

> place. Or si la saveur des neutrinos n'est pas fixe, c'est qu'ils subissent un changement et donc qu'ils ressentent le passage du temps. Ils voyagent donc nécessairement à une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière. Par suite, ils ne peuvent pas être dépourvus de masse. Selon la relativité restreinte, les particules de masse nulle voyagent à la vitesse de la lumière : si les neutrinos sont plus lents, c'est qu'ils en ont une, même très faible. Cela signifie aussi que le modèle standard de la physique des particules est à tout le moins incomplet. Cette révélation et la découverte de l'oscillation des neutrinos ont valu le prix Nobel en 2015 au Japonais Takaaki Kajita et au Canadien Arthur McDonald.

DES SIGNAUX SURPRENANTS

Dans les années 1990 et 2000, nous étudions précisément cette capacité inattendue qu'ont les neutrinos à changer de saveur au sein des expériences *LSND* et *MiniBooNE*. C'est alors que les indices de l'existence d'un neutrino supplémentaire ont commencé à apparaître de façon récurrente. Dans les deux dispositifs, un accélérateur de particules produisait un jet continu de neutrinos muoniques et, dans les deux cas, des détecteurs réglés pour capter des neutrinos électroniques (plus précisément des antineutrinos pour *LSND*) étaient placés à une certaine distance de la source de neutrinos muoniques.

Si vous pouviez voler aux côtés d'un neutrino tandis qu'il file à travers l'espace, vous le verriez « osciller », c'est-à-dire passer par les trois saveurs de façon cyclique. Les saveurs électronique, muonique et tauique seraient toutes les trois observables, du moins en principe. Cependant, si la quatrième saveur stérile existe, votre neutrino pourrait aussi l'adopter. Pour l'observateur qui l'accompagnerait, la particule semblerait simplement disparaître sur un segment de sa trajectoire. Dans le cas le plus simple, le neutrino réapparaîtrait un peu plus loin en retrouvant une des trois saveurs ordinaires (même s'il est théoriquement possible que le neutrino stérile puisse se désintégrer, mettant ainsi fin aux oscillations).

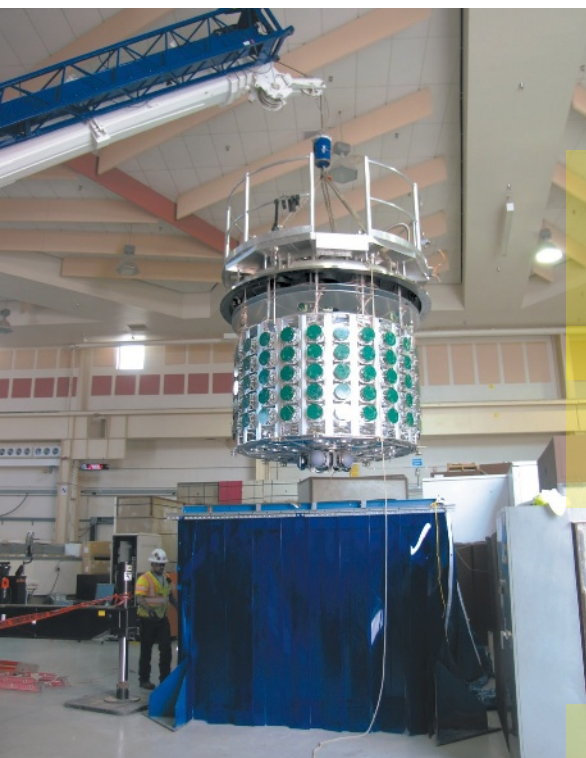
En général, les oscillations d'une des trois saveurs connues à une autre se déroulent sur de longues distances. Mais comme les neutrinos stériles sont très probablement plus lourds que ceux des saveurs habituelles, les particules pourraient osciller vers cet état plus vite et, inversement, en revenir pour adopter l'un des trois types connus sur des distances plus courtes. Ainsi, si les neutrinos stériles existent, leur effet pourrait être d'accélérer le processus d'oscillation et de raccourcir considérablement la distance qu'un neutrino muonique, par exemple, devra parcourir avant de se transformer en neutrino électronique.



C'est exactement ce que nous avons observé lors de nos premières expériences : il semblait que les neutrinos muoniques disparaissaient 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 observions des oscillations sur des distances de quelques centaines de mètres seulement au lieu des quelques centaines de kilomètres prévus. Un nombre aussi élevé de neutrinos muoniques 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 dans le Soleil, les réactions au sein d'un réacteur nucléaire produisent 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

Dans le cadre d'une amélioration du détecteur, Terrance Schaub, chercheur sur l'expérience CCM, soulève un tube photomultiplicateur en vue de le remplacer.



La détection de neutrinos près d'un réacteur nucléaire présente aussi des anomalies

Des techniciens extraient le détecteur de neutrinos CCM hors de son conteneur, qui est rempli d'argon liquide lorsque l'expérience est en cours.

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 type, l'énergie et la trajectoire du neutrino incident.

L'équipe d'*IceCube* devrait bientôt publier une analyse sur les neutrinos qui, sur une période de huit ans, ont atteint ses photodétecteurs en traversant la Terre de part en part. Cette étude 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 prendre 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* ➤

LES NEUTRINOS EN ACTION

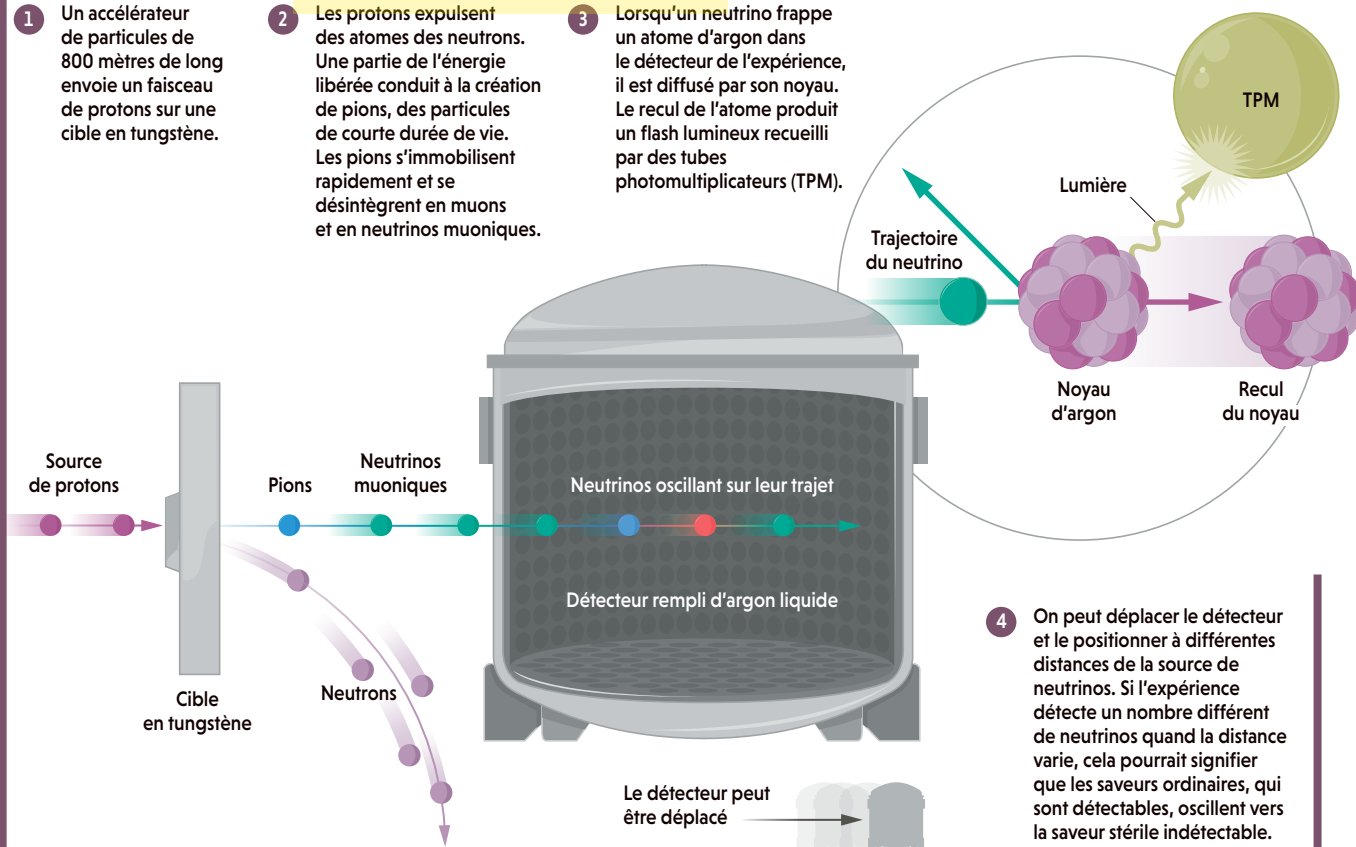
L'expérience CCM (ou *Coherent Captain-Mills*), au Laboratoire américain de Los Alamos, recherche des indices de l'existence d'une quatrième saveur de neutrinos, les neutrinos stériles. Au contraire des trois saveurs connues, qui interagissent peu avec les autres particules, les neutrinos stériles n'interagiraient pas du tout, sauf par le truchement de la gravitation (et du phénomène d'oscillation

d'une saveur à l'autre). Si les neutrinos stériles existent, les neutrinos ordinaires pourraient osciller vers cette forme puis reprendre l'une des trois saveurs connues. L'expérience ne serait pas en mesure de détecter ces neutrinos stériles, mais noterait une diminution du nombre de neutrinos détectés à différentes distances, indiquant ainsi que des neutrinos « normaux » se sont transformés en leur cousin stérile.

1 Un accélérateur de particules de 800 mètres de long envoie un faisceau de protons sur une cible en tungstène.

2 Les protons expulsent des atomes des neutrons. Une partie de l'énergie libérée conduit à la création de pions, des particules de courte durée de vie. Les pions s'immobilisent rapidement et se désintègrent en muons et en neutrinos muoniques.

3 Lorsqu'un neutrino frappe un atome d'argon dans le détecteur de l'expérience, il est diffusé par son noyau. Le recul de l'atome produit un flash lumineux recueilli par des tubes photomultiplicateurs (TPM).



4 On peut déplacer le détecteur et le positionner à différentes distances de la source de neutrinos. Si l'expérience détecte un nombre différent de neutrinos quand la distance varie, cela pourrait signifier que les saveurs ordinaires, qui sont détectables, oscillent vers la saveur stérile indétectable.

> *Neutrino*, au Fermilab, et l'expérience CCM, que nous venons de mettre 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 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