

Rendez-vous sur

■ POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

- Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.
- Nouveau ! Écoutez nos entretiens audio ou téléchargez-les.
- Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur www.pourlascience.fr/newsletters
- Consultez les archives de tous nos magazines depuis 2004.
- Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.
- Suivez notre actualité en direct :



<http://www.pourlascience.fr/rss>



<http://twitter.com/pourlascience>



<http://www.pourlascience.fr/pls-facebook>



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

Des **neutrinos** pour sonder l'intérieur de la Terre

William McDonough, John Learned et Stephen Dye

Ces particules passe-muraille sont devenues un outil pour sonder les profondeurs de la Terre et comprendre comment notre planète produit de la chaleur. Elles seraient aussi utiles pour surveiller les centrales nucléaires.



1. LE DÉTECTEUR de l'expérience Daya Bay, en Chine, traque les antineutrinos émis par la centrale nucléaire située à proximité.

Article traduit et publié avec l'autorisation de W. F. McDonough, J. G. Learned et S.T. Dye, "The many uses of electron antineutrinos", *Physics Today*, vol. 65(3), pp. 46-51, 2012. © 2012, American Institute of Physics.

Les neutrinos sont les particules les plus discrètes que l'on connaisse. Ils interagissent très peu avec la matière et les détecter est un défi. Pourquoi intéressent-ils tant les physiciens ? Parce que leurs propriétés fondamentales sont encore imparfaitement cernées ; mais aussi parce qu'en considérant un type de ces particules – les antineutrinos électroniques – produit par la radioactivité bêta, les physiciens et géophysiciens ont imaginé diverses applications hors du champ de la physique des particules.

Ainsi, depuis quelques années, ces antineutrinos livrent des indices sur l'origine de la Terre et son histoire thermique. En outre, ils fournissent des renseignements sur l'évolution du combustible dans les réacteurs nucléaires et devraient livrer de nouveaux indices sur la production des éléments lourds dans les supernovae.

Deux gros détecteurs d'antineutrinos électroniques, pesant près de 1 000 tonnes, épient en continu l'intérieur de la Terre pour aider les géologues à déterminer l'abondance de l'uranium et du thorium et leur distribution dans les entrailles de la Terre. Ce sont les principaux éléments radioactifs producteurs de chaleur de la planète. Un troisième gros détecteur les rejoindra bientôt. Ces détecteurs, ainsi que d'autres beaucoup plus petits, peuvent aussi surveiller les réacteurs nucléaires partout dans le monde (voir la figure 1). La prochaine génération de détecteurs, encore plus gros, servira dans plusieurs domaines (la physique des astroparticules, la géologie, les études de réacteurs et la physique des particules élémentaires).

Les trois types de neutrinos – on les qualifie de « saveurs » électronique, muonique et tauique – sont insensibles à l'interaction électromagnétique et à l'interaction forte, deux des trois interactions fondamentales du modèle standard de la physique des particules. Autrement dit, ils ne sont sensibles qu'à l'interaction faible. Ils sont au moins un million de fois plus légers que l'électron. Leur probabilité d'interaction est très faible, ce qui rend les neutrinos difficiles à détecter. Malgré ces obstacles, ces particules permettent de scruter les entrailles des étoiles ou de notre planète.

Les neutrinos restent un sujet central pour la recherche fondamentale en physique des particules. Les scientifiques ont encore à en étudier des propriétés telles que leurs masses ou leurs oscillations

–cette capacité des neutrinos de changer spontanément et périodiquement de saveur au fil du temps. Nous nous intéresserons ici surtout à leur utilisation en géologie et dans le domaine de la sûreté nucléaire.

L'existence des neutrinos a été postulée en 1930 par le physicien autrichien Wolfgang Pauli, afin que la conservation de la quantité de mouvement dans les désintégrations bêta soit conservée. Pauli supposa que la réaction de transformation d'un neutron en proton s'accompagnait non seulement de l'émission d'un électron, mais aussi de l'émission d'une autre particule inconnue à l'époque, le neutrino, sans masse et indétectable, excepté sous forme de quantité de mouvement manquante (voir l'encadré ci-dessous). Mais en 1956, les physiciens américains Frederick Reines et Clyde Cowan et leurs collègues ont réalisé la première observation d'antineutrinos électroniques, au moyen d'un détecteur placé à une dizaine de mètres d'un réacteur nucléaire de la centrale nucléaire de Savannah River, aux États-Unis.

Dix ans plus tard, le physicien et chimiste américain Raymond Davis mit au point un détecteur installé dans les profondeurs de la mine Homestake de Lead, dans le Dakota du Sud, et a observé pour la première fois des neutrinos électroniques

L'ESSENTIEL

■ Les neutrinos

interagissent peu avec la matière, mais leur production en grand nombre permet d'en détecter quelques-uns.

■ Les géoneutrinos,

produits par les éléments radioactifs du manteau et de la croûte terrestres, révèlent la contribution de la radioactivité à la chaleur produite par la planète.

■ Les réacteurs nucléaires

peuvent être surveillés à distance en étudiant les antineutrinos qu'ils produisent.

Page précédente : Lawrence Berkeley National Laboratory, Roy Kaltschmidt, photographie

en provenance du Soleil. Mais il n'en a détecté que le tiers environ de ce qui était attendu d'après les modèles solaires, qui estiment l'énergie produite par notre étoile, le nombre de réactions de fusion en jeu et le flux de neutrinos électroniques émis.

Ce déficit était la première indication d'un phénomène aujourd'hui attesté par de nombreuses expériences : l'oscillation des neutrinos. Une partie de ces particules venant du Soleil changeaient de saveur lors de leur trajet, mais l'expérience de Davis n'était pas conçue pour détecter les deux autres types de neutrinos (les neutrinos muoniques et tauiques).

Des oscillations de la saveur

À partir de 2002, le détecteur KamLAND (*Kamioka Liquid AntiNeutrino Detector*), installé dans la mine de zinc de Kamioka, au Japon, a surveillé les émissions d'antineutrinos de dizaines de réacteurs situés à des distances diverses. Comme pour les neutrinos solaires, les physiciens ont mis en évidence que les antineutrinos électroniques changeaient de saveur.

Dans le formalisme mathématique de la physique des particules, le phénomène d'oscillation des neutrinos ne peut se comprendre que si les neutrinos sont

NEUTRINOS, ANTINEUTRINOS ET DÉSINTÉGRATION BÊTA

Le modèle standard de la physique des particules inclut trois types de neutrinos associés aux trois leptons chargés – l'électron, le muon et le tau. Ces six particules ne sont pas sensibles à l'interaction forte. Les neutrinos n'ont pas de charge électrique et donc pas d'interaction électromagnétique.

On définit un « nombre leptonique » L , qui vaut $+1$ pour les leptons, -1 pour les antileptons et 0 pour toutes les autres particules. Dans toute réaction entre particules, le nombre leptonique est conservé : la somme des nombres leptoniques des particules qui réagissent est égale à la somme de ceux des particules produites.

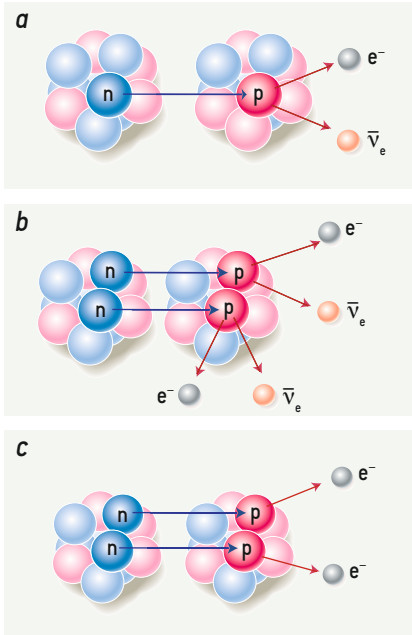
Ainsi, dans la désintégration bêta (a), un neutron ($L = 0$) se transforme en proton ($L = 0$) avec l'émission d'un électron ($L = +1$) et d'un antineutrino ($L = -1$). Cette réaction est courante pour de nombreux isotopes riches en neutrons et à longue durée de vie que sont par exemple l'uranium, le thorium et le potassium.

Dans les réactions stellaires de fusion, la réaction opposée se produit : les protons deviennent des neutrons quand les noyaux légers, riches en protons, fusionnent. Ainsi, les étoiles produisent surtout des neutrinos.

Il y a une ambiguïté sur la nature de l'antiparticule du neutrino. Si l'antineutrino est une particule distincte,

le neutrino est un « fermion de Dirac ». Si, au contraire, le neutrino est sa propre antiparticule, on parle de « fermion de Majorana ».

Pour déterminer la nature de la particule, les physiciens cherchent à observer deux désintégrations bêta simultanées (b). Dans la plupart des cas, il y a émission de deux électrons et deux antineutrinos. Si le neutrino est un fermion de Majorana, l'antineutrino émis par un neutron peut être absorbé par l'autre neutron puisqu'il est aussi un neutrino. De nombreuses expériences cherchent à observer la double désintégration bêta sans émission de neutrino (c), qui prouverait que l'on a affaire à des fermions de Majorana.



n = neutron ; p = proton ;
e⁻ = électron ; ν̄ₑ = antineutrino électronique

Pour la Science