

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 présentent 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

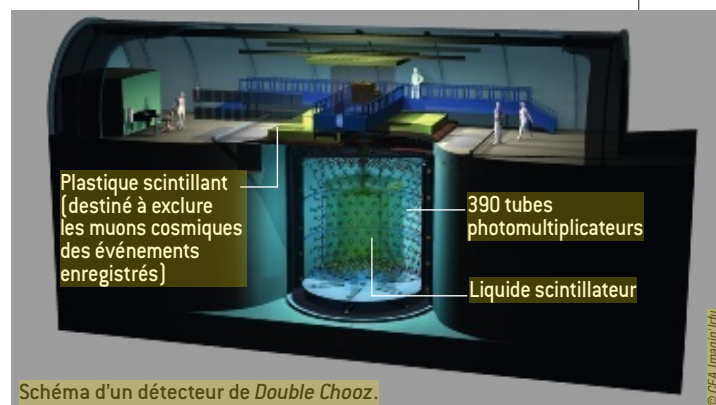


Schéma d'un détecteur de *Double Chooz*.

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