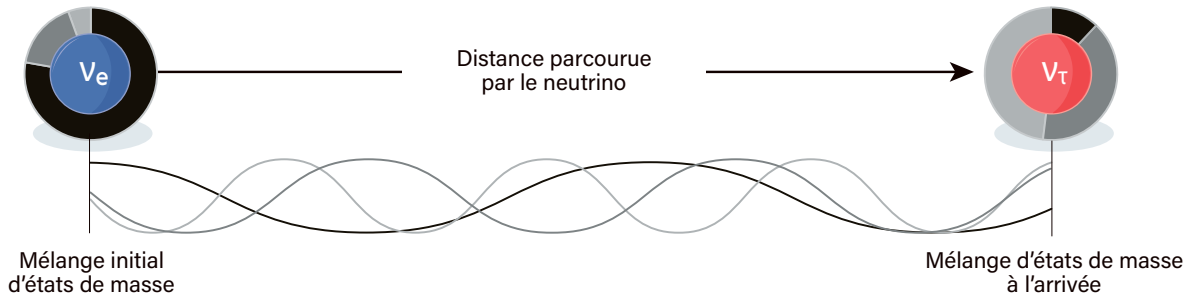


Des saveurs qui oscillent



Lorsque les neutrinos se déplacent, les différents états de masse qui les constituent se propagent à des vitesses légèrement différentes. Avec le temps, ces écarts modifient le mélange d'états de masse du neutrino et le font donc changer de saveur – un processus nommé « oscillation ». Ainsi, une particule qui démarre sous la forme d'un neutrino électronique peut arriver sous la forme d'un neutrino tauique.

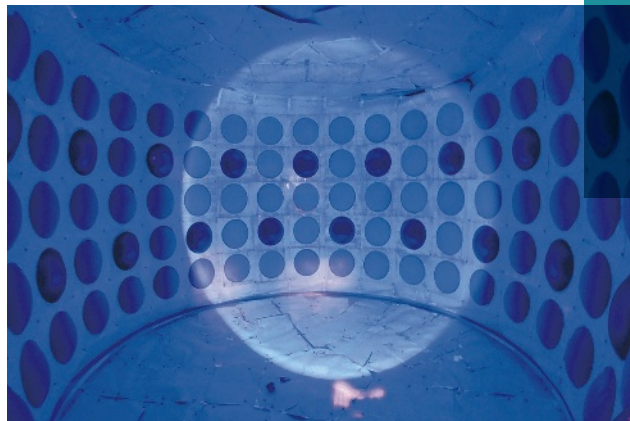
bien plus vite que prévu au cours de leur voyage depuis la source et que les neutrinos électroniques apparaissaient dans le détecteur en plus grand nombre qu'on ne l'attendait. Nous observons des oscillations sur des distances de quelques centaines de mètres seulement au lieu des quelques centaines de kilomètres prévus. Des neutrinos muoniques en aussi grand nombre n'auraient pas dû pouvoir se transformer en neutrinos électroniques sur une distance aussi courte que celle de l'expérience, à moins peut-être qu'ils ne se soient changés en autre chose en chemin.

Ces anomalies n'apparaissent pas uniquement dans nos expériences. Les données de certains détecteurs placés à proximité de réacteurs nucléaires (par exemple dans l'expérience franco-allemande *Stereo*, à Grenoble, ou l'expérience *Nucleus*, auprès du réacteur de Chooz, en France) suggèrent également que quelque chose cloche. Tout comme le Soleil, un réacteur nucléaire produit des neutrinos, et plusieurs dispositifs expérimentaux ont été placés à leur voisinage pour étudier ces particules. En général, ils détectent moins de neutrinos que prévu, ce qui suggère qu'une partie d'entre eux a pu se changer en neutrinos stériles au cours du trajet depuis le réacteur. Ces résultats sont cependant difficiles à interpréter, car les physiciens ne savent pas exactement combien de neutrinos sont produits par un réacteur à fission. La détection d'un plus faible nombre de neutrinos peut donc être due soit à l'existence

du neutrino stérile, soit à une surestimation par les scientifiques de la quantité de neutrinos qu'ils devraient détecter.

Des physiciens en Russie contournent cette incertitude avec une expérience nommée *DANSS* (acronyme anglais pour «détecteur des antineutrinos du réacteur par un scintillateur solide en plastique»). Le dispositif est installé sous un réacteur nucléaire, mais les scientifiques font varier la distance entre le réacteur et le détecteur de neutrinos tous les quelques jours, de façon à vérifier si les neutrinos changent bien de saveur en cours de route. Cette approche est susceptible de révéler aux chercheurs s'il existe des oscillations à courte distance, même s'ils ne disposent pas d'une estimation précise du nombre de neutrinos produits par le réacteur. Par ailleurs, l'expérience franco-allemande *Stereo* teste également les oscillations à courte distance, le détecteur étant distant de 10 mètres seulement du réacteur.

L'énorme observatoire de neutrinos *IceCube*, installé en Antarctique, recherche lui aussi le neutrino stérile. Ce réseau de photodétecteurs enterrés dans la glace polaire et occupant un volume total de 1 kilomètre cube décèle le «rayonnement Tcherenkov», une émission de lumière produite lorsqu'un neutrino très énergétique provenant de la haute atmosphère interagit avec la glace et crée une cascade de particules. L'étude des signaux Tcherenkov recueillis par les photodétecteurs permet aux scientifiques de reconstituer le



← Vue de l'intérieur du détecteur CCM, au Laboratoire américain de Los Alamos. Les disques sont des tubes photomultiplicateurs.

type, l'énergie et la trajectoire du neutrino incident. L'équipe d'*IceCube* recherche les signes d'une disparition des neutrinos muoniques qui, si elle est confirmée, serait cohérente avec les résultats de *LSND* et de *MiniBooNE* et pourrait donc indiquer l'existence du neutrino stérile.

Tous les indices en faveur du neutrino stérile sont certes intrigants et encourageants, mais ils ne permettent pas encore de conclure. La gamme d'énergies des neutrinos étudiés par *IceCube* est large, ce qui complique l'analyse des oscillations. Il est également difficile de distinguer, dans les expériences réalisées à proximité de réacteurs nucléaires, les neutrinos émis par les réactions de ceux issus de désintégrations radioactives au sein du matériel de détection.

Dans les expériences *LSND* et *MiniBooNE*, on peut certes allumer et éteindre l'accélérateur de particules pour déterminer l'intensité du bruit de fond. Mais nous avons été limités en partie par l'impossibilité de chercher les neutrinos à différentes distances de la source. Cela revient à ne prendre qu'une image d'un film, quand il nous faudrait une succession d'images pour connaître toute l'histoire.

UNE NOUVELLE STRATÉGIE

La nouvelle génération d'expériences en cours ou qui se mettent en place devrait nous permettre d'obtenir la succession d'images dont nous avons besoin. L'idéal, comme nous l'avons évoqué plus haut, serait de pouvoir voler aux côtés d'un neutrino et d'observer ses oscillations. C'est bien sûr impossible, mais ces expériences nous permettent de saisir des instantanés à différents moments de l'oscillation, ce qui est susceptible de faire apparaître

la saveur stérile, si elle existe. Parmi ces projets, on trouve le programme *Short-Baseline Neutrino*, au Fermilab, et l'expérience *CCM*, que nous avons mis en route à Los Alamos.

Le dispositif *CCM* est installé dans le hall du *Lansce*, le Centre de science neutronique de Los Alamos, au bout d'un accélérateur de particules de 800 mètres de long. L'accélérateur produit un faisceau de protons qui est dirigé sur une cible en tungstène. En frappant le métal, les protons expulsent de ses atomes des cascades de neutrons selon un mécanisme appelé « spallation ». Une partie de l'énergie libérée par ce processus conduit à la création de particules éphémères, des pions. Ces dernières s'immobilisent et se désintègrent rapidement en un muon et, plus important pour nous, en un neutrino muonique d'une énergie bien déterminée.

CCM détectera ces neutrinos grâce à ce que l'on appelle la « diffusion cohérente », qui repose sur le fait que toutes les particules (neutrinos compris) se comportent non seulement comme de petits corpuscules, mais aussi comme des ondes. Cette dualité onde-corpuscule est un des fondements de la mécanique quantique. La longueur d'onde associée à une particule dépend de son énergie. Les particules de haute énergie, très rapides, ont de petites longueurs d'onde, tandis que les particules de faible énergie, lentes, ont de plus grandes longueurs d'onde.

Lorsque des neutrinos de courte longueur d'onde frappent un noyau atomique, ils n'interagissent qu'avec un seul nucléon (proton ou neutron) en son sein. Mais quelque chose de particulier se passe lorsque l'énergie d'un neutrino est assez basse pour que sa longueur d'onde soit comparable au diamètre du noyau atomique. Au lieu de ne frapper qu'un seul proton ou un seul neutron dans l'atome, le neutrino de faible énergie interagit avec le noyau tout entier. On peut comparer cela à l'arrivée de la houle sur un bateau. Une houle courte n'aura pratiquement aucun effet sur le mouvement d'un très grand navire, alors qu'une