

> par des parasites intestinaux. Ils ont alors montré que les mandrills évitaient soigneusement d'épouiller ces individus les plus infestés (ils sont si infestés que les parasites intestinaux se retrouvent dans leur fourrure). Les biologistes ont également montré que les mandrills parviennent à évaluer le niveau d'infestation en se fiant à leur odorat. Quand on leur présente deux tiges de bambou préalablement mises en contact avec des excréments, ils évitent celle qui a été en contact avec les déjections d'un mandrill très infesté par les parasites.

Cependant, il arrive que les mandrills ne mettent pas la distanciation sociale en pratique malgré les risques de contagion. Ainsi, Clémence Poirotte et Marie Charpentier ont découvert que les mandrills poursuivaient l'épouillage de certains parents proches pourtant très infestés, alors qu'ils se tenaient soigneusement à distance des autres congénères infestés.

Dans leur étude publiée en 2020, elles expliquent que le maintien d'alliances fortes et inconditionnelles avec certains parents peut présenter un certain nombre d'avantages à long terme chez les primates non humains, tout comme chez les humains. Par exemple, chez les mandrills, les femelles qui entretiennent les liens sociaux les plus forts commencent à se reproduire plus tôt et sont donc susceptibles d'avoir des portées plus nombreuses au cours de leur vie. Pour cette espèce, le jeu en vaut la chandelle.

Pour d'autres, les liens sociaux sont si importants qu'il n'y a jamais d'évitement, même quand les individus sont manifestement malades. Par exemple, Bonnie Fairbanks et ses collègues de Virginia Tech, aux États-Unis, ont montré en 2015 que les mangoustes rayées n'évitaient pas leurs congénères même si ces dernières présentaient des signes évidents de maladie.

Les mangoustes rayées constituent une espèce très sociale originaire d'Afrique subsaharienne. Elles vivent en groupes stables pouvant atteindre 40 individus, apparentés ou non. Elles entretiennent de fortes interactions physiques en dormant les unes sur les autres et en s'épouillant, en contrepartie, à tour de rôle.

Dans un premier temps, Kathleen Alexander, coautrice de cette recherche, a constaté que de nombreuses mangoustes de sa zone d'étude, au Botswana, étaient atteintes d'une nouvelle forme de tuberculose qui les tuait en quelques mois. Bonnie Fairbanks a ensuite passé plusieurs mois à suivre six groupes touchés par cette maladie en observant les interactions sociales. Elle a rapporté que, de façon étonnante, les mangoustes en bonne santé ont continué à interagir étroitement avec des congénères visiblement malades. Elles les ont épouillées autant que leurs congénères en bonne santé, même si les mangoustes malades n'étaient pas en mesure de les épouiller autant en retour.

Ainsi, la distanciation sociale avec les malades n'est tout simplement pas viable chez ces mangoustes et chez toutes les espèces où une coopération étroite entre individus pour chasser et se défendre est déterminante.

SUIVRE L'APPEL DE LA NATURE

Comme les autres animaux, les humains ont une longue histoire d'évolution avec les maladies infectieuses. De nombreuses formes de notre immunité comportementale, comme la sensation de dégoût dans des environnements sales, en résultent probablement.

Mais, contrairement aux autres animaux, les humains d'aujourd'hui disposent de nombreux atouts quand les épidémies frappent à leur porte. Par exemple, nous pouvons désormais nous informer les uns les autres, d'un bout à l'autre de la planète, et en un instant, de toute menace épidémique. Cette capacité nous permet d'instituer une distanciation sociale avant que la maladie n'apparaisse chez nous – une stratégie qui a sauvé de nombreuses vies. Nous disposons de plateformes de communication numérique avancées (courrier électronique, conversations vidéo...) qui nous permettent de garder nos distances physiques tout en maintenant certaines relations sociales. Les autres animaux perdent tout lien social en se mettant à distance.

Mais le plus grand avantage de l'humain est sans doute sa capacité à développer des outils non comportementaux élaborés, tels que les vaccins, qui le protègent de la maladie sans induire d'adaptations comportementales coûteuses. La vaccination permet de maintenir une vie sociale riche et interactive en dépit des maladies contagieuses comme la polio-myélite et la rougeole qui, autrement, nous auraient décimés.

Toutefois, quand il s'agit d'enrayer de nouvelles maladies comme le Covid-19, nous sommes plus ou moins dans le même bateau que les autres animaux. Ici, comme dans la nature, les comportements qui ont fait leurs preuves, tels que la distanciation sociale, demeurent les outils les plus efficaces jusqu'à ce que des vaccins ou des traitements soient développés. Mais à l'instar des autres animaux, nous nous devons d'être stratégiques. Comme les mandrills et les fourmis, nous pouvons maintenir les interactions sociales les plus essentielles, mais rester à distance des personnes les plus vulnérables que nous risquons d'infecter accidentellement. Le succès de la langouste contre le virus dévastateur dans les Caraïbes montre que la distanciation sociale, malgré des coûts élevés à court terme, est rentable à long terme pour la survie de l'espèce. Aussi contre nature que cela puisse paraître, nous n'avons, ici, qu'à suivre l'exemple de la nature. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Poirotte et M. J. E. Charpentier, **Unconditional care from close maternal kin in the face of parasites**, *Biology Letters*, vol. 16, 20190869, 2020.

J. F. Stephenson, **Parasite-induced plasticity in host social behaviour depends on sex and susceptibility**, *Biology Letters*, vol. 15, 20190557, 2019.

N. Stroeymeyt et al., **Social network plasticity decreases disease transmission in a eusocial insect**, *Science*, vol. 362, pp. 941-945, 2018.

M. J. Butler et al., **Behavioral immunity suppresses an epizootic in Caribbean spiny lobsters**, *PLoS One*, vol. 10(6), e0126374, 2015.

M. Zylberberg et al., **House finches (*Carpodacus mexicanus*) balance investment in behavioural and immunological defences against pathogens**, *Biology Letters*, vol. 9, 20120856, 2013.

J. R. Anderson et D. C. Behringer, **Spatial dynamics in the social lobster *Panulirus argus* in response to diseased conspecifics**, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, vol. 474, pp. 191-200, 2013.

L'ESSENTIEL

> Les neutrinos existent en trois « saveurs ». Certaines expériences laissent aujourd'hui entrevoir la possibilité d'une quatrième saveur – un neutrino dit « stérile », insensible aux interactions fondamentales autres que la gravitation.

> Si les neutrinos stériles existent, ils pourraient fournir une piste pour aller au-delà du modèle standard de la

physique des particules et pour comprendre le « secteur sombre » de l'Univers, c'est-à-dire la matière noire et l'énergie sombre.

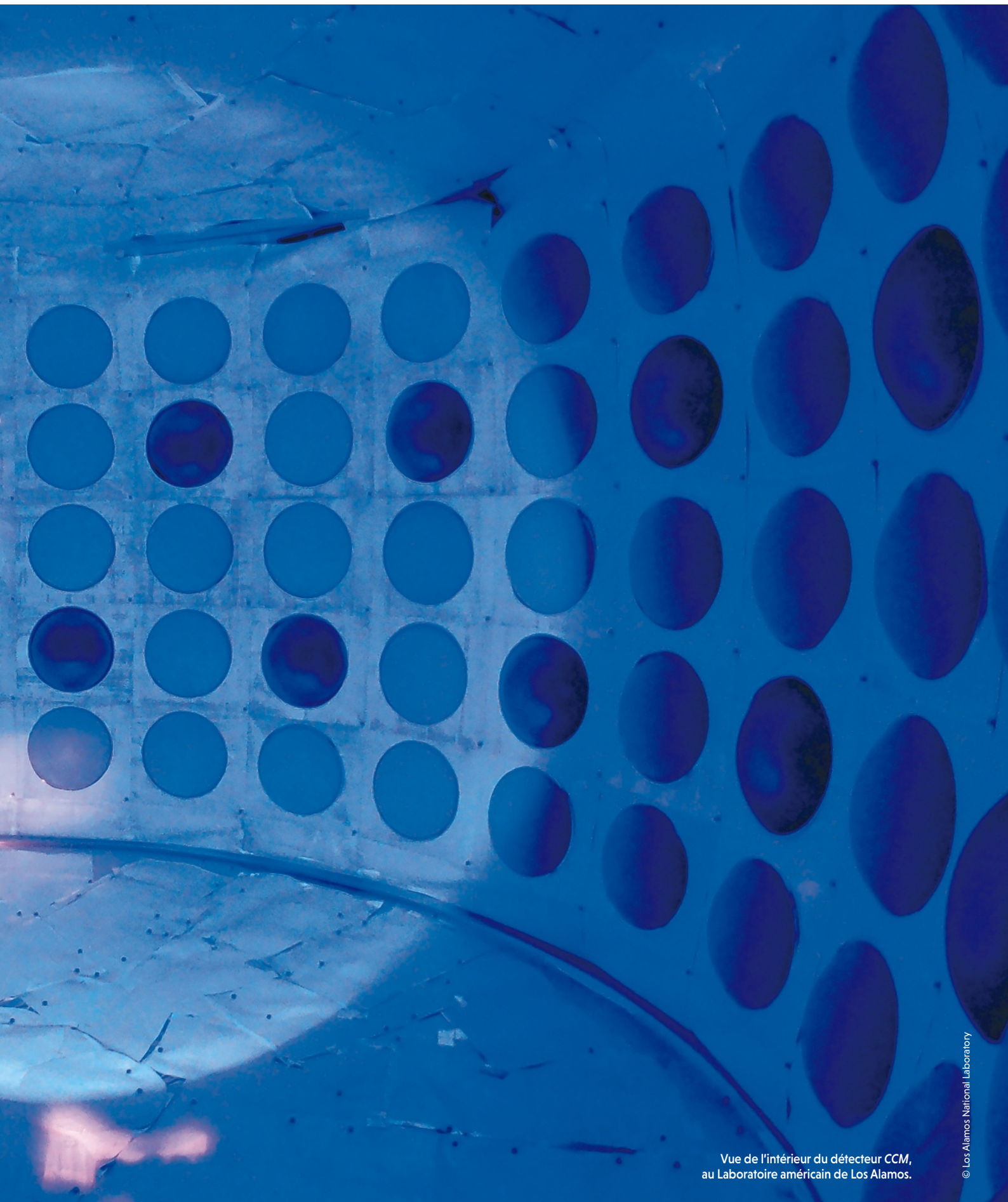
> Plusieurs expériences, notamment avec le détecteur CCM au Laboratoire américain de Los Alamos, sont conçues pour tester l'hypothèse de l'existence de neutrinos stériles.

LES AUTEURS

WILLIAM CHARLES LOUIS et RICHARD VAN DE WATER sont **physiciens** au **Laboratoire national de Los Alamos (LANL)**, dans le **Nouveau-Mexique**, aux **États-Unis**

À la recherche du neutrino stérile

Les neutrinos existent en trois variétés. Seulement ? Des indices suggèrent l'existence d'une quatrième. Cette hypothétique particule permettra-t-elle d'éclairer la question de la matière noire et de l'énergie sombre ?



Vue de l'intérieur du détecteur CCM,
au Laboratoire américain de Los Alamos.

© Los Alamos National Laboratory

Les physiciens venus assister à notre présentation lors de la Conférence internationale de 2010 sur les neutrinos, à Athènes, s'attendaient sans doute à ce que nous enterrions définitivement les résultats controversés que nous avions annoncés une décennie auparavant. Au lieu de cela, notre prestation fut accueillie par un silence gêné.

L'histoire commence en 1996, lorsque nous publiâmes des données obtenues à l'aide du *LSND* (scintillateur liquide pour la détection des neutrinos) au Laboratoire de Los Alamos. Ces résultats semblaient remettre en question l'assertion largement admise selon laquelle il n'existe que trois types ou « saveurs » de neutrinos – ces minuscules particules omniprésentes qui traversent sans encombre la matière. Les données suggéraient qu'il pourrait exister une quatrième saveur de neutrino encore à détecter. Cependant, une autre expérience similaire menée en Europe, *Karmen*, avec une sensibilité comparable, ne révélait rien d'anormal.

La communauté scientifique se montra sceptique et, il faut être juste, les données préliminaires des expériences visant à reproduire nos résultats suggéraient qu'ils étaient erronés, c'est-à-dire qu'il n'y avait finalement pas de quatrième saveur de neutrino. Ce jour-là, à Athènes, l'auditoire s'attendait donc logiquement à ce que nous enfoncions le dernier clou dans le cercueil des faux signaux du *LSND*. Ce que nous annonçâmes au contraire, c'est qu'avec le temps, les indices en faveur de l'existence de la quatrième saveur de neutrinos sont devenus plus convaincants.

Certes, nous n'avions pas découvert la particule. Mais les travaux que nous présentions, réalisés dans le cadre de l'expérience *MiniBooNE*, au Fermilab de Batavia, dans l'Illinois, suggéraient que quelque chose est erroné dans notre modèle actuel de la physique des particules. Nous affirmions qu'une des solutions les plus vraisemblables était l'existence d'un nouveau neutrino – un neutrino dit « stérile », parce que incapable d'interagir de quelque manière que ce soit avec la matière excepté *via* la gravitation. Au cours des dix ans qui ont suivi notre présentation en Grèce, les données de *MiniBooNE* n'ont fait qu'appuyer davantage les arguments en faveur de cette quatrième saveur de neutrino.

Nous sommes désormais certains d'observer quelque chose qui dépasse le cadre de la physique connue, et les neutrinos stériles figurent parmi les favoris pour l'expliquer. L'idée que nos expériences pourraient être en train de détecter un quatrième neutrino reste cependant controversée, parce que le modèle standard de la physique des particules est l'une des théories les mieux testées et confirmées de

l'histoire... et qu'il n'autorise que trois saveurs de neutrinos.

Cependant, nous savons pertinemment que le modèle standard est incomplet puisqu'il n'explique ni la matière noire ni l'énergie sombre, entités qui semblent pourtant constituer l'essentiel du contenu de l'Univers. Or une nouvelle saveur de neutrino pourrait bien être le chaînon manquant entre la physique connue et ce royaume obscur. Après des décennies d'incertitude, les physiciens mettent enfin sur pied de nouveaux projets expérimentaux, dont notre détecteur *CCM* (ou *Coherent Captain-Mills*), grâce auxquels ils résoudreont peut-être le problème.

LE PLUS FANTOMATIQUE DES NEUTRINOS

Les neutrinos sont des particules fantomatiques. Ils sont ainsi des milliers de milliards à traverser votre corps à chaque seconde, presque à la vitesse de la lumière. Mais le neutrino stérile serait le plus fantomatique de tous. Insensible aux interactions faible, forte et électromagnétique auxquelles sont soumises les autres particules, il serait indétectable. De ce fait, il serait un composant ce que les physiciens nomment le « secteur sombre », auquel appartiennent la matière noire et l'énergie sombre, qui constituent 95 % de la densité d'énergie de l'univers. Il se pourrait que les neutrinos stériles soient capables d'interagir avec la matière noire *via* de nouvelles forces de la nature. Ces particules pourraient même être une composante de la matière noire : selon certaines hypothèses, des neutrinos stériles (de

Ce neutrino est dit «stérile» car il n'interagit pas, sauf via la gravitation

masse cependant supérieure à celle des neutrinos recherchés par *MiniBooNE* et *CCM*) représenteraient une fraction appréciable, voire l'essentiel, de la matière invisible du cosmos.

L'existence des neutrinos stériles ne serait que la dernière d'une longue série de surprises venant de cette intrigante famille de particules. La première date des années 1960, lorsque des

expériences destinées à mesurer le flux de neutrinos émis dans notre direction par le Soleil détectaient systématiquement beaucoup moins de particules que ne le prévoyaient les scientifiques. Toutes les étoiles sont alimentées par des réactions de fusion thermonucléaire au cours desquelles des protons fusionnent et forment des noyaux d'hélium, lesquels fusionnent à leur tour pour former des éléments plus lourds. Les neutrinos électroniques (l'une des trois saveurs de neutrinos, aux côtés des neutrinos muoniques et tauiques) figurent parmi les sous-produits de ces réactions. La théorie permettait de calculer le flux continu de ces particules qui devait atteindre les détecteurs sur Terre. Or on ne détectait qu'une fraction du nombre attendu. C'était le fameux « problème des neutrinos solaires ».

Au départ, beaucoup de physiciens ont supposé que nous comprenions simplement mal le fonctionnement du Soleil. La réalité s'est révélée bien plus simple et nettement plus intéressante. Le Soleil n'émettait pas moins de neutrinos que prévu. C'étaient en fait lesdits neutrinos qui n'arrivaient pas jusqu'à nos

détecteurs sur Terre. Pour être plus exact, ils s'étaient transformés en chemin.

Les physiciens ont fini par comprendre que les neutrinos ne sont pas des entités physiques « pures ». Chaque neutrino est plutôt un mélange des différentes saveurs et il peut passer d'une saveur à l'autre au cours du temps. Ce phénomène appelé « oscillation » fut une surprise pour plusieurs raisons. Pour commencer, le fait que les neutrinos soient susceptibles de changer de saveur implique qu'ils ne sauraient être les particules de masse nulle et voyageant à la vitesse de la lumière que prédit le modèle standard.

Une façon de le comprendre est de se rappeler que, conformément à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, le temps s'écoule plus lentement pour un objet en mouvement que pour un objet immobile. Plus un objet va vite, plus son horloge ralentit (par rapport à une horloge immobile) jusqu'à s'arrêter complètement si l'objet se déplace à la vitesse de la lumière. Cela signifie que si vous pouviez voyager à la vitesse de la lumière, le temps vous paraîtrait s'arrêter et l'Univers se figer sur >

LES SAVEURS DES NEUTRINOS

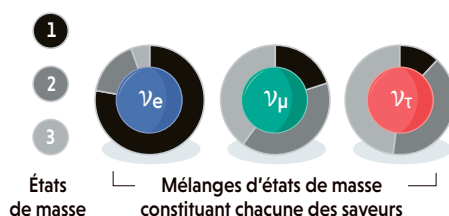
Les neutrinos sont des particules élémentaires très surprenantes. Bien que la théorie leur ait attribué une masse nulle, ils se sont révélés dotés d'une masse non nulle, quoique minuscule. Les neutrinos se propagent presque à la vitesse de la lumière et n'interagissent que très rarement avec le reste de la matière. Ces particules insaisissables jouent un rôle crucial dans certaines des questions les plus fondamentales de la physique.

PROPRIÉTÉS DES NEUTRINOS

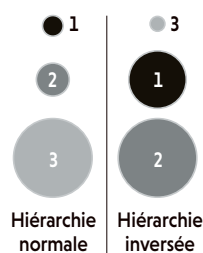
Il existe trois types ou « saveurs » de neutrinos : le neutrino électronique, le neutrino muonique et le neutrino tauique.



Ces saveurs sont des états constitués en fait d'un mélange de trois « états de masse » possibles.

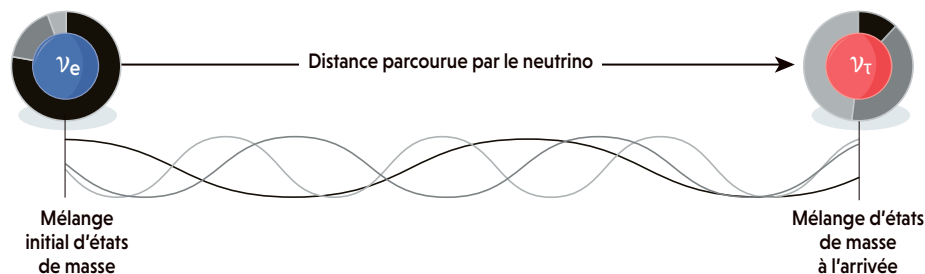


On ne connaît pas encore la valeur exacte de ces trois masses, à part le fait qu'elles sont toutes très petites. La théorie suggère deux possibilités : soit les deux premières sont exceptionnellement faibles et la troisième légèrement plus élevée, soit au contraire l'une est extraordinairement petite et les deux autres un peu plus grandes.



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.



> 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).

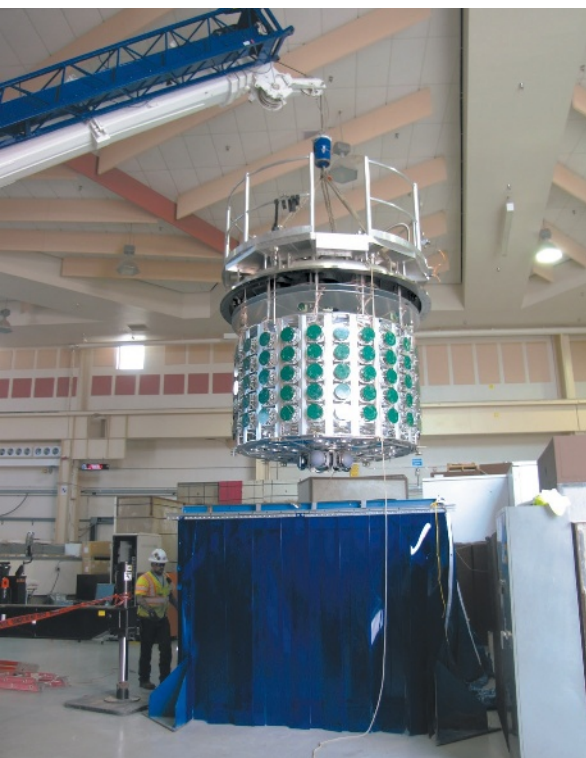
En général, les oscillations d'une des trois saveurs connues à une autre se déroulent sur de longues distances. Mais comme les neutrinos stériles sont très probablement plus lourds que ceux des saveurs habituelles, les particules pourraient osciller vers cet état plus vite et, inversement, en revenir 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.



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

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

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

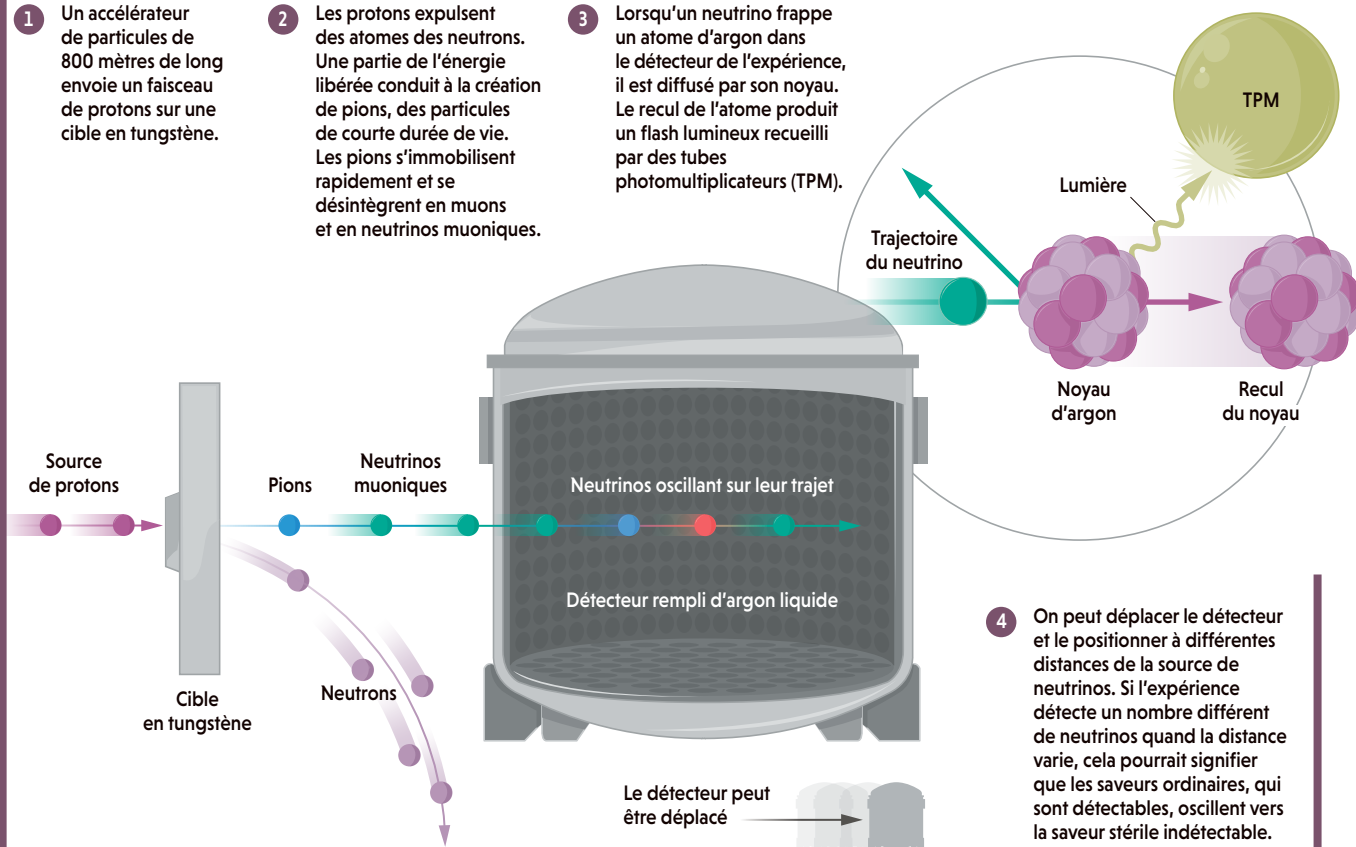
L'expérience CCM (ou *Coherent Captain-Mills*), au Laboratoire américain de Los Alamos, recherche des indices de l'existence d'une quatrième saveur de neutrinos, les neutrinos stériles. Au contraire des trois saveurs connues, qui interagissent peu avec les autres particules, les neutrinos stériles n'interagiraient 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

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

Faire varier la distance entre le détecteur et la source de neutrinos livrera des indices

n'aura pratiquement aucun effet sur le mouvement d'un très grand navire, alors qu'une 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.

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 dans ces expériences 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.

DES CONTRAINTES SUR LES PARAMÈTRES

Il est bien sûr possible que CCM ne décèle rien de tel. Dans ce cas, le nombre de neutrinos normaux observé 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. Il est cependant certain qu'il existe une physique au-delà du modèle standard. À elle seule, l'oscillation des neutrinos en est une preuve.

La recherche sur les neutrinos a régulièrement stimulé des développements novateurs en physique depuis les tout premiers neutrinos découverts en 1956 par Frederick Reines et Clyde Cowan, nos prédécesseurs au laboratoire de Los Alamos. Si les neutrinos stériles restent un sujet controversé vingt-cinq ans après que nous avons décelé les premiers indices de leur existence, les nouvelles expériences sont désormais sur le point de résoudre le problème – d'une façon ou d'une autre. ■

BIBLIOGRAPHIE

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.

M. Hirsch et al., **Les neutrinos, une porte vers l'inconnu**, *Dossier Pour la Science* n° 85, pp. 70-77, octobre-décembre 2014.

Restes d'enfants âgés de moins de 15 ans qui ont été sacrifiés au ^{xv}^e siècle dans le cadre d'un rituel chimú, sur le site de Huanchaquito-Las Llamas.

L'ESSENTIEL

> Dans le désert nord péruvien d'avant la conquête espagnole, les Chimús sacrifiaient en masse des enfants et de jeunes lamas face à l'océan Pacifique.

> Cette pratique rituelle se rattache à celles des autres cultures américaines de l'époque, mais se caractérise par l'importance centrale que les prêtres chimús accordaient à l'arrachement du cœur.

> Le sacrifice de masse dont les traces ont été mises au jour sur le site de Huanchaquito-Las Llamas était vraisemblablement destiné à apaiser la colère des dieux, traduite par un épisode climatique El Niño.

> Les sacrifices humains servaient probablement aussi à asseoir le pouvoir des élites dirigeantes sur la société chimú.

L'AUTEUR



NICOLAS GOEPFERT
chargé de recherche du CNRS
au laboratoire Archéologie
des Amériques (CNRS-université
Paris 1-Panthéon-Sorbonne),
installé à la MSH Mondes,
à Nanterre