

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

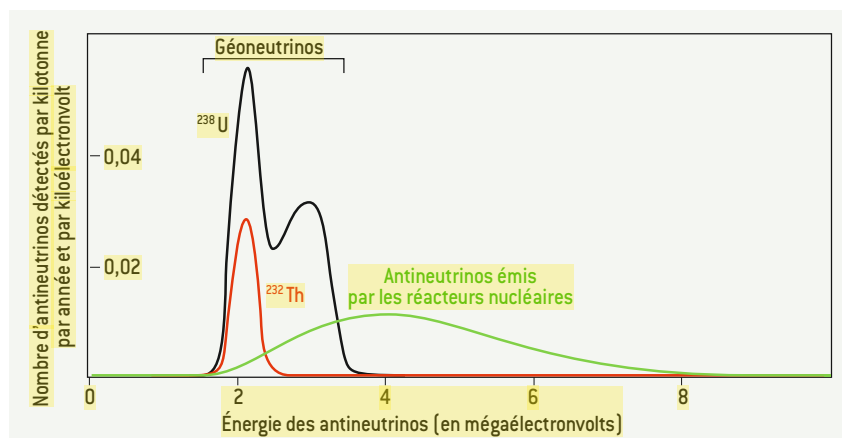
L'expérience KamLAND a été conçue pour étudier la physique fondamentale des antineutrinos électroniques, émis par des réacteurs situés à des distances variées avec des énergies pouvant atteindre huit mégaelectronvolts. Dans le détecteur, les antineutrinos incidents interagissent avec des protons (noyaux 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