

–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.

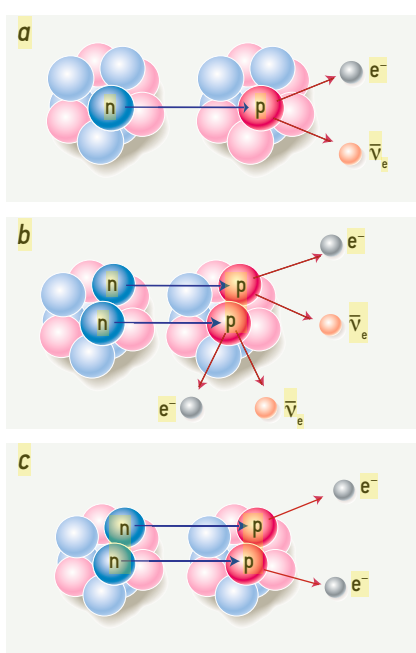
Ainsi, dans la désintégration bêta (*a*), un neutron ($L = 0$) se transforme en proton ($L = 0$) avec l'émission d'un électron ($L = +1$) et d'un antineutrino ($L = -1$). Cette réaction est courante pour de nombreux isotopes riches en neutrons et à longue durée de vie que sont par exemple l'uranium,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

des particules mettant en jeu trois masses différentes (on ignore la valeur précise de ces masses aujourd'hui).

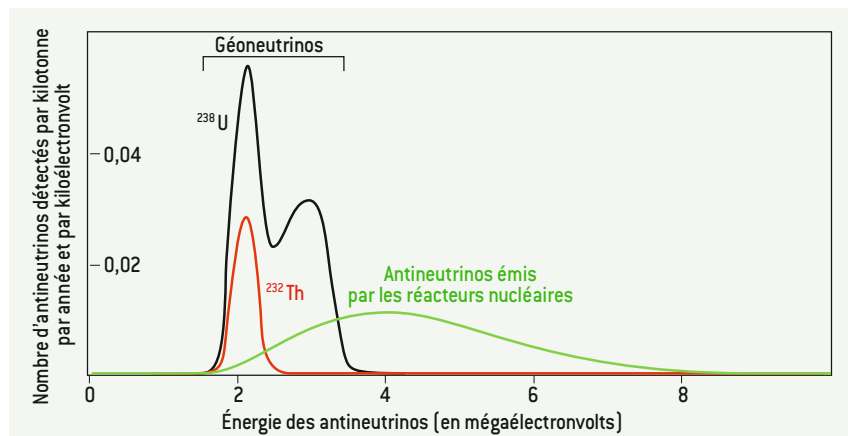
L'expérience KamLAND a été conçue pour étudier la physique fondamentale des antineutrinos électroniques, émis par des réacteurs situés à des distances variées avec des énergies pouvant atteindre huit mégaelectronvolts. Dans le détecteur, les antineutrinos incidents interagissent avec des protons (noyaux d'hydrogène) au sein d'une kilotonne de scintillateur liquide, selon la réaction : antineutrino électronique + proton $\rightarrow$ positron + neutron. La production d'un positron et d'un neutron se traduit par l'émission de photons, captés et amplifiés par des milliers de photomultiplicateurs entourant le scintillateur. L'énergie de l'antineutrino doit être supérieure à 1,8 mégaelectronvolt pour que la réaction ait lieu.

Garder un œil sur les réacteurs

Les futures générations de détecteurs – comme l'expérience *Nucifer* développée par des laboratoires français – pourront surveiller le fonctionnement des réacteurs nucléaires et participer au contrôle de la non-prolifération d'armes nucléaires. Au début du cycle du combustible nucléaire, les barres de combustible produisent du plutonium de qualité militaire en plus de nombreux autres isotopes radioactifs. Dans les réacteurs nucléaires non suspects, les barres de combustible sont utilisées jusqu'à ce qu'elles soient fortement (mais pas complètement) appauvries en matériau fissile, en général en 18 mois environ. Une utilisation clandestine des réacteurs pour produire de l'armement nucléaire à base de plutonium serait facile à repérer, le réacteur subissant des arrêts anormalement fréquents pour changer les barres.

Quatre isotopes contribuent au flux d'antineutrinos issus d'un réacteur. Pour KamLAND, ces particules ont une énergie détectable moyenne d'environ quatre mégaelectronvolts. En revanche, le spectre des antineutrinos issus des désintégrations bêta des isotopes à longue durée de vie naturellement présents en abondance dans la croûte et le manteau terrestres culmine à 3,3 mégaelectronvolts (voir la figure 2).

KamLAND peut étudier ces « géoneutrinos » (antineutrinos produits par la



2. LE NOMBRE D'ANTINEUTRINOS ÉLECTRONIQUES détectés par kilotonne de scintillateur en fonction de l'énergie de la particule dépend de la source d'émission. Le seuil à 1,8 mégaelectronvolt correspond à l'énergie minimale nécessaire pour la réaction de désintégration bêta inverse. Au-dessous de 3,5 mégaelectronvolts, le spectre attendu est dominé par les géoneutrinos, issus des chaînes de désintégration de l'uranium 238 et du thorium 232 de la croûte et du manteau terrestres. Le spectre des antineutrinos provenant des réacteurs nucléaires culmine autour de quatre mégaelectronvolts, énergie à laquelle l'amplitude du spectre des géoneutrinos est négligeable. Il est ainsi possible de faire la distinction entre les sources naturelles et les réacteurs.

Terre) sur le même principe que les antineutrinos électroniques issus des centrales nucléaires, mais le détecteur n'a pas été conçu pour ce type d'observations. En fait, l'implantation délibérée de KamLAND au milieu de plusieurs dizaines de réacteurs crée un bruit de fond gênant pour la recherche des géoneutrinos. La collaboration internationale a rapporté la première détection de géoneutrinos en 2005, mais avec un bruit de fond important des réacteurs. Plus récemment, les physiciens ont observé une centaine d'événements de géoneutrinos avec un bruit de fond réduit, grâce aux améliorations apportées au détecteur et à l'arrêt inattendu de réacteurs voisins.

Le seul autre détecteur existant capable de faire des mesures de géoneutrinos, *Borexino*, est plus petit que KamLAND. Mais, situé dans un tunnel sous le Gran Sasso, le plus haut sommet des Apennins, en Italie, il est beaucoup moins gêné par les réacteurs alentours : le réacteur nucléaire le plus proche est à un millier de kilomètres. L'équipe de *Borexino* a publié ses premières mesures de géoneutrinos en 2010. Les géophysiciens et géochimistes peuvent maintenant s'appuyer sur deux gros détecteurs situés dans des environnements distincts, et confrontés à des bruits de fond différents.

La Terre émet environ six millions d'antineutrinos électroniques par centimètre carré et par seconde. Un tel flux surfacique émerge librement de l'intérieur de notre

planète parce que la Terre, comme tous les matériaux, est presque transparente pour ces particules. La probabilité qu'un neutrino, avec une énergie de un mégaelectronvolt, traverse une épaisseur d'une année-lumière de plomb sans interagir est très élevée. Le flux important de géoneutrinos permet d'augmenter les chances que le détecteur enregistre un.

L'observation des géoneutrinos est une nouvelle méthode pour estimer les quantités d'uranium et de thorium présentes dans la croûte et le manteau terrestres, et clôt ainsi le débat sur les sources internes de chaleur de la Terre lancé il y a un siècle et demi par lord Kelvin. Une mesure précise du flux surfacique de géoneutrinos indiquerait la part de la radioactivité dans la production totale de chaleur de la planète et permettrait de tester les différents modèles censés rendre compte de la composition de la Terre. Ces scénarios portent sur les matériaux et processus ayant contribué à la formation de la Terre, tel le matériau primitif indifférencié qui s'est formé dans la nébuleuse planétaire du Soleil il y a 4,5 milliards d'années et qui se retrouve aujourd'hui dans les météorites chondritiques.

Les géologues espèrent tirer de ces données ou de futures expériences des informations sur l'existence, dans le manteau, de zones riches en éléments radioactifs, dont certaines se seraient formées à la frontière entre le noyau et le manteau tôt dans l'histoire de la Terre. Les géoneutrinos pourront aussi nous éclairer sur la question du niveau