

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

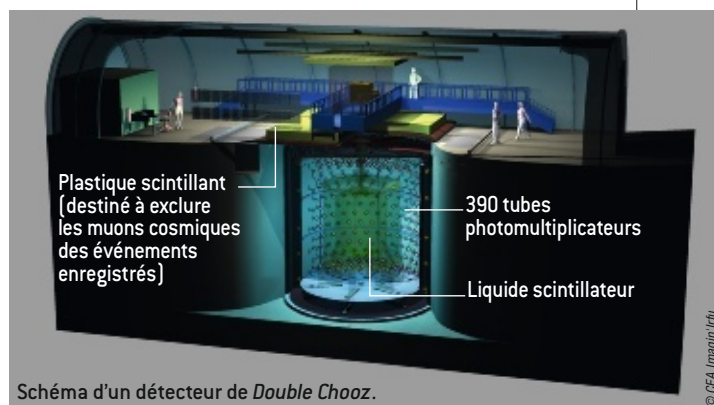


Schéma d'un détecteur de *Double Chooz*.

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.