

physique quantique, c'est la probabilité de détecter l'un ou l'autre des types de neutrino qui oscille. Au début, la probabilité que le neutrino soit muonique est égale à 100 pour cent. Après une certaine distance, la probabilité que le neutrino soit tauique est égale à 100 pour cent. Entre les deux positions, quand les probabilités sont inférieures, on verra, au hasard, un neutrino tauique ou un neutrino muonique.

Cette oscillation ne doit pas surprendre : les photons, ou grains de lumière, ont le même comportement. La lumière peut avoir divers états de polarisation, par exemple verticale, horizontale, circulaire droite ou circulaire gauche. Ces états ne correspondent pas à des masses différentes (tous les photons ont une masse nulle), mais, dans certains matériaux « optiquement actifs », la lumière de polarisation circulaire gauche se déplace plus vite que la lumière de polarisation circulaire droite. Or, un photon de polarisation verticale est une superposition de ces deux polarisations circulaires. Lorsqu'il traverse un matériau optiquement actif, sa polarisation tourne (autrement dit, oscille) de la verticale à l'horizontale à mesure que les phases de ses deux composantes circulaires alternent.

Dans *Super-Kamiokande*, l'observation des oscillations de neutrinos ne nécessite aucun matériau spécifique : si les deux composantes du neutrino ont des masses suffisamment différentes, elles engendrent des oscillations de saveur, que le neutrino se déplace dans l'air, dans une roche ou dans le vide. Lorsqu'un neutrino descend dans la cuve de l'expérience, le nombre d'oscillations qu'il a effectuées dépend de son énergie et de la distance qu'il a parcourue depuis sa création. Comme les neutrinos muoniques descendants ont parcouru quelques dizaines de kilomètres au plus, seule une fraction de

cycle s'est déroulée : on détecte presque toujours la saveur muonique originelle (voir la figure 3). En revanche, les neutrinos muoniques ascendants, créés à des milliers de kilomètres du détecteur, ont oscillé tant de fois qu'en moyenne seule la moitié d'entre eux est détectée sous la forme de neutrinos muoniques. L'autre moitié traverse le détecteur sous la forme de neutrinos tauiques, indétectables.

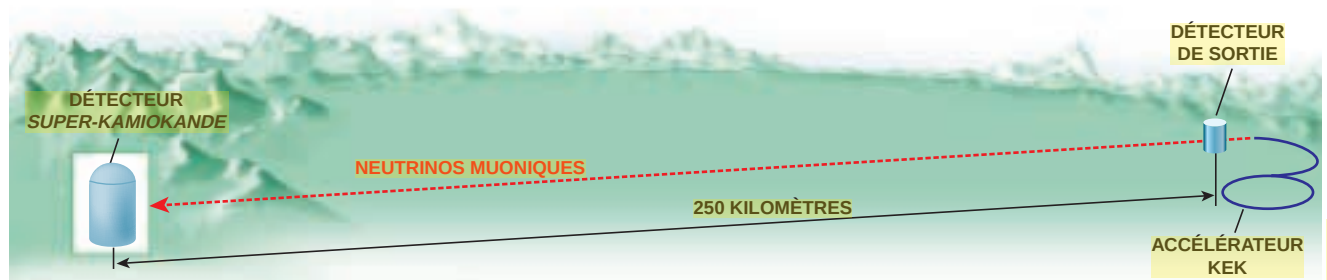
Un témoignage convaincant

Ces arguments sur le quotient des saveurs et les quantités d'événements ascendants par rapport aux événements descendants sont si convaincants que la majorité des physiciens ont admis cette oscillation des neutrinos. Pour compléter notre étude, nous avons précisé la dépendance du nombre de neutrinos muoniques en fonction de leur énergie et de leur angle d'incidence, puis nous avons comparé les nombres mesurés avec les prévisions obtenues à partir de plusieurs scénarios d'oscillations (y compris aucune oscillation). Les données décrivent très bien des oscillations pour certaines valeurs des différences de masses et pour certains autres paramètres physiques (voir la figure 5).

Ayant observé quelque 5 000 événements durant les deux premières années de notre expérience, nous savons que les anomalies observées ne s'expliquent pas par des fluctuations statistiques. Cependant, nous voulons maintenant confirmer notre découverte en observant l'oscillation des neutrinos muoniques à l'aide d'autres techniques ou dans le cadre d'autres expériences. Plusieurs détecteurs, au Minnesota et en Italie, ont déjà fourni une telle confirmation, mais avec trop peu d'événements pour donner une statistique satisfaisante.

Les oscillations de neutrinos ont été corroborées par des études d'un autre type d'interactions des neutrinos atmosphériques : leurs collisions avec les noyaux atomiques de la roche qui entoure notre détecteur. Lorsqu'ils interagissent dans la montagne, les neutrinos électroniques créent des électrons et des gerbes de particules, mais celles-ci sont absorbées dans la roche et n'atteignent jamais la grotte où est installé le détecteur. En revanche, les neutrinos muoniques de grande énergie créent des muons énergiques, qui peuvent traverser plusieurs centaines de mètres de roche et pénétrer dans la cuve du détecteur. Les muons captés proviennent alors des neutrinos ascendants, car les muons descendants sont masqués par le bruit de fond des muons engendrés par les rayons cosmiques qui pénètrent dans le mont Ikenoyama par en haut.

Les muons ascendants que nous parvenons à compter arrivent selon des directions comprises entre la verticale et presque l'horizontale. Ces directions correspondent à des distances de propagation des neutrinos



4. LE JAPON, LES ÉTATS-UNIS ET L'EUROPE projettent des expériences où des faisceaux de neutrinos émis par des accélérateurs seront détectés après avoir parcouru plusieurs centaines de kilo-

mètres. Ces expériences devraient confirmer l'existence de l'oscillation des neutrinos. Elles permettront la mesure précise des constantes naturelles qui la gouvernent.

(de leur production dans l'atmosphère à la création d'un muon près du détecteur) comprises entre 500 kilomètres (distance de la limite atmosphérique lorsqu'on regarde selon la verticale, vers le bas) et 13 000 kilomètres (le diamètre de la Terre, lorsqu'on regarde directement l'opposé du zénith). Nous trouvons alors que les neutrinos muoniques de faible énergie qui parcourent une grande distance sont plus rares que les neutrinos de haute énergie qui parcourent une faible distance. Ce comportement, conforme à la théorie des oscillations, est caractérisé par des paramètres voisins de ceux qui avaient été déduits de notre première étude.

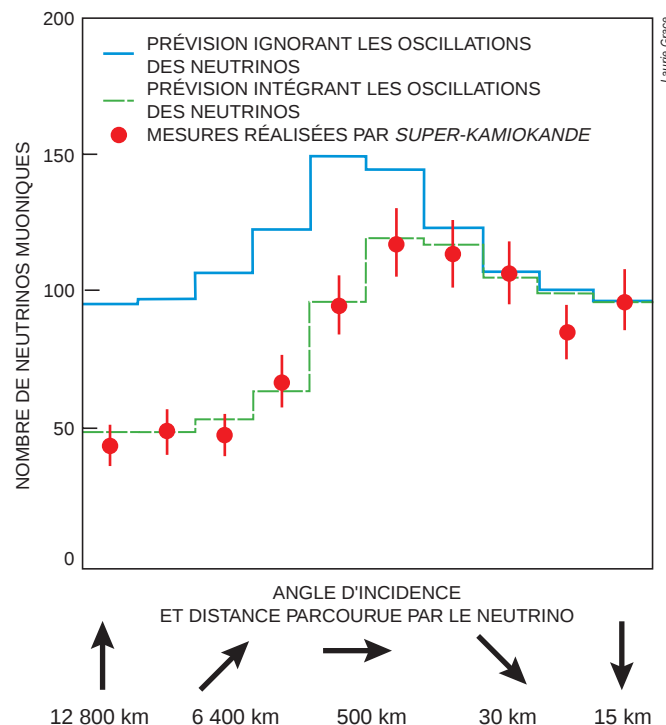
Si les seuls neutrinos possibles sont les trois actuellement connus, les données que nous avons recueillies montrent que les neutrinos muoniques se transforment en neutrinos tauïques. Selon

la théorie quantique, les oscillations sont dues à la masse des neutrinos (l'encadré de la page 66 indique d'autres possibilités).

Malheureusement, la théorie quantique limite également nos expériences : elle permet uniquement de mesurer les différences entre les carrés des masses des deux saveurs de neutrinos, car cette différence détermine la longueur d'onde des oscillations. Les données recueillies par notre expérience situent cette différence des carrés des masses entre 0,001 et 0,01 électronvolt au carré. À l'examen des masses des particules connues, on pense qu'un des deux neutrinos est bien plus léger que l'autre, ce qui situerait la masse du neutrino lourd entre 0,03 électronvolt et 0,1 électronvolt (à titre de comparaison, la masse de l'électron est égale à 511 000 électronvolts).

Quelles conséquences peut-on maintenant tirer de ce résultat ?

Premièrement, l'existence de neutrinos massifs n'infirme pas le Modèle standard de la physique des particules. Toutefois, on doit alors introduire dans le Modèle des paramètres «de mélange» qui compliquent les interactions. Un mélange similaire existe aussi entre les différents types de quarks, mais nos données indiquent



5. LES NOMBRES DE NEUTRINOS MUONNIQUES DE HAUTE ÉNERGIE qui arrivent sur le détecteur *Super-Kamiokande* selon diverses trajectoires concordent avec les théories qui envisagent des oscillations des neutrinos (en vert), et sont en désaccord avec les théories qui les ignorent (en bleu). Les neutrinos ascendants (partie gauche du graphique) ont parcouru une distance suffisante pour que la moitié d'entre eux aient changé de saveur et échappé ainsi à la détection.

que les neutrinos ont besoin de beaucoup plus de mélange.

Deuxièmement, une masse de 0,05 électronvolt resterait bien inférieure à celle des autres particules de matière. Cela explique que l'on ait longtemps pensé que les neutrinos avaient une masse nulle. Cette observation intéresse beaucoup les théoriciens qui cherchent une théorie unifiée afin de décrire toutes les forces, sauf la gravitation, par un même formalisme. Ils utilisent souvent une procédure mathématique nommée *basculé*, qui attribue naturellement au neutrino une masse petite, mais non nulle.

Les cosmologistes sont également intéressés parce qu'ils doivent désormais tenir compte de la masse des neutrinos dans le décompte de la masse de l'Univers. Depuis des années, les astrophysiciens cherchent à connaître cette masse. Ils ont d'abord recensé la masse présente dans la matière lumineuse – par exemple, dans les étoiles et les galaxies – et dans la matière ordinaire – par exemple, dans les naines brunes ou dans les gaz diffus. Puis ils ont également estimé cette masse de manière indirecte, à partir du mouvement orbital des galaxies et de la vitesse d'expansion de l'Univers. Or, le recen-

sement direct donne un résultat 20 fois inférieur au décompte indirect : l'Univers est plus massif qu'il ne le paraît. Bien que la masse des neutrinos soit très faible, l'ensemble des neutrinos créés lors du Big Bang, et omniprésents dans l'espace, aurait une masse presque égale à la masse totale des étoiles.

Enfin, nos données sont importantes en physique des particules. Des physiciens ont décidé d'étudier les oscillations des neutrinos en utilisant des neutrinos émis par l'accélérateur du *Fermilab*, situé dans la banlieue de Chicago plutôt que les neutrinos incontrôlables de l'atmosphère ; la détection sera assurée par un appareil en construction dans une mine, à Soudan (Minnesota).

Comme un bon détecteur de neutrinos atmosphériques est également un bon détecteur de neutrinos émis par un accélérateur, nous allons utiliser notre

détecteur *Super-Kamiokande* pour étudier un faisceau de neutrinos émis par l'accélérateur du KEK, situé à 250 kilomètres, près de Tokyo. On règle ce faisceau à volonté (direction, énergie, intensité). Un détecteur semblable à *Super-Kamiokande*, placé près de l'origine du faisceau, caractérisera les neutrinos muoniques avant qu'ils n'oscillent. Pour éliminer toute incertitude, nous utilisons (une nouvelle fois) le rapport des comptages à la source par des comptages loin de la source. En ce moment même, les neutrinos du premier faisceau de neutrinos artificiel passent sous les montages du Japon. Les 50 000 tonnes d'eau ultrapure de *Super-Kamiokande* devraient en détecter quelques-uns, mais combien exactement ?

Edward KEARNS, Takaaki KAJITA et Yoichi TOTSUKA sont membres de la collaboration *Super-Kamiokande*.

J.M. LOSECCO, Frederick REINES et Daniel SINCLAIR, *Les protons sont-ils stables ?*, in *Pour la Science*, août 1985.

Nickolas SOLOMEY, *The Elusive Neutrino : A Subatomic Detective Story*, Scientific American Library, W.H. Freeman and Company, 1997.