

La masse du neutrino

L'expérience SuperKamiokande découvre les oscillations des neutrinos.

En 1931, Wolfgang Pauli postulait l'existence d'une particule dénommée neutrino dont l'énergie compensait le déficit énergétique observé dans la désintégration bêta des noyaux radioactifs. Sa masse, comme celle du photon, était alors considérée comme nulle, mais aujourd'hui, cette hypothèse est remise en question : une équipe américano-japonaise vient d'annoncer l'existence d'un neutrino massif.

Le neutrino est une particule neutre qui n'interagit avec la matière que par l'intermédiaire de la force nucléaire faible, l'une des quatre forces de la nature. Cette force n'agit qu'à très faible distance et l'étude du neutrino n'en est que plus délicate : la plupart des neutrinos traversent la Terre sans interagir.

La traque des neutrinos a commencé dans les années 1950 et l'on a découvert non pas un neutrino, mais trois, chacun associé à une famille de leptons, des particules insensibles à la force nucléaire forte. Les physiciens ont identifié trois familles de leptons : celle de l'électron, celle du muon et celle du tau. Chaque famille comprend des représentants chargés, comme l'électron, et des particules neutres, tel le neutrino.

Lors d'une réaction nucléaire, un électron peut se transformer en un neutrino. Si les neutrinos ont une masse strictement nulle, la physique des particules stipule que ces échanges doivent se faire en famille : un neutrino électronique ne peut se changer en neutrino muonique. En revanche, si les neutrinos ont une masse, les échanges peuvent se faire « en dehors du clan ». Ainsi, un neutrino électronique peut se changer en neutrino muonique au cours du temps, et réciproquement. On nomme un tel changement une « oscillation des neutrinos ». La probabilité de changement dépend de deux facteurs : la différence des carrés des masses entre les neutrinos échangés et la durée entre l'instant de leur formation et l'instant de leur interaction (dénommée temps de vol).

Plus ce temps de vol est long, plus les neutrinos oscillent. Pour étudier des neutrinos dont le temps de vol varie, on

mesure la distance parcourue entre le point de formation du neutrino (sa source) et son point de disparition (l'interaction).

L'expérience *SuperKamiokande*, située au Japon, étudie les neutrinos atmosphériques. Lorsque les protons du rayonnement cosmique entrent en collision avec des atomes de la haute atmosphère, à dix kilomètres d'altitude, des gerbes de particules contenant des neutrinos sont émises. Le détecteur reçoit des neutrinos qui proviennent de toute l'atmosphère et qui ont parcouru des distances différentes : les neutrinos créés à la verticale du détecteur ont parcouru une dizaine de kilomètres, tandis que ceux créés aux antipodes du détecteur ont traversé toute la Terre, soit près de 13 000 kilomètres. Ainsi, la direction d'arrivée des neutrinos indique la distance parcourue, donc leur temps de vol, car on connaît leur vitesse.

Installé dans une mine, à 700 mètres de profondeur pour éviter la contamination par d'autres particules, le détecteur de *SuperKamiokande* est constitué d'une cuve cylindrique remplie de 50 000 tonnes d'eau très pure. Toutes les heures environ, un neutrino atmosphérique interagit

avec un quark contenu dans un noyau d'oxygène de l'eau. Une particule chargée de haute énergie, un électron ou un muon, est alors émise. Cette particule poursuit son chemin quelques mètres dans l'eau avant d'être absorbée.

Lors de ce déplacement, un cône de lumière est émis ; la lumière est alors enregistrée par quelques-uns des 13 000 photomultiplicateurs qui couvrent la paroi interne de la cuve. De l'analyse de cette lumière, on déduit la direction de la particule, son énergie et sa nature. Grâce à cette détermination, on sait quel type de neutrino a interagi dans la cuve, car un neutrino électronique produit un électron et un neutrino muonique, un muon.

Quels sont les résultats ? Connaissant, par une autre méthode, combien de neutrinos électroniques et de neutrinos muoniques sont produits dans l'atmosphère, les résultats de *SuperKamiokande* montrent que certains neutrinos muoniques produits disparaissent, tandis que les neutrinos électroniques sont stables (en accord avec les résultats de l'expérience de Chooz, publiés en 1997).

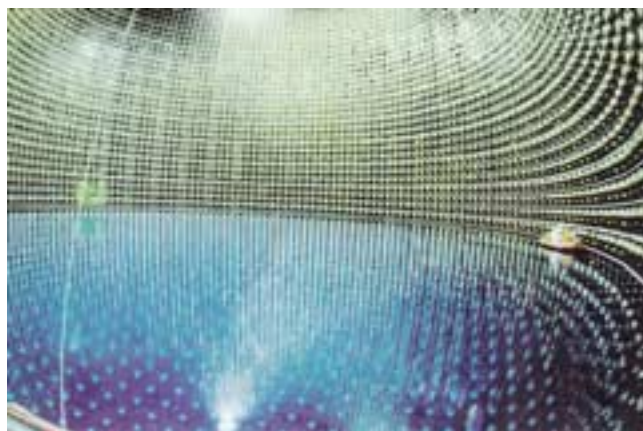
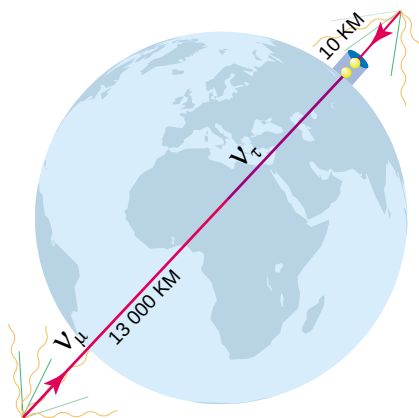
Les neutrinos muoniques disparaîtraient, parce qu'ils se transformeraient en neutrinos tauïques. Or, de tels échanges entre familles n'ont lieu que si les particules ont une masse. On en déduit que ces deux neutrinos ont une masse, mais aucune valeur ne peut être déduite de cette observation (au mieux connaît-on la différence du carré de leur masse).

Si les résultats de *SuperKamiokande* sont probants, ils supposent, toutefois, que l'on connaisse bien la source des neutrinos atmosphériques. Or, les incertitudes sur le flux de ces neutrinos sont voisines de 15 pour cent. Pour confirmer les oscillations, les physiciens projettent des expériences qui utiliseront des sources connues

de neutrinos, tels les accélérateurs de particules.

La première étape aura encore lieu au Japon, où l'on dirigera un faisceau de neutrinos de l'accélérateur KEK, près de Tokyo, vers le détecteur de *SuperKamiokande* situé à 250 kilomètres. Le faisceau sera prêt au printemps 1999, et il faudra trois ans pour accumuler 600 événements. Un programme européen projette d'envoyer un faisceau entre le CERN et le tunnel du Gran Sasso, en Italie, à 730 kilomètres. Si les décisions sont prises rapidement, le faisceau et les détecteurs seront prêts en 2003.

Yves DECLAIS, Institut de physique nucléaire de Lyon



La cuve de 50 000 tonnes d'eau de *SuperKamiokande* (en bas), ici à moitié remplie, est recouverte de 13 000 photomultiplicateurs. Ces derniers enregistrent la lumière émise par l'interaction d'un neutrino venant de l'atmosphère avec un quark contenu dans un noyau d'oxygène de l'eau très pure de la cuve. Les neutrinos détectés sont créés dans l'atmosphère, vers dix kilomètres d'altitude (en haut). Plus la distance parcourue est grande, moins on détecte de neutrinos muoniques (ν_μ), car ils se sont transformés en neutrinos tauïques (ν_τ).

Né de père absent

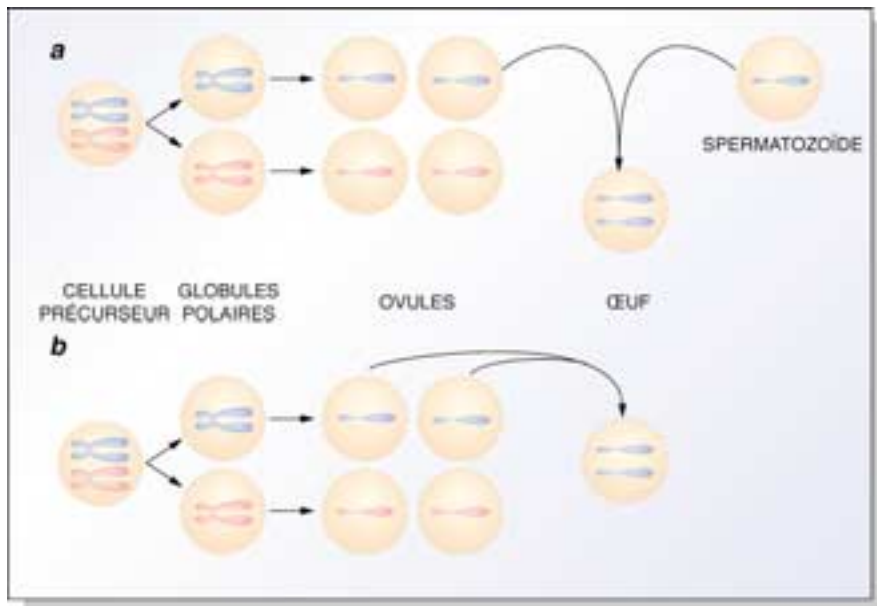
Des serpents femelles donnent naissance à des mâles sans s'accoupler.

Un animal naît généralement de l'accouplement de deux individus de sexes différents. Toutefois, dans certaines espèces, les femelles peuvent donner naissance à des jeunes sans le concours d'un mâle : c'est la parthénogenèse. On observe ce mode de reproduction chez des invertébrés (abeilles, pucerons...) et chez quelques vertébrés, dont plusieurs reptiles.

Ainsi le gecko, petit lézard du Pacifique Sud, est une espèce unisexuée qui se reproduit par clonage : tous les individus sont des femelles. Jusqu'à présent, la parthénogenèse n'était attestée que pour une seule des 2 800 espèces de serpents recensées. Des biologistes viennent de découvrir que cinq autres espèces peuvent aussi se reproduire par parthénogenèse, les femelles ne donnant alors naissance qu'à des mâles.

Des serpents femelles d'espèces bisexuées, maintenus en captivité en l'absence de mâles, produisent des jeunes. Fécondent-elles leurs ovules avec du sperme stocké dans leurs voies génitales, comme c'est souvent le cas chez les reptiles ? C'est peu probable, car les spermatozoïdes ainsi emmagasinés ne resteraient viables qu'une dizaine de mois, et l'une des femelles procréatrices n'a pas eu de contact avec un mâle depuis 14 ans. En outre, la comparaison de l'ADN des femelles et de leurs jeunes confirme l'absence d'éléments d'origine paternelle. Aucun doute possible : les jeunes sont issus de parthénogenèse.

Pourquoi, au contraire de ce qui se passe pour les lézards, tous ces jeunes serpents nés sans père sont-ils des mâles ? Dans le cas de la reproduction sexuée « normale », les cellules sexuelles des deux sexes, les gamètes, sont produites lors de la méiose à partir d'une cellule précurseur. Celle-ci, qui contient n paires de chromosomes (n dépend de l'espèce), se divise d'abord en deux globules polaires, qui contiennent chacun n chromosomes (un de chaque paire). L'un de ces globules est éliminé et, dans le second, les deux brins d'ADN qui composent chaque chromosome se séparent. Ce second globule se divise alors en deux nouveaux globules polaires, qui contiennent chacun n brins d'ADN. Chaque globule devient un gamète fonctionnel : un œuf résultera de la fusion de ce gamète avec un gamète de l'autre sexe.



Chez les reptiles, la femelle porte deux chromosomes sexuels différents (on n'a figuré que ces deux chromosomes, en bleu et en rouge, dans les cellules), et le mâle en porte deux identiques (ici, bleus). Lors de la production de cellules sexuelles par la femelle (a), une cellule précurseur (à gauche) se divise en deux « globules polaires », qui contiennent chacun un chromosome sexuel différent. Puis chaque globule polaire se divise à son tour, et forme un ovule fonctionnel. Dans plusieurs espèces de serpents, deux évolutions sont possibles. Si la femelle s'accouple avec un mâle, un œuf est formé par fusion de l'ovule avec un spermatozoïde (en haut à droite). En l'absence d'accouplement (b), les deux ovules issus du même globule polaire fusionnent et forment un œuf, qui contient ainsi deux chromosomes sexuels identiques : c'est un mâle.

Dans le cas des serpents parthénogénétiques, les deux ovules issus de la seconde division fusionnent, comme si l'un d'eux était un spermatozoïde, et forment un œuf. Chez les reptiles, la femelle porte deux chromosomes sexuels différents, Z et W, tandis que le mâle possède deux chromosomes sexuels identiques (ZZ) (chez les mammifères, en particulier chez l'homme, c'est le mâle qui porte deux chromosomes sexuels différents). Lors de la méiose, la division de la cellule précurseur du gamète produit deux globules polaires qui ne contiennent chacun que l'un des deux chromo-

somes sexuels : Z ou W. Les deux globules formés par la seconde division contiennent donc tous les deux le même chromosome sexuel. La fusion de ces deux globules produit un œuf de type ZZ ou WW. Le développement d'un œuf qui contient deux chromosomes sexuels Z produit un mâle. Les œufs qui contiennent deux chromosomes W, en revanche, ne correspondent à aucun des deux sexes et ne se développent donc pas : on observe effectivement une forte proportion d'œufs stériles chez ces femelles qui ne s'accouplent pas.

Catherine PERRIN

Moussons inattendues

Des moussons vieilles de 525 000 ans remettent en question les modèles d'évolution des climats.

Depuis un million d'années, les pluies tropicales d'été, nommées moussons, sont renforcées tous les 20 000 ans environ (quand la Terre passe au plus près du Soleil pendant l'été de l'hémisphère Nord), pendant quelques milliers d'années. Martine Rosignol-Strick (CNRS-Université Paris VI), Martine Paterne et Franck Bassinot (CEA)

ont découvert que les moussons africaines et indiennes ont été énormes il y a 528 000 - 525 500 ans, à un moment où elles auraient dû être à peine renforcées. Cette anomalie serait le signe d'un événement climatique exceptionnel à l'échelle planétaire.

La Terre a enregistré l'amplitude de ces moussons dans les sédiments marins. M. Rosignol-Strick et ses collègues ont étudié une carotte forée en Méditerranée, à l'Est de la Sicile. Dans cette carotte, les sédiments généralement clairs sont entrecoupés de quelques couches noires, très riches en matière organique, qui indiquent que des moussons exceptionnellement fortes ont frappé l'Afrique de l'Ouest.

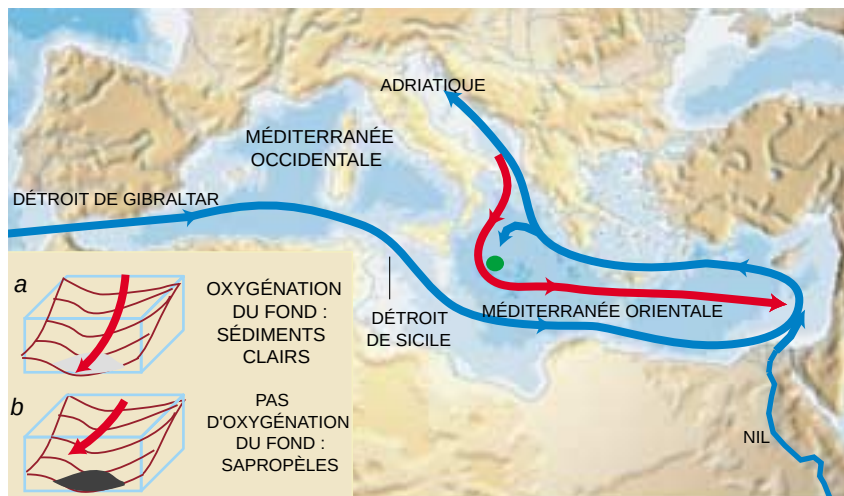
Dans ce bassin oriental de la Méditerranée, l'eau de surface vient de l'océan Atlantique. En revanche, la circulation d'eau profonde est bloquée par les détroits, et l'eau de fond résulte de l'enfoncement, en hiver, de l'eau dense (froide et salée) de la surface de l'Adriatique. Cette eau alimente le fond du bassin en oxygène et assure la survie des bactéries aérobies. Ces bactéries oxydent la quasi-totalité des déchets organiques, de sorte que les sédiments au fond de la mer sont de couleur claire.

Sur le Nord de l'Éthiopie, les pluies de la mousson d'Afrique de l'Ouest alimentent la crue du Nil, qui se déverse au Sud-Est de la Méditerranée. Quand la mousson est particulièrement forte, l'eau de ces crues, mêlée à l'eau de mer, est entraînée jusqu'à l'Adriatique. L'apport d'eau douce est alors tel que l'eau de surface n'est plus assez dense pour s'enfoncer beaucoup : le fond de la mer n'est pas assez oxygéné pour que les bactéries aérobies survivent. Les bactéries anaérobies, qui les remplacent, ne dégradent pas les débris organiques les plus résistants, qui s'accumulent et colorent en noir le sédiment, nommé alors sapropèle.

Afin de dater ces sédiments, on relie l'alternance des sédiments clairs et noirs à celle des périodes glaciaires et interglaciaires dont on connaît les dates. Pour cela, on prélève les coquilles de certains micro-organismes marins dans les carottes sédimentaires. Leur analyse renseigne sur la proportion d'oxygène lourd par rapport à l'oxygène normal, dans l'eau des océans, proportion qui dépend du volume total des glaces.

Ainsi, on a trouvé que le dépôt d'une des couches de sédiments noirs de Méditerranée a commencé il y a 528 000 ans, et s'est terminé il y a 525 000 ans. Pourtant, à cette époque, l'insolation d'été était relativement faible dans l'hémisphère Nord, et les pluies de mousson n'auraient pas dû être si abondantes sur l'Afrique de l'Ouest : habituellement, seule une forte insolation d'été dans l'hémisphère Nord, en accentuant les différences de pression entre l'hémisphère Sud froid et des zones très chaudes de l'hémisphère Nord, renforce les vents de mousson responsables des pluies.

En outre, l'étude de sédiments prélevés dans l'océan Indien a révélé de fortes moussons indiennes, exactement à la même période. Il reste aux paléoclimatologues à trouver le phénomène climatique responsable de ces énormes moussons africaines et indiennes, que n'explique pas l'intensité de l'insolation terrestre.



Circulations des eaux méditerranéennes : les flèches bleues représentent la circulation des eaux de surface, et les flèches rouges les eaux profondes. En hiver, les eaux froides et salées de l'Adriatique s'enfoncent : la matière organique est oxydée (a). En cas de moussons d'Afrique exceptionnellement fortes, les abondantes eaux de pluies diminuent la densité des eaux de surface : les eaux de l'Adriatique s'enfoncent moins, et n'apportent plus l'oxygène aux matières organiques qui ne sont plus complètement oxydées. La fraction non oxydée s'accumule dans les sédiments comme ceux découverts à l'Est du détroit de Sicile (point vert).

Exploration virtuelle du côlon

Une méthode non invasive dépiste les polypes, sources potentielles de cancer du côlon.

Le dépistage précoce est l'une des conditions d'un traitement efficace des cancers. Dès lors, comment détecter les signes avant-coueurs de la maladie ? Une nouvelle méthode permet une exploration virtuelle du côlon, reconstitué à partir d'images prises au scanner.

Le cancer du côlon est la deuxième cause de mortalité par cancer en France, et les polypes en sont un indice précurseur. Ces petites tumeurs, de quelques millimètres de diamètre, bénignes au début, dégénèrent souvent en cancer. Pour les dépister, on recherche du sang dans les selles, mais le test (*Hémocult*) est peu sensible et peu fiable.

Les gastro-entérologues espèrent disposer bientôt de la coloscopie virtuelle, née de l'association du scanner à rayons X et de logiciels informatiques performants. L'endoscopie est une méthode fiable, mais qui présente quelques inconvénients : on introduit dans le côlon, par l'anus, un endoscope, une sorte de caméra miniaturisée équipée d'un minuscule scalpel qui sert à l'ablation des polypes visualisés grâce à la caméra.

Cette méthode n'est pas envisageable pour un dépistage de masse, car elle nécessite une anesthésie, qui augmente le coût de l'opération et n'est pas dénuée de risques. De surcroît, exceptionnellement, l'endoscope risque de perforer la paroi colique.

Au contraire, un examen par endoscopie virtuelle se déroule comme un scanner abdominal classique, sans injection d'un produit améliorant les contrastes. Comme lors d'une endoscopie, la personne subit une préparation pour nettoyer le côlon des selles ; au début de l'examen, le côlon est distendu par de l'air à l'aide d'une sonde introduite par l'anus, et le médecin administre un médicament qui relaxe les muscles du côlon. L'abdomen est ensuite exploré par scanner X : la table où est placé le patient avance lentement, pendant que le tube à rayons X tourne autour. Des détecteurs enregistrent les rayons X qui traversent l'organisme et fournissent les données nécessaires à la reconstruction des images des « coupes » de l'intestin. L'examen dure une vingtaine de minutes. Ensuite, la coloscopie virtuelle est réalisée sur les données stockées par l'ordinateur, tandis que la personne examinée est déjà repartie. Les programmes informatiques reconstituent l'abdomen et, notamment le côlon, en trois dimensions. Le médecin étudie à l'aide d'un logiciel adapté cet abdomen selon toutes les incidences qui l'intéressent. Il peut même observer l'inté-