

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.

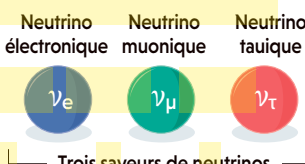
Une façon de le comprendre est de se rappeler que, conformément à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, le temps s'écoule plus lentement pour un objet en mouvement que pour un objet immobile. Plus un objet va vite, plus son horloge ralentit (par rapport à une horloge immobile) jusqu'à s'arrêter 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

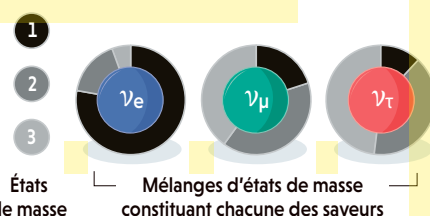
Les neutrinos sont des particules élémentaires très surprenantes. Bien que la théorie leur ait attribué une masse nulle, ils se sont révélés dotés d'une masse non nulle, quoique minuscule. Les neutrinos se propagent presque à la vitesse de la lumière et n'interagissent que très rarement avec le reste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

PROPRIÉTÉS DES NEUTRINOS

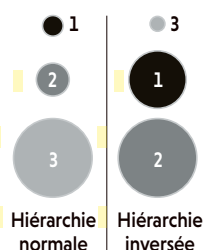
Il existe trois types ou « saveurs » de neutrinos : le neutrino électronique, le neutrino muonique et le neutrino tauique.



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

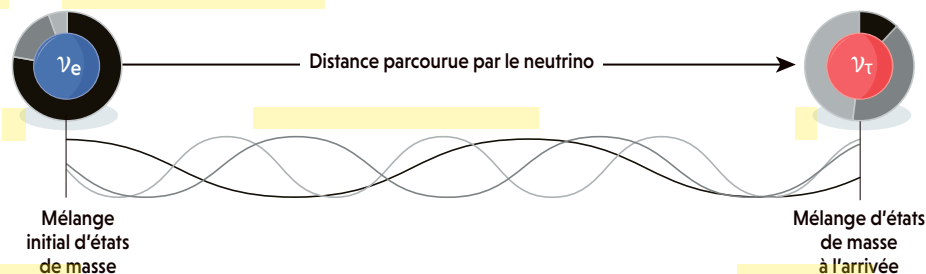


On ne connaît pas encore la valeur exacte de ces trois masses, à part le fait qu'elles sont toutes très petites. La théorie suggère deux possibilités : soit les deux premières sont exceptionnellement faibles et la troisième légèrement plus élevée, soit au contraire l'une est extraordinairement petite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



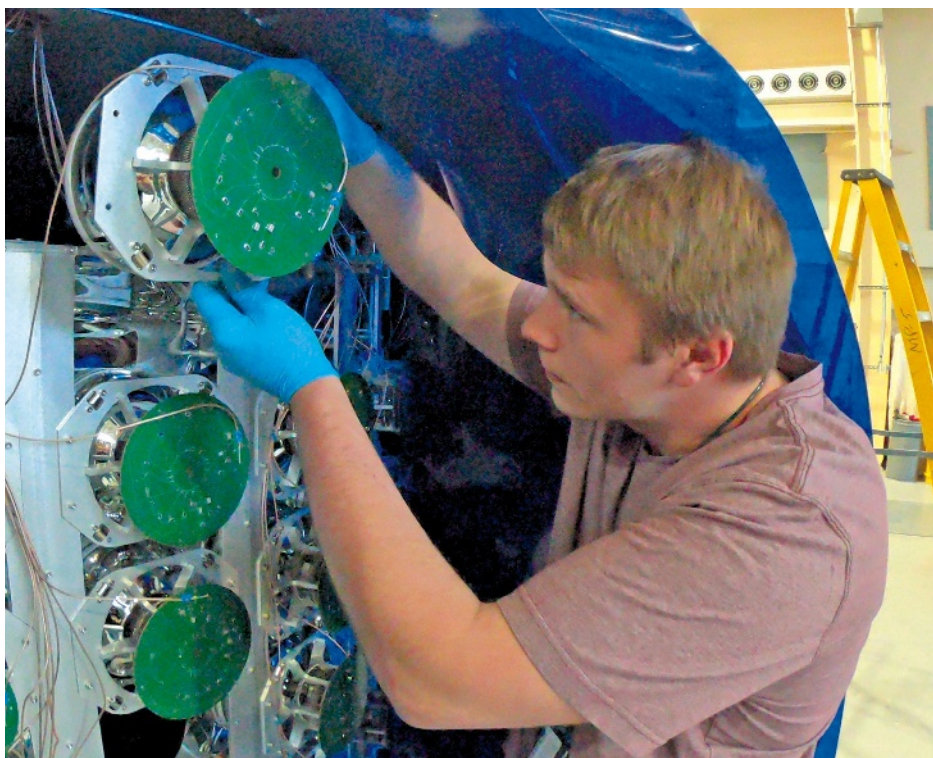
> place. Or si la saveur des neutrinos n'est pas fixe, c'est qu'ils subissent un changement et donc qu'ils ressentent le passage du temps. Ils voyagent donc nécessairement à une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière. Par suite, ils ne peuvent pas être dépourvus de masse. Selon la relativité restreinte, 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.