

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

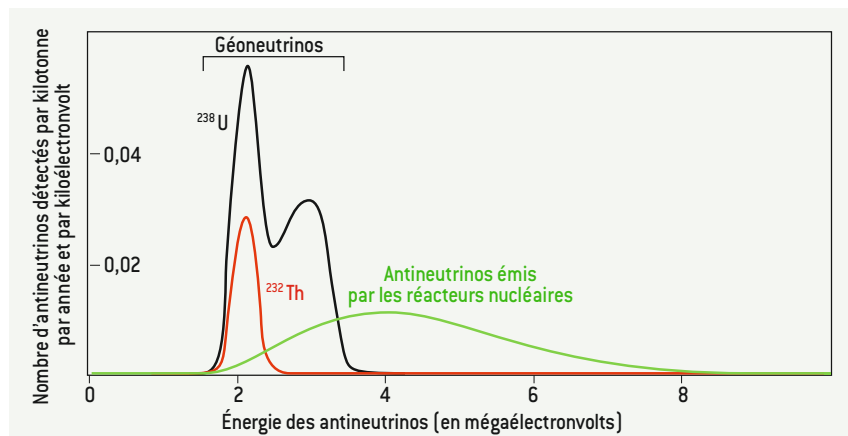
L'expérience KamLAND a été conçue pour étudier la physique fondamentale des antineutrinos électroniques, émis par des réacteurs situés à des distances variées avec des énergies pouvant atteindre huit mégaelectronvolts. Dans le détecteur, les antineutrinos incidents interagissent avec des protons (noyaux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

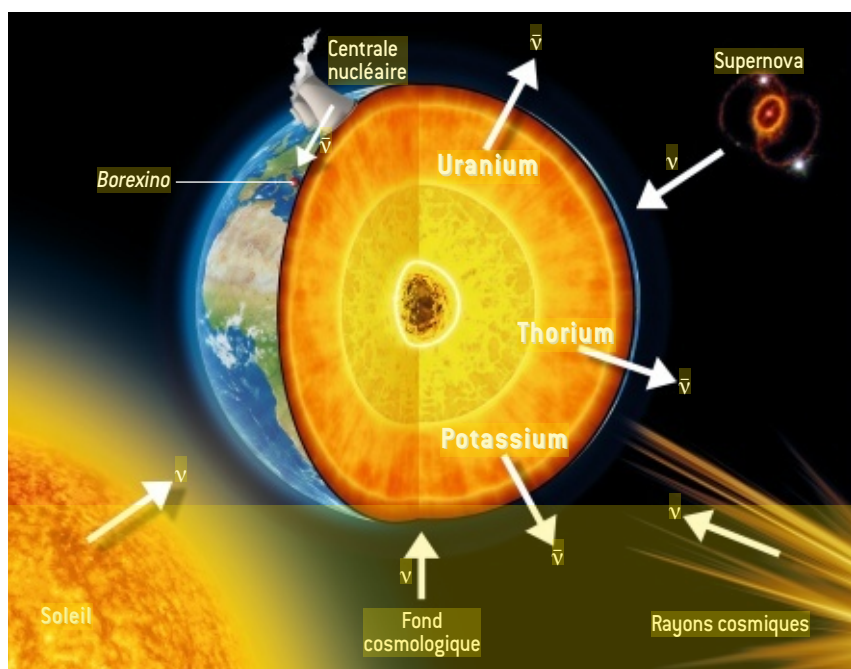
Le seul autre détecteur existant capable de faire des mesures de géoneutrinos, *Borexino*, est plus petit que KamLAND. Mais, situé dans un tunnel sous le Gran Sasso, le plus haut sommet des Apennins, en Italie, il est beaucoup moins gêné par les réacteurs alentours : le réacteur nucléaire le plus proche 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



3. LA DÉSINTÉGRATION DE L'URANIUM ET DU THORIUM, présents dans la croûte et le manteau terrestres, réchauffent la Terre. Ces éléments radioactifs émettent des antineutrinos qui arrivent à la surface de la planète, où certains sont détectés par les expériences *Borexino*, en Italie, et *KamLAND*, au Japon. Ces deux installations sont aussi sensibles aux antineutrinos (notés $\bar{\nu}$) provenant des réacteurs nucléaires. D'autres expériences étudient les neutrinos (ν) émis par le Soleil, par les supernovae et ceux produits par l'interaction des rayons cosmiques avec les atomes de l'atmosphère. On ignore encore comment détecter les neutrinos fossiles issus du Big Bang et présents dans le fond cosmologique.

de radioactivité (vraisemblablement faible) du noyau terrestre.

De nombreuses autres questions géophysiques peuvent trouver des éléments de réponse grâce aux géoneutrinos. Par exemple, dans quelle mesure la puissance radiogénique – due aux éléments radioactifs – de la Terre participe à la tectonique des plaques ou contrôle la dynamo terrestre dans le noyau de fer liquide ? Un autre débat animé concerne la part du flux de chaleur surfacique qui provient de la désintégration radioactive actuelle et la part due à des sources primordiales de chaleur (énergie emmagasinée lors de l'accrétion des gaz, poussières et blocs rocheux qui ont formé la planète, radioactivité ancienne, etc.). La radioactivité actuelle assure-t-elle toute l'énergie dissipée aujourd'hui ?

On estime le flux de chaleur rayonné par la Terre à environ 46 térawatts, dont quelque 8 térawatts sont dus au chauffage radiogénique des continents, d'après les estimations des quantités de potassium, thorium et uranium radioactifs présentes dans la croûte continentale.

Dans les profondeurs de la Terre, la chaleur radiogénique provient à 40 pour cent du thorium, à 40 pour cent de l'uranium

et à 20 pour cent du potassium. Ces proportions sont déterminées à partir des énergies de désintégration des différents isotopes et des rapports d'abondance thorium/uranium, potassium/uranium, etc., au sein de la Terre, ces derniers étant eux-mêmes donnés par l'étude des météorites chondritiques (le rapport d'abondance thorium/uranium est égal à 4, et le rapport potassium/uranium est égal à 10000).

Combien de chaleur radioactive ?

Dans les $46 - 8 = 38$ térawatts de chaleur rayonnée par le manteau terrestre, quelle est la part des désintégrations radioactives ? Cette part dépend directement de l'abondance des éléments radioactifs dans le manteau. La détermination de ces abondances doit faire appel à des modèles de la composition de la Terre, qui sont contraints par des données sismiques et géodésiques. La mesure du flux de géoneutrinos est un nouvel outil, qui permet de tester les prédictions des différents modèles quant aux quantités d'éléments radioactifs.

Pour estimer la composition de la Terre, on se sert de trois approches différentes :

cosmochimique, géochimique et géophysique, qui donnent des quantités d'uranium dans la croûte et le manteau variant entre 5×10^{16} et $1,3 \times 10^{17}$ kilogrammes. La contribution du thorium et du potassium à la production de chaleur est obtenue par extrapolation, à partir des rapports d'abondance avec l'uranium – l'élément naturel le plus rare du Système solaire.

Les cosmochimistes cherchent à concilier les compositions chimiques et isotopiques des météorites chondritiques avec celles de la Terre. Ils ont remarqué que les chondrites à enstatite (une classe rare caractérisée par son extrême pauvreté en oxydes) partagent avec la Terre les mêmes compositions isotopiques pour de nombreux éléments. Ils en concluent que ce sont les briques essentielles à partir desquelles la Terre s'est formée. Ces chondrites sont plutôt pauvres en uranium, ce qui conduit les cosmochimistes à opter pour une valeur basse des abondances possibles en uranium.

Les cosmochimistes comparent la composition de roches en surface probablement originaires du manteau avec celle des chondrites. Les premières sont plus pauvres en fer et silicium que les secondes. Pour expliquer ces différences, ils doivent supposer que la partie profonde du manteau a une composition différente, plus riche en fer et en silicium, de celle du manteau supérieur. Mais de nombreux géologues rejettent l'idée d'une telle hétérogénéité à grande échelle dans le manteau, car elle n'est pas compatible avec les images sismologiques des plaques océaniques de subduction qui plongent dans le manteau profond, brassant sans cesse l'ensemble du manteau soumis à la convection.

Une approche alternative propose une modélisation fondée sur l'utilisation d'échantillons géochimiques réels du manteau et de la croûte pour estimer la concentration en éléments dans le manteau primitif avant la formation de la croûte. Ces modèles géochimiques prédisent environ 8×10^{16} kilogrammes d'uranium dans la croûte et le manteau. Ils sont cohérents avec les modèles d'élasticité du manteau et avec des modèles chondritiques plus larges qui minimisent l'importance des enstatites. Mais le point faible de ces approches géochimiques est que les roches émergeant du manteau n'échantillonnent que des profondeurs de quelques centaines de kilomètres et ne révèlent pas si elles se sont trouvées autrefois à de plus grandes profondeurs dans le manteau.

Quant aux modèles géophysiques, ils utilisent les connaissances actuelles du flux de chaleur surfacique mesuré pour trouver des solutions à l'évolution thermique de la planète qui spécifient les contributions relatives de la chaleur primordiale et de la production radiogénique actuelle de chaleur. Les géophysiciens modélisent la convection de chaleur au sein du manteau en termes de diffusion thermique et des lois de la rhéologie. Typiquement, les modèles géophysiques prédisent les abondances en uranium les plus élevées pour le manteau. Dans ce cas, plus de la moitié du flux de chaleur actuel est d'origine radiogénique. Ces trois approches diffèrent en ce qui concerne la structure, l'abondance et la distribution des éléments producteurs de chaleur de la Terre.

Depuis la première détection de géoneutrinos par KamLAND en 2005, des avancées considérables ont eu lieu. Les physiciens de KamLAND ont obtenu des résultats avec des incertitudes plus faibles en 2011. La nouvelle valeur pour les contri-

butions combinées de l'uranium et du thorium au flux de chaleur de la Terre reste cohérente avec les trois grandes classes de modèles terrestres. Elle exclut désormais, avec un niveau de confiance de 97 pour cent, un modèle entièrement radiogénique qui suppose que toute la chaleur primordiale de la planète s'est dissipée depuis longtemps et qui attribue l'intégralité du flux de chaleur à la radioactivité actuelle. La mesure en 2010 de *Borexino*, avec sa grande barre d'erreur, ne permettait d'exclure aucun scénario.

Un troisième détecteur de géoneutrinos sera mis en service en 2013: le détecteur SNO+. Cet instrument est une version modernisée du détecteur à eau lourde de neutrinos solaires de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury, dans l'Ontario (Canada). Un liquide scintillateur remplace désormais l'eau lourde. La détection des géoneutrinos sera pour SNO+ une activité annexe, comme c'était le cas pour KamLAND et *Borexino*. L'un de ses objectifs principaux est la recherche des doubles désintégrations

■ LES AUTEURS



W. McDONOUGH est professeur de géologie à l'Université du Maryland, aux États-Unis.



J. LEARNED est professeur de physique à l'Université de Hawaï à Honolulu.



Stephen DYE est professeur de physique à l'Université Hawaï Pacifique à Kaneohe.

L'ANOMALIE DES ANTINEUTRINOS DE RÉACTEUR : UN QUATRIÈME NEUTRINO ?

En 2011, des chercheurs du CEA et de l'IN2P3 ont publié des résultats surprenants sur le flux d'antineutrinos produits par les réacteurs de centrales nucléaires. Ces derniers produisent de l'énergie par la fission entretenue de noyaux d'uranium et de plutonium. À chaque fission, les noyaux instables produits subissent des désintégrations radioactives de type bêta, qui émettent, chacune, un antineutrino et un électron. Pour évaluer le flux d'antineutrinos issu de réacteurs, toutes les expériences, avant *Double Chooz*, avaient utilisé des données de référence provenant de mesures effectuées auprès du réacteur de l'ILL à Grenoble dans les années 1980. Mais un décalage de plus de trois pour cent par rapport aux prédictions, qui faisaient référence depuis 25 ans, a été mis en évidence.

Les résultats de 20 expériences réalisées dans les années 1980-1990 en France, aux États-Unis, en Suisse et en Russie ont été réexaminés avec un regard nouveau. En incluant non seulement les nouveaux résultats, mais aussi la réévaluation du taux théorique d'interaction dans les détecteurs, les physiciens sont arrivés à la conclusion que sept pour

cent d'antineutrinos manquent à l'appel dans ces expériences situées à moins de 100 mètres des réacteurs ! Une découverte étonnante, car les mesures s'accordaient aux anciennes prédictions jusqu'alors... Cet effet est désormais connu sous le nom d'anomalie des antineutrinos de réacteur.

Cette anomalie pourrait s'expliquer par une erreur dans le calcul théorique du flux d'antineutrinos. Toutefois, aucune faille n'a été trouvée à ce jour pour expliquer l'amplitude importante de l'effet. Les chercheurs du CEA ont donc proposé une hypothèse plus hardie, impliquant une extension du modèle standard de la physique des particules : l'existence d'un quatrième neutrino qui serait à rajouter au bestiaire du modèle standard de la physique des particules. Ce neutrino serait « stérile », c'est-à-dire insensible à toute interaction hormis la gravitation, mais il pourrait se mélanger avec les trois saveurs connues de neutrinos (électronique, muonique et tauique) par le biais du phénomène d'oscillation. L'existence d'un quatrième neutrino aurait par ailleurs des conséquences cosmologiques, car il

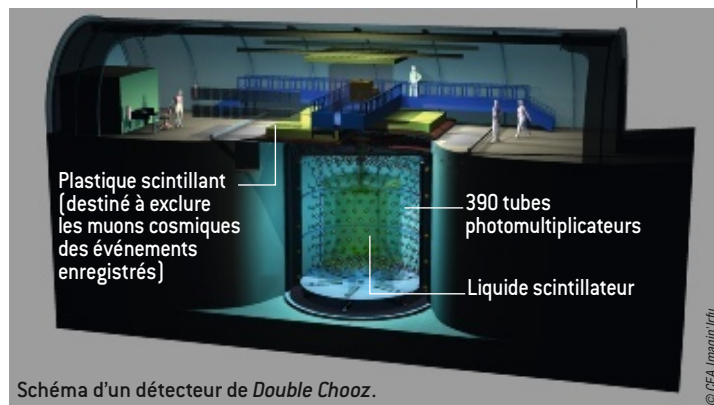


Schéma d'un détecteur de *Double Chooz*.

pourrait contribuer à la mystérieuse masse manquante de l'Univers.

En somme, selon cette hypothèse, la détection des neutrinos de réacteur souffrirait d'un déficit dû à la transformation (l'oscillation) d'antineutrinos en antineutrinos stériles, donc indétectables !

L'explication de l'anomalie par l'existence d'un neutrino stérile va dans le sens d'autres résultats indépendants : les données d'étalonnage des expériences de neutrinos solaires (*Sage* et *Gallex*) et les résultats des expériences américaines auprès de faisceaux de neutrinos produits par des accélérateurs (*LSND* et *MiniBoone*).

La preuve irréfutable de l'existence de cette nouvelle particule passera par une future série de mesures : la détection d'antineutrinos à moins de dix mètres des cœurs compacts de réacteurs ou le déploiement d'une source intense de neutrinos au cœur ou près de grands détecteurs à liquide scintillant, qui donnerait une mesure très propre de l'empreinte de l'oscillation en fonction de la distance à la source. Une quinzaine de projets sont à l'étude et il y a fort à parier que certains d'entre eux seront réalisés dans les dix prochaines années.

Thierry Lasserre
CEA Saclay - APC