vers l'hélium-4 4_2He et calculer l'énergie libérée par la réaction en électron-volt (eV).

Comparer cette valeur à l'énergie libérée lors de la fission d'un noyau d'uranium-235, d'environ 200 MeV par fission.

Données : $M(2, 1) = 2.014\ 102\ u$, $M(3, 1) = 3.016\ 029\ u$ et $M(4, 2) = 4.002\ 603\ u$.

Exercice 4 (correction)

La réaction de fusion du deutérium et du tritium s'écrit :



L'énergie libérée par la réaction est :

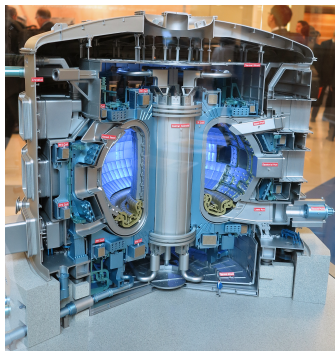
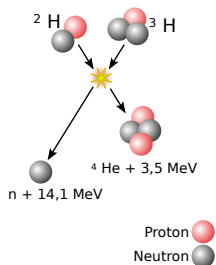
$$\begin{aligned} Q &= M(2, 1) + M(3, 1) - M(4, 2) - m_n \\ &= 2.014\,102\,u - 3.016\,029\,u - 4.002\,603\,u - 1.008\,665\,u \\ &= 0.0189\,u \times 931.5\,\text{MeV} \\ &= 17.6\,\text{MeV} \end{aligned}$$

Cette énergie est onze fois plus faible que celle libérée par la fission d'un noyau ${}^{235}_{92}\text{U}$, mais la réaction utilise des isotopes abondants sur Terre (deutérium) et ne produit pas d'éléments radioactifs.

Fusion deutérium-tritium

Cette réaction de fusion deutérium-tritium pourrait être une future source d'énergie nucléaire, abondante et plus sûre (pas de fusion du cœur et moins de déchets).

Le projet ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) en construction à Cadarache en France, cherche à démontrer la possibilité de produire de l'énergie à partir d'une réaction de fusion auto-entretenue.



Décroissance radioactive

La **loi de décroissance radioactive** est exprimée par l'équation :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

- $N(t)$ représente le nombre de noyaux présents à l'instant t ,
- t est le temps écoulé depuis le début de l'observation,
- N_0 est le nombre initial de noyaux à $t = 0$,
- e est la base du logarithme népérien,
- la constante de désintégration λ caractérise chaque isotope.

On utilise parfois la **durée de vie moyenne** : $\tau = 1/\lambda$.

La **demi-vie** $T_{1/2}$ d'un isotope radioactif est le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux se désintègrent :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Exercice 5

Exercice 5 : Démontrez la relation entre la demi-vie et la constante de désintégration à partir de la loi de décroissance radioactive.

Exercice 5 (correction)

On utilise la loi de décroissance radioactive appliquée à la demi-vie de l'isotope :

$$\begin{aligned}N(T_{1/2}) &= N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{N_0}{2} \\e^{-\lambda T_{1/2}} &= \frac{1}{2} \\-\lambda T_{1/2} &= -\ln 2 \\T_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda}\end{aligned}$$

Par exemple, la durée de vie du neutron est $\tau_n = 878.4 \pm 0.5$ s, alors que la durée de vie du tritium ${}^3_1\text{H}$ par désintégration β^- est de $T_{1/2} = 12.32 \pm 0.02$ ans.

Ce qui illustre le gain de stabilité d'un neutron au sein d'un noyau atomique.

Table des matières

Rappel sur les atomes et les noyaux

Description de l'atome et du noyau

Masse des noyaux et énergie de liaison

Réactions nucléaires

Réactions nucléaires

Décroissance radioactive

Désintégrations bêta

Désintégrations bêta

Réaction bêta inverse

La découverte du neutrino

L'expérience d'Hanford

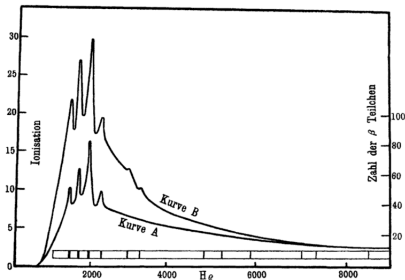
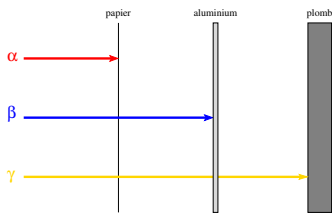
L'expérience de Savannah River

Découverte des autres types de neutrinos

Spectre en énergie

Aux débuts de la découverte (1896-1900) de la radioactivité, les scientifiques pensaient que seul un rayonnement β était émis par cette réaction, comme pour la radioactivité α .

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



(gauche) Différence de pénétration des trois types de rayonnements radioactifs
(droite) 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.

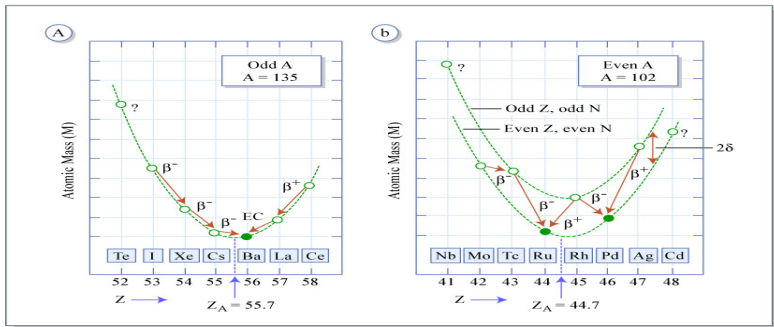
Your humble servant,

W. Pauli

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.



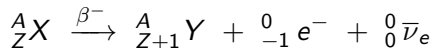
Répartition des noyaux isobares en fonction du nombre de charge Z .

Désintégrations bêta moins (suite)

Les noyaux à gauche du minimum des paraboles de masse 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 6

Exercice 6 : Calculer en électron-volt (eV) l'énergie libérée lors de la désintégration β^- d'un neutron.

Données : masse des particules calculées en eV à l'exercice 2, sachant que $m_\nu \ll 1$ eV.

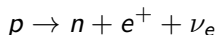
Exercice 6 (correction)

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

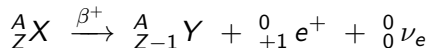
$$\begin{aligned} Q &= m_n - m_p - m_e \\ &= 1.008\,665\,u - 1.007\,276\,u - 0.000\,548\,6\,u \\ &= 0.000\,840\,3\,u \times 931.5\,\text{MeV} \\ &= 0.782\,8\,\text{MeV} \\ &= 782.8\,\text{keV} \end{aligned}$$

Désintégrations bêta plus

Les noyaux à droite du minimum des paraboles de masse sont trop riches en protons et vont décroître par **désintégration** β^+ :

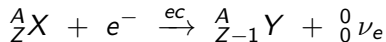


Mais cette réaction ne peut se produire pour un proton isolé, car le neutron est plus lourd que le proton. Cette décroissance peut cependant se produire à l'échelle du noyau, par la réaction :



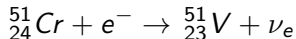
Désintégration par capture électronique

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.

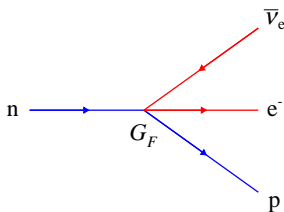
Par exemple, on peut fabriquer une source très intéressante de neutrinos de 752 keV à partir du chrome-51 :



Théorie de Fermi

En 1933, E. Fermi propose une théorie pour décrire la désintégration bêta par une interaction **punctuelle** 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 $G_F = 1.166\,378 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$



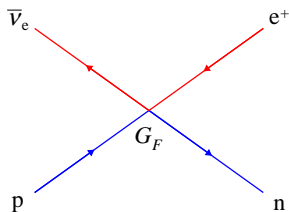
Désintégration β^- dans la théorie de Fermi.

Cette théorie est encore valide 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 7

Exercice 7 : 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 : $m_n = 939.6$ MeV, $m_p = 938.3$ MeV,
 $m_e = 511.0$ keV et $m_\nu \ll 1$ eV.

Exercice 7 (correction)

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

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

Table des matières

Rappel sur les atomes et les noyaux

Description de l'atome et du noyau

Masse des noyaux et énergie de liaison

Réactions nucléaires

Réactions nucléaires

Décroissance radioactive

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

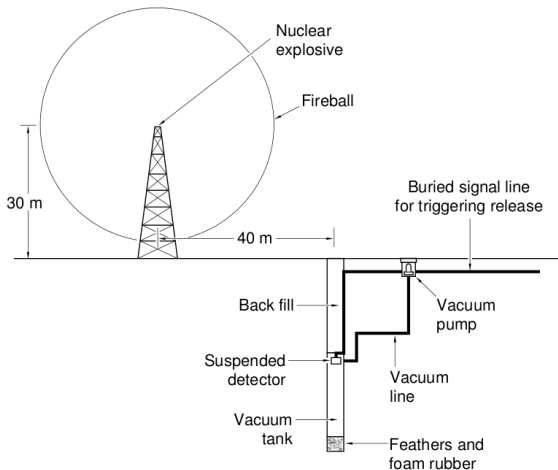
Dans les années 50, les physiciens C. Cowan et F. Reines se lancent dans le *projet 'Poltergeist'* à la recherche du neutrino à Los Alamos, lieu de recherche créé pour le *projet Manhattan* visant le développement de la bombe atomique.



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

Première expérience imaginée

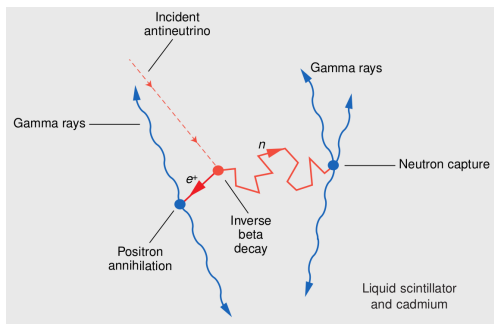
Ils imaginent l'expérience présentée ci-dessous pour détecter des neutrinos grâce à la désintégration bêta inverse.



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.

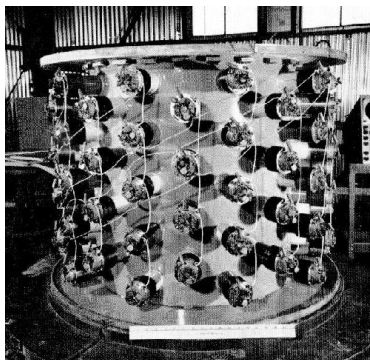
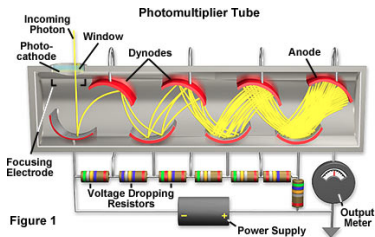


Détail des réactions successives à la réaction bêta inverse.

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 9

Exercice 9 : Calculer le flux d'anti-neutrinos $\phi_{\bar{\nu}_e}$ [$\bar{\nu}_e m^{-2} s^{-1}$] qu'il faudrait pour voir 1 événement par seconde dans le détecteur El Monstro à partir de la formule :

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

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

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

Exercice 9 (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 :

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

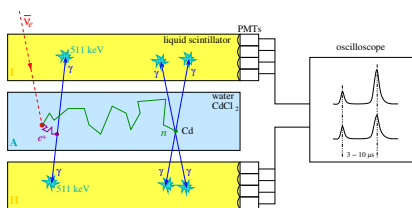
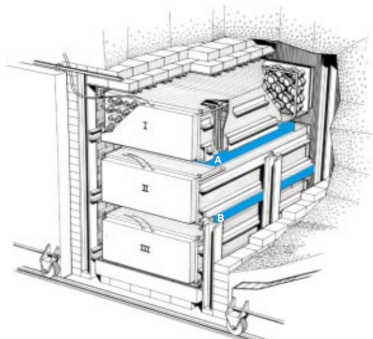
On peut donc calculer le flux de neutrinos :

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

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.

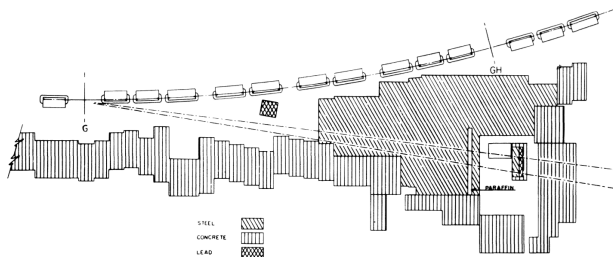


Schéma illustrant l'expérience avec un faisceau de neutrinos muoniques détectés dans une chambre à étincelles.

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.

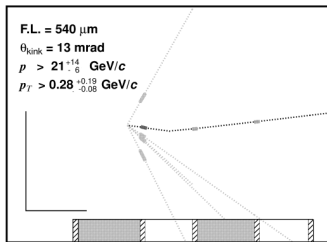
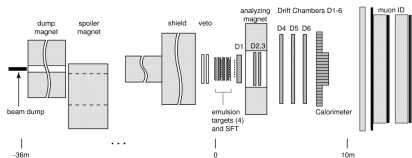


Schéma illustrant l'expérience DONUT avec un faisceau de neutrinos tauique et un exemple d'événement.

Résumé et conclusion

- Nous avons rappelé les constituants élémentaires de l'atome.
- Présenté les réactions nucléaires et les 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.

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