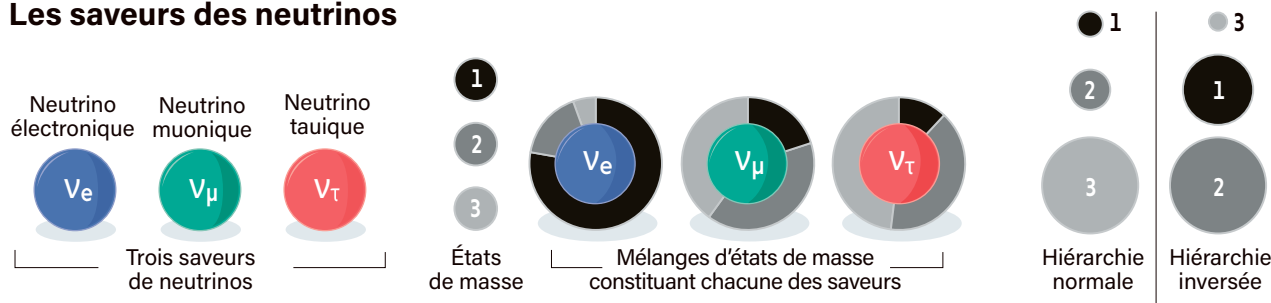


Les saveurs des neutrinos



Il existe trois types ou « saveurs » de neutrino : le neutrino électronique, le neutrino muonique et le neutrino tauique. Ces saveurs sont des états constitués en réalité 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.

30

vous paraîtrait s'arrêter et l'Univers se figer sur 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 celle 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

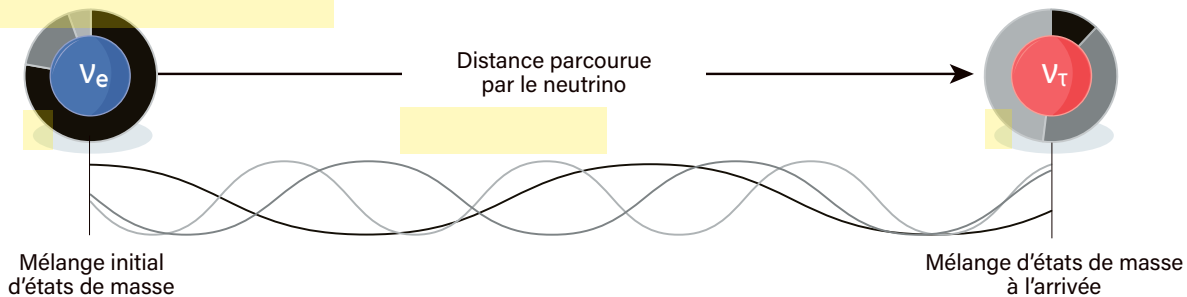
Dans les années 1990 et 2000, nous étudions précisément cette capacité inattendue qu'ont les neutrinos à changer de saveur au sein des expériences *LSND* et *MiniBooNE*. C'est alors que les indices de l'existence d'un neutrino supplémentaire ont commencé à apparaître de façon récurrente. Dans les deux 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 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

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