

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>