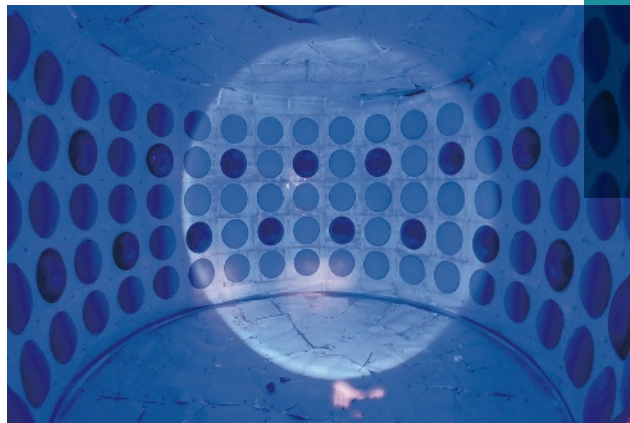




← Vue de l'intérieur du détecteur CCM, au Laboratoire américain de Los Alamos. Les disques sont des tubes photomultiplicateurs.

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.

32

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

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 neutrino, 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

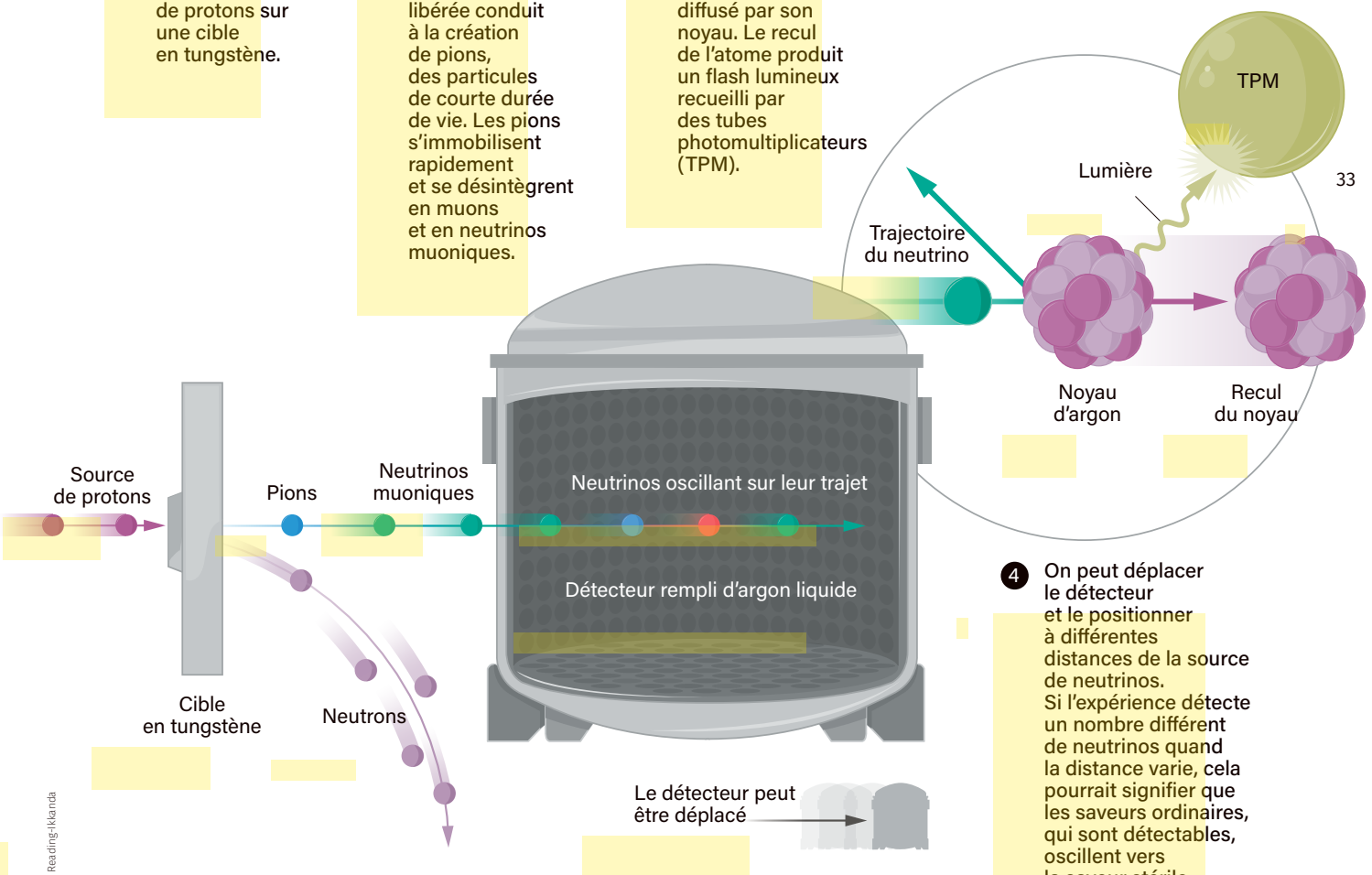
des trois saveurs connues. L'expérience ne serait pas en mesure de détecter ces neutrinos stériles, mais noterait une diminution du nombre de neutrinos détectés à différentes distances, indiquant ainsi que des neutrinos «normaux» se sont transformés en leur cousin stérile.

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.



houle longue en plein océan le soulèvera considérablement. Puisqu'un neutrino de grande longueur d'onde voit le noyau atomique comme un tout et non comme une collection de petites parties, la probabilité qu'il interagisse est bien plus grande.

UN MINUSCULE FLASH DE LUMIÈRE

Contrairement aux neutrinos de haute énergie, un neutrino de basse énergie rebondit donc sur le noyau tout entier. Cette diffusion est dite «cohérente» parce que la longueur d'onde du neutrino est comparable à la taille du noyau. Le noyau subit alors un recul. Et si cette interaction a lieu dans le matériau adéquat, le recul de l'atome produit un minuscule flash de lumière, tandis que le neutrino continue sa route dans une nouvelle direction. En captant le flash lumineux à l'aide d'un détecteur à tubes photomultiplicateurs, on peut déterminer où et quand le neutrino a été diffusé par l'atome ainsi que l'énergie cinétique de ce dernier. Même si la diffusion cohérente ne permet pas de révéler la saveur d'un neutrino donné, elle permet de mesurer le nombre total de neutrinos des trois saveurs qui ont interagi avec le détecteur. Ce point est très important : si cette somme ne correspond pas au nombre de neutrinos attendus, il se peut que des neutrinos stériles indétectés – parce qu'ils ne pourraient pas interagir avec les atomes d'argon et ne produiraient donc pas de flash lumineux – soient impliqués.

Puisque les chances qu'un neutrino soit diffusé par un noyau entier sont supérieures à celles de le voir interagir avec un seul de ses nucléons, on peut se permettre d'utiliser des détecteurs plus petits que les gros appareillages autrefois nécessaires à la plupart des détecteurs de neutrinos (il en est de même avec les détecteurs placés près de réacteurs nucléaires, le flux de neutrinos étant alors très intense).

Le détecteur de CCM contient 10 tonnes d'argon liquide, à comparer à la cuve de 800 tonnes d'huile minérale du détecteur de l'expérience MiniBooNE. Et comme il est compact, on peut le déplacer d'un endroit à un autre afin de détecter les neutrinos à différentes distances de leur source. Si les neutrinos oscillent assez fréquemment sur les quelques dizaines de mètres disponibles dans le hall d'expériences du LANSCE, nous observerons une variation du nombre total de détections en fonction de la distance. Un tel résultat indiquerait qu'il se produit effectivement des oscillations vers la saveur stérile : en effet, s'il n'existe que trois

saveurs seulement, nous ne devrions pas observer d'oscillation sur de si courtes distances.

Il est bien sûr possible que CCM ne détecte rien de tel. Dans ce cas, le nombre de neutrinos normaux observés diminuera simplement à mesure que nous éloignerons le détecteur de la cible en tungstène, exactement comme l'éclat apparent d'une lampe diminue à mesure que l'on s'en éloigne.

Bien que décevant, un tel résultat n'exclurait pas l'existence d'un ou plusieurs neutrinos stériles, mais il permettrait de fixer des limites à leurs propriétés potentielles. Comme les oscillations des neutrinos dépendent de leurs masses relatives et d'un paramètre nommé «angle de mélange», le fait de ne pas trouver de signe du neutrino stérile nous permettra de mettre le doigt sur les valeurs que ces masses et ces angles de mélange ne peuvent en aucun cas avoir, réduisant ainsi la plage de paramètres que les chercheurs devront considérer.

Les expérimentateurs qui présentent des résultats en désaccord avec le modèle standard sont présumés coupables jusqu'à ce qu'ils prouvent leur innocence, pour la bonne raison que, historiquement, les scientifiques qui ont remis en cause le modèle standard ont eu tort. Néanmoins, l'existence d'une physique au-delà du modèle est certaine ; à elle seule, l'oscillation des neutrinos en est une preuve. Si le sujet reste controversé, les nouvelles expériences sont désormais sur le point de résoudre le problème – d'une façon ou d'une autre.

— Les auteurs —

> William Charles Louis

est physicien au Laboratoire national de Los Alamos (LANL), dans le Nouveau-Mexique, aux États-Unis.

> Richard Van de Water

est physicien au Laboratoire national de Los Alamos (LANL), dans le Nouveau-Mexique, aux États-Unis.

— À lire —

> B. Dasgupta et J. Kopp, Sterile neutrinos, *Physics Reports*, vol. 928, 15 pp. 1-63, 2021.

> S. V. Demidov et al., Bounds of non-standard interactions of neutrinos from IceCube DeepCore data, *Journal of High Energy Physics*, vol. 2020(3), article 105, 2020.

> A. A. Aguilar-Arevalo et al., Significant excess of electronlike events in the MiniBooNE short-baseline neutrino experiment, *Physical Review Letters*, vol. 121(22), article 221801, 2018.