

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 1000 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.

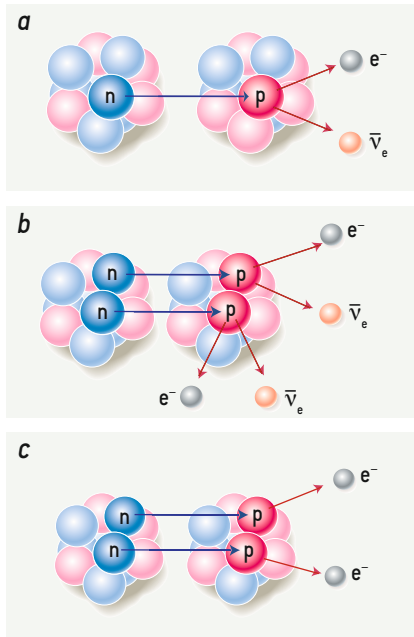
Ainsi, dans la désintégration bêta (*a*), un neutron ($L = 0$) se transforme en proton ($L = 0$) avec l'émission d'un électron ($L = +1$) et d'un antineutrino ($L = -1$). Cette réaction est courante pour de nombreux isotopes riches en neutrons et à longue durée de vie que sont par exemple l'uranium,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

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

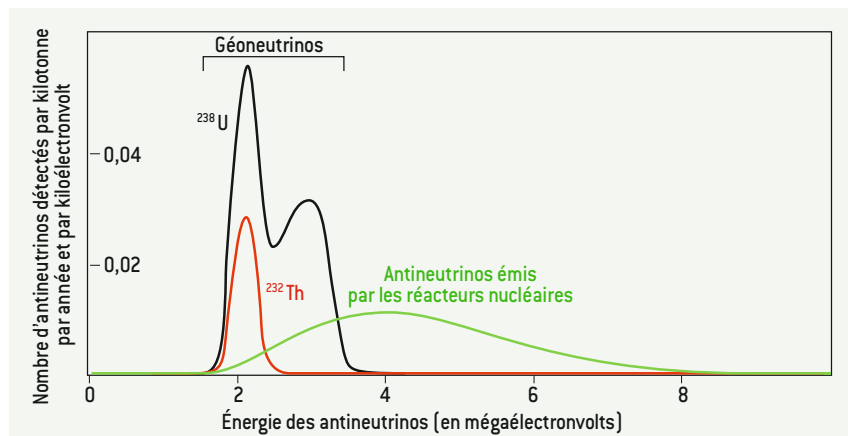
L'expérience KamLAND a été conçue pour étudier la physique fondamentale des antineutrinos électroniques, émis par des réacteurs situés à des distances variées avec des énergies pouvant atteindre huit mégaelectronvolts. Dans le détecteur, les antineutrinos incidents interagissent avec des protons (noyaux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

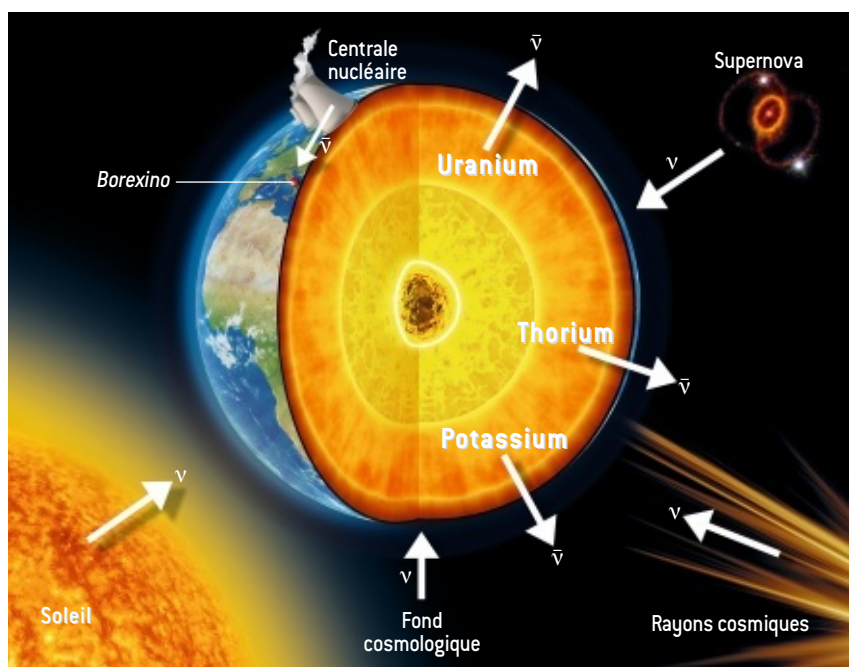
Le seul autre détecteur existant capable de faire des mesures de géoneutrinos, *Borexino*, est plus petit que KamLAND. Mais, situé dans un tunnel sous le Gran Sasso, le plus haut sommet des Apennins, en Italie, il est beaucoup moins gêné par les réacteurs alentours : le réacteur nucléaire le plus proche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



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

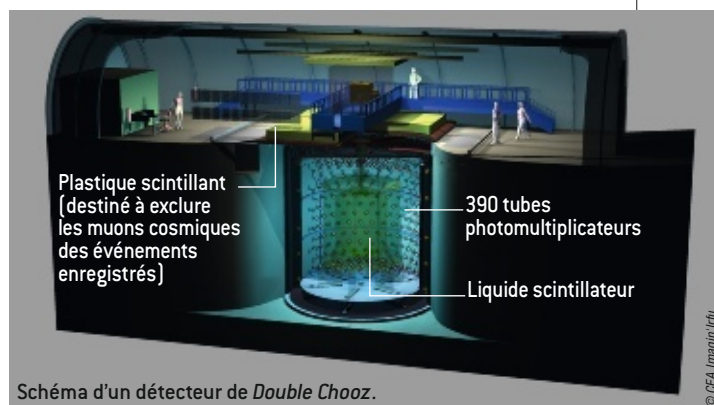


Schéma d'un détecteur de *Double Chooz*.

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

Neutrinos et supernovae

Les neutrinos sont produits en grand nombre dans les supernovae. À ce jour, seule la supernova de 1987, dans la galaxie du Grand Nuage de Magellan, a été observée en coïncidence avec des neutrinos. Trois détecteurs distincts ont observé 24 neutrinos provenant de la supernova. Ces mesures sont compatibles avec les modèles de supernovae selon lesquels 99 pour cent de l'énergie de l'explosion est émise sous forme de neutrinos. La future génération d'expériences en recherchera d'autres, pour mieux comprendre les mécanismes à l'origine de ces explosions d'étoiles.

bêta sans émission de neutrinos, qui ne peuvent se produire que si les neutrinos sont des particules de Majorana (c'est-à-dire des particules identiques à leurs antiparticules, voir l'encadré page 44). Grâce à sa situation géographique, SNO+ devrait avoir un taux de comptage de géoneutrinos double de celui de KamLAND, et un bruit de fond dû aux réacteurs très inférieur.

Les détecteurs s'améliorent progressivement. Ils sont fabriqués à partir de matériaux plus purs qui minimisent le bruit de fond. *Borexino* contient moins d'une demi-kilotonne de scintillateur, mais la grande pureté du liquide et de son contenant lui permet de détecter les neutrinos par des réactions de diffusion élastique ainsi que par désintégration bêta inverse. Aussi propre que *Borexino*, le détecteur SNO+, à deux kilomètres sous la surface, sera le plus profond des détecteurs de géoneutrinos, un atout pour réduire le bruit de fond des muons du rayonnement cosmique.

Les grandes expériences en projet se proposent d'inclure des techniques de détection avancées qui seront utiles pour des applications en physique des particules, en géologie, en physique des astroparticules et pour la sûreté nationale. Une équipe de l'Université technique de

de l'Australie et de la limite entre le noyau et le manteau. Placé là, au-dessus de la mince croûte océanique, qui est relativement dépourvue de radioactivité, il aurait un meilleur accès aux émissions du manteau que les installations terrestres.

Mesurer la direction

Une importante amélioration des détecteurs consisterait à pouvoir déterminer la direction des neutrinos enregistrés. Dans la réaction de désintégration bêta inverse utilisée par une partie des détecteurs (antineutrino + proton $\rightarrow$ positron + neutron), le positron émis produit un bref éclair lumineux en traversant quelques millimètres de scintillateur avant de s'annihiler avec un électron. L'intensité de l'éclair donne une mesure approximative de l'énergie du neutrino. Environ 0,2 milliseconde plus tard, le neutron, beaucoup plus lourd, qui a parcouru environ un mètre avec une très petite partie de l'énergie cinétique de l'antineutrino incident, crée un rayon gamma de 2,2 mégaelectronvolts en fusionnant avec un proton pour former un deutéron.

Avec ce type d'événements à double éclair dans une fenêtre de temps, d'espace et d'énergie aussi étroitement spécifiée, il y a peu de risque de fausses détections liées à d'autres processus. Mais aucun des détecteurs fondés sur la désintégration bêta inverse n'est capable de déterminer la direction incidente des antineutrinos événement par événement.

Identifier la direction d'un antineutrino enregistré par un détecteur à scintillation serait très intéressant pour la géologie, l'astrophysique et la surveillance nucléaire. Mais KamLAND et *Borexino* en sont incapables. Le détecteur d'antineutrinos de Chooz, en France, et celui de Palo Verde, aux États-Unis, beaucoup plus petits, ont fait la démonstration qu'ils étaient capables de déterminer la direction de la source à 20 degrés près pour des échantillons statistiques de quelques milliers d'événements, en provenance d'un réacteur situé à quelques kilomètres. Cela leur est possible car, pour un échantillon assez grand provenant d'une source unique, les trajectoires aléatoires des neutrons produits (sur une longueur d'un mètre environ) pointent en moyenne dans la direction opposée à cette source.

Nous espérons que les démonstrations de Chooz et de Palo Verde ne sont qu'un début. Le contingent de l'Université de

DÉTERMINER LA DIRECTION des neutrinos augmenterait fortement notre capacité à surveiller à distance les réacteurs nucléaires.

Munich monte un projet de détecteur à scintillation gigantesque de 50 kilotonnes nommé LENA (*Low Energy Neutrino Astronomy*). Une proposition américaine d'expérience appelée *Hanohano* (*Hawaiian Anti-Neutrino Observatory*, doublé comme le veut la tradition linguistique hawaïenne) envisage un détecteur mobile avec 10 à 50 kilotonnes de scintillateur liquide, qui opérerait au fond de la mer. Il pourrait être déployé soit au milieu de l'océan, loin de la radioactivité de la croûte continentale, soit à différentes distances de réacteurs nucléaires particuliers. La première configuration permettrait de se concentrer sur la radioactivité du manteau plutôt que sur celle de la croûte, et la seconde faciliterait l'étude des oscillations des neutrinos en fonction de la distance à la source.

Il serait intéressant d'installer un tel détecteur mobile au milieu du Pacifique Sud, à égale distance de l'Amérique latine,

BIBLIOGRAPHIE

A. Gando et al., Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements, *Nature Geoscience*, vol. 4, pp. 647-651, 2011.

G. Mention et al., The reactor antineutrino anomaly, *Physical Review D*, vol. 83, 073006, 2011.

G. Bellini et al., Observations of geo-neutrinos, *Physics Letters B*, vol. 687, pp. 299-304, 2010.

T. Lasserre et D. Vignaud, La mystérieuse identité des neutrinos, *Dossier Pour la Science*, n° 62, 2009.

Hawaï au sein de la collaboration KamLAND développe un petit détecteur de neutrinos qui peut localiser l'interaction de l'antineutrino à quelques millimètres près et un scintillateur dopé qui peut, de façon semblable, localiser le point d'arrivée du neutron.

La détermination de la direction des neutrinos augmenterait fortement notre capacité à surveiller à distance les réacteurs nucléaires en identifiant les particules qui nous intéressent et en éliminant celles qui viennent d'ailleurs. Au plus près des centrales, des détecteurs directionnels permettraient de forger une image du cœur du réacteur en fonctionnement. Les géologues utiliseraient de tels détecteurs pour établir des cartes tomographiques des neutrinos du manteau, qui indiqueraient les zones de forte accumulation de thorium et d'uranium. Et les physiciens des particules sont très intéressés par tout ce qui pourrait renforcer le rapport signal sur bruit des données d'oscillation des neutrinos.

De petits détecteurs sont en cours de développement, spécifiquement pour surveiller les émissions d'antineutrinos des réacteurs nucléaires. L'un des prototypes est pour l'essentiel une version moderne du

détecteur original de Reines-Cowan. Contenant environ une tonne de scintillateur liquide, il a fonctionné avec succès auprès de centrales nucléaires d'une puissance de l'ordre du gigawatt. Sans avoir accès à l'information de la salle de commande, ces dispositifs ont prouvé leur capacité à observer des cycles quotidiens de production et l'évolution du cycle du combustible.

De petits mouchards nucléaires

Contrairement aux détecteurs d'une kilotonne, profondément enterrés et très protégés des rayons cosmiques, les appareils de surveillance d'un mètre cube fonctionnant en surface ou à proximité seront inondés par les muons des rayons cosmiques. Mais les réacteurs sont des sources si brillantes d'antineutrinos – une centrale nucléaire rayonne en fonction de sa puissance environ 10^{20} antineutrinos par seconde – que le rapport signal sur bruit sera favorable si le détecteur est à proximité des réacteurs. À une distance de 25 mètres, un dispositif de surveillance

d'une tonne détecterait quelques centaines d'événements par jour.

L'adoption de détecteurs de neutrinos modernes, compacts et autonomes par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) représenterait une avancée importante. Les appareils de surveillance plus classiques sont obligés de se « brancher » sur l'infrastructure d'un réacteur (plomberie par exemple). On pense que les détecteurs de neutrinos vont se généraliser à côté des installations nucléaires qui coopèrent. Une telle surveillance non intrusive pourrait offrir des avantages économiques en aidant les opérateurs à ajuster le réacteur pour une production maximale d'électricité. De tels détecteurs, en donnant le signal pour un arrêt opportun du réacteur, aideraient peut-être à éviter des catastrophes nucléaires.

Le fantomatique neutrino est devenu un acteur de premier plan en cosmologie et dans la quête d'une théorie complète des interactions fondamentales. Il est en train d'acquiescer une autre place de choix pour sonder les profondeurs inaccessibles de notre planète et mieux surveiller les activités nucléaires. ■

60^e
CONGRÈS
des professeurs
de **Physique**
de **Chimie**

Confluences

Nantes
28, 29, 30, 31
octobre 2012
Cité des congrès
Ecole Centrale

PC
udppc
Union des professeurs
de physique et de chimie

Infos & inscriptions
<http://udppc.asso.fr/nantes2012>

Les voyages du LION

Grâce à une organisation sociale élaborée et à une fécondité soutenue, le lion a conquis presque tous les continents. Sa première sortie d'Afrique date de plusieurs centaines de milliers d'années.

Annik Schnitzler

Dans l'imaginaire collectif, le lion est souvent associé à l'Afrique. Pourtant, au cours de son histoire, il a conquis presque tous les continents : on trouve des restes osseux, ainsi que des peintures et des gravures préhistoriques le représentant, en Europe, en Amérique et en Asie. Il est d'ailleurs très présent dans de nombreuses traditions culturelles (voir l'encadré page 52).

La première sortie d'Afrique du lion remonte à plusieurs centaines de milliers d'années. Elle concernait des ancêtres du lion des cavernes, qui vivait en Eurasie et dont le statut taxonomique fait débat : certains le considèrent comme une espèce à part entière, en se fondant notamment sur des analyses génétiques, tandis que d'autres le rattachent aux lions africains dont descendent les lions actuels. Une seconde vague de lions s'est ensuite répandue en Europe et en Asie, avant de décliner, victime des activités humaines. Aujourd'hui, seules quelques centaines de lions sauvages survivent en dehors d'Afrique, dans l'Ouest de l'Inde.

© Bhushan Pandya

L'ESSENTIEL

- Outre l'Afrique, dont il est originaire, le lion a peuplé une grande partie du monde, lors de deux vagues de colonisation.
- Les lions de la première vague ont disparu naturellement il y a environ 10 000 ans, tandis que ceux de la seconde ont décliné sous l'influence des activités humaines. Aujourd'hui, ils sont encore présents en Inde.
- Les recherches récentes ont précisé le statut taxonomique et le mode de vie du lion, ce qui devrait aider à prendre des mesures adéquates pour sauvegarder l'espèce.



1. LE LION D'ASIE (à droite) n'est plus présent qu'en Inde. Il est plus petit que les lions vivant au Sud du Sahara (ci-dessus), en Afrique, et a une crinière moins fournie. Il est rattaché au groupe nord-africain/asiatique. Outre l'Asie du Sud-Ouest, ce groupe a peuplé l'Afrique du Nord et une partie de l'Europe – d'où il a disparu –, et peut-être aussi le centre et l'Ouest de l'Afrique.