

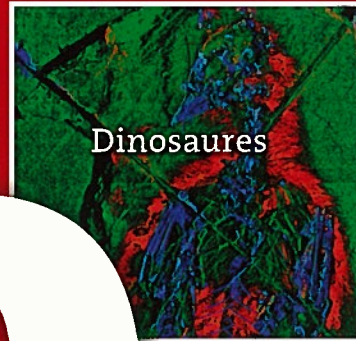
LA Recherche

L'actualité des sciences

Clonage



LES

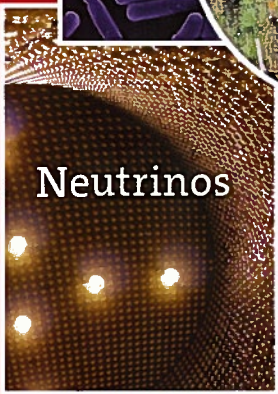


Dinosaures

Optogénétique



Neutrinos



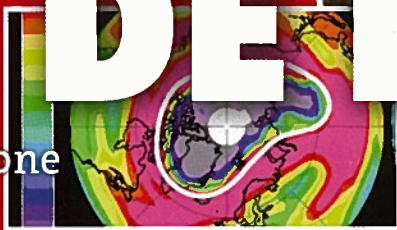
10



Numéro
spécial

DÉCOUVERTES DE L'ANNÉE

Ozone



Vieillessement



Planètes



À NE PAS MANQUER

*Les grands rendez-vous
de la science en 2012*

M 01108 - 460 S - F: 6,50 € - RD



Les 10 découvertes de l'année

Nous allons envoyer ce numéro chez l'imprimeur quand l'information est arrivée : le télescope spatial Kepler a permis la découverte de deux planètes de diamètre proche de celui de la Terre, en orbite autour d'une étoile semblable au Soleil. Nous ne pouvions rêver plus belle confirmation de notre choix

de mettre les travaux sur les exoplanètes en tête de notre palmarès des découvertes de 2011 : notre galaxie est bien remplie de planètes semblables à la nôtre !

Aux places suivantes, vous trouverez la découverte d'une protéine du vieillissement, ou encore la confirmation que les neutrinos ont une masse. Autant de résultats qui portent en germe la science de demain. Nous en prenons le pari.

© REMI MALINGREY

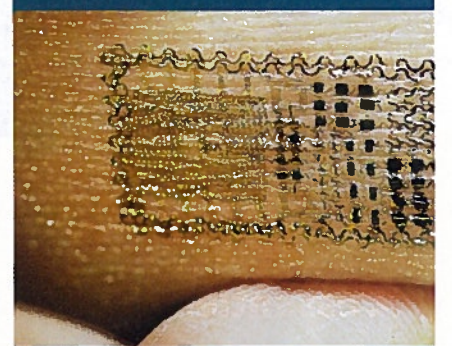


- 1 **Des superterres à perte de vue**
par Jean-François Haït
- 2 **Des plantes sexuées qui produisent des clones** par Marine Cygler
- 3 **Un essai clinique bouleverse les urgences en Afrique** par Sylvie Sargueil
- 4 **Les neutrinos en pleine transformation** par Michel Gonin
- 5 **Un « théâtre » gaulois en Auvergne**
par Nicolas Constans
- 6 **Le vieillissement dans le sang**
par Anne Debroise
- 7 **Destruction record d'ozone en Arctique** par Fabienne Lemarchand
- 8 **Des neurones contrôlés par la pensée** par Pierre-Marie Lledo et Gilles Gheusi
- 9 **Petits tuyaux entre bactéries**
par Anne Debroise
- 10 **Les nouvelles couleurs des dinosaures** par Nicolas Constans

La technologie
de l'année

*L'opto-
génétique
gagne tous
les organes*

par Pascaline Minet p.62



Images
de science

*L'album
de l'année*

par Cédric Duval p. 66

4 Les neutrinos en pleine transformation

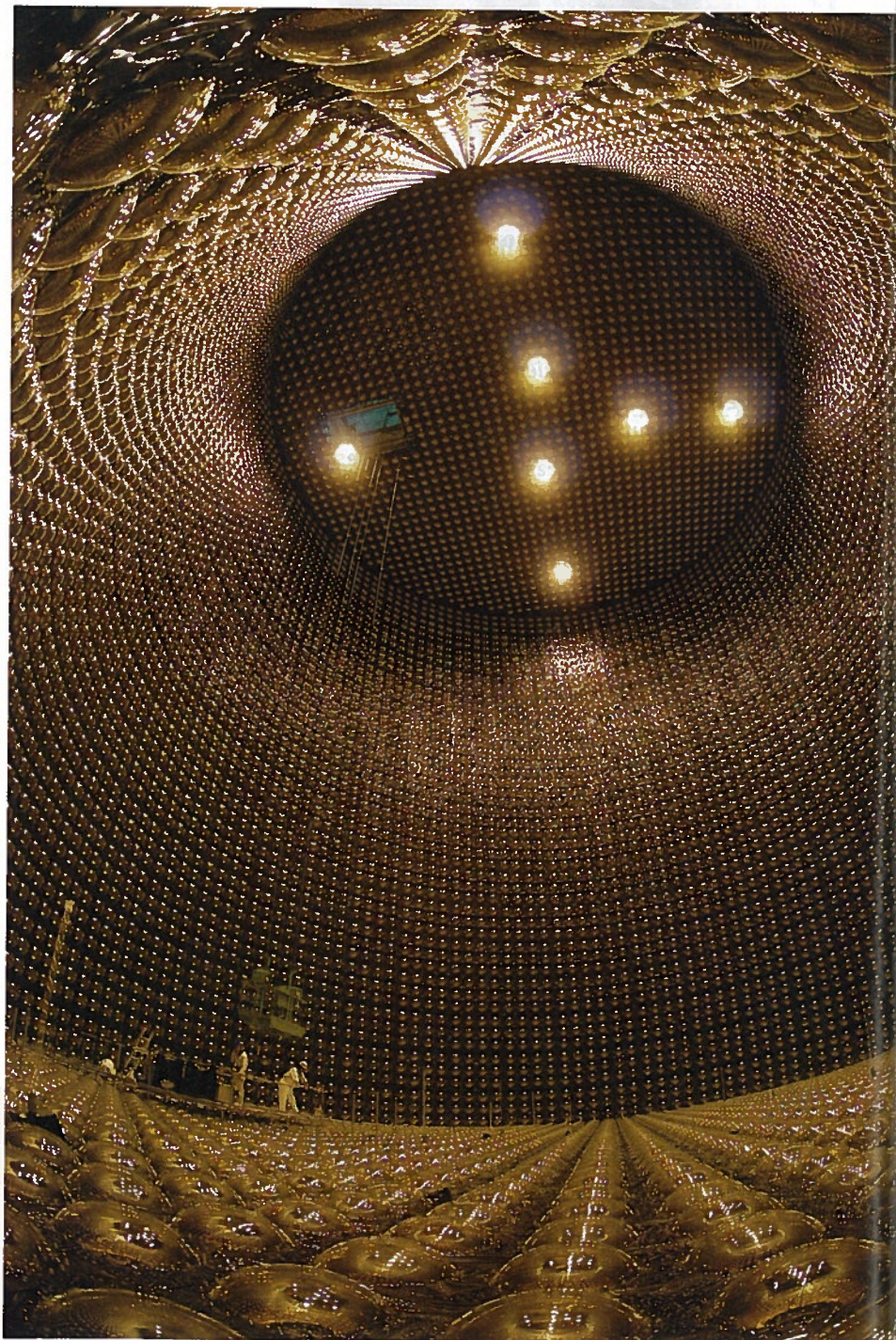
Les physiciens ont enfin la preuve que les neutrinos peuvent subir une transformation quantique : l'oscillation de saveur. Ce résultat confirme que ces particules ont une masse comme on le soupçonnait depuis longtemps.



PAR Michel Gonin, physicien, membre de T2K, directeur de recherche au CNRS, professeur à l'École polytechnique. © GUILLAUME GONIN

Les neutrinos sont extrêmement difficiles à observer. Uniquement soumis à l'interaction nucléaire faible, l'une des quatre forces fondamentales du modèle standard de la physique des particules élémentaires, ils n'interagissent en effet presque jamais avec la matière. Ils contiennent pourtant des informations cruciales sur la composition de l'Univers, et la compréhension de leurs propriétés représente sans doute la clé de voûte du modèle standard de la physique des particules. Une étape importante de l'étude de ces neutrinos a été franchie en 2011 par l'expérience T2K, installée au Japon. Cette collaboration internationale de 500 chercheurs a en effet démontré intégralement l'existence d'un phénomène nommé oscillation quantique de saveur, autrement dit la transformation d'une des trois formes de neutrinos, ou saveurs, en une autre [1].

À la fin des années 1990, plusieurs expériences de détection de ces par-



Super-Kamiokande est un détecteur de neutrinos de 40 mètres de haut, autant de diamètre, et tapissé d'une dizaine de milliers de photomultiplicateurs. Il a détecté des neutrinos électroniques apparus dans un faisceau de neutrinos muoniques.

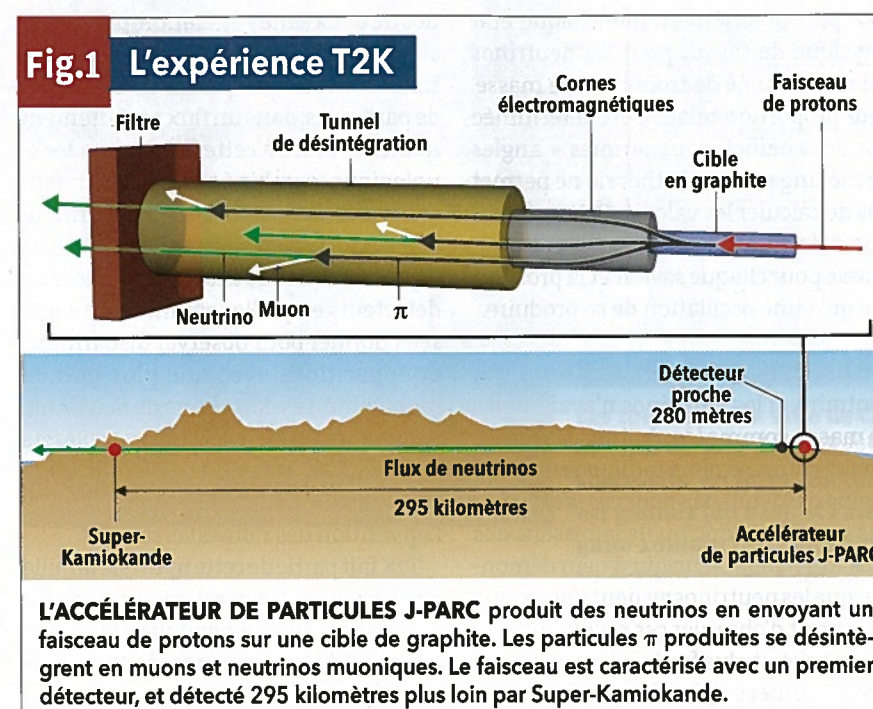
ticules avaient mis en évidence que des neutrinos « disparaissaient ». Les physiciens en avaient déduit que ceux-ci avaient changé de saveur. Mais ils n'avaient pas détecté l'apparition des neutrinos correspondants. Il subsistait un doute, qui vient d'être écarté par les résultats de T2K : les physiciens ont observé les deux phénomènes, disparition puis réapparition de certains neutrinos sous une autre saveur. L'existence de l'oscillation est donc définitivement prouvée.

Trois saveurs. L'existence des neutrinos a été postulée en 1930 par le physicien autrichien Wolfgang Pauli. Cette particule, indétectable à l'époque, permettait que soit respecté le principe de la conservation de l'énergie dans les phénomènes de désintégration bêta* des noyaux atomiques, par exemple lorsqu'un neutron se désintègre en proton. Son collègue italien Enrico Fermi les a aussitôt baptisés « neutrinos », littéralement les « petits neutres », car minuscules et de charge électrique nulle.

Les neutrinos existent sous trois saveurs : électronique, muonique et tauique. Chacune traduit une identité quantique qui différencie les neutrinos entre eux. Le neutrino électronique accompagne la production des électrons dans la radioactivité bêta. C'est la première saveur à avoir été détectée expérimentalement, en 1956 aux États-Unis, au voisinage d'un réacteur nucléaire producteur de neutrinos [2]. Cette détection prouvait que l'hypothèse de Pauli était juste.

Le neutrino muonique est créé notamment lors de la désintégration d'un muon, une particule élémentaire apparentée à l'électron, de même charge mais plus lourde. Cette saveur a été découverte en 1962 au laboratoire Brookhaven près de New York [3].

* UNE DÉSINTÉGRATION BÊTA correspond à la désintégration radioactive d'un noyau atomique, accompagnée par l'émission d'un électron et d'un antineutrino (bêta -) ou d'un positron et d'un neutrino (bêta +).



L'ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES J-PARC produit des neutrinos en envoyant un faisceau de protons sur une cible de graphite. Les particules π produites se désintègrent en muons et neutrinos muoniques. Le faisceau est caractérisé avec un premier détecteur, et détecté 295 kilomètres plus loin par Super-Kamiokande.

La troisième saveur, le neutrino tauique, a été identifiée au Fermilab à Chicago en 2001 [4]. Elle est associée à la particule tau, une autre particule proche de l'électron et du muon, et encore plus lourde. Il a donc fallu aux expérimentateurs plus de 70 ans pour attraper dans leurs filets les trois saveurs de neutrinos !

Une fois les neutrinos détectés, des physiciens ont voulu déterminer s'ils avaient une masse. La plupart d'entre eux pensaient que non, au vu des expériences précédentes qui avaient fixé des limites supérieures très faibles. La théorie favorisait l'hypothèse d'une masse nulle, mais ne permettait pas de la calculer pour vérifier. Seules des expériences pouvaient permettre de trancher.

Dans le monde quantique, pas question de peser directement les particules. Leurs états sont souvent instables, et ont une durée de vie finie. Chaque particule n'a pas une masse déterminée, mais une distribution continue de masses, centrée autour d'une valeur moyenne et donnée par des lois probabilistes.

Pour la plupart des particules, ces ins-

tabilités conduisent à une désintégration, irréversible. Mais pour les neutrinos, la théorie indiquait que, s'ils avaient effectivement une masse, cela conduirait à des phénomènes réversibles à l'infini nommés « oscillations de saveur ». Ainsi, un neutrino électronique se transformerait en neutrino muonique ou tauique, avec la possibilité de revenir ultérieurement dans son état initial.

La théorie quantique indique >>>

L'essentiel

> LES NEUTRINOS existent sous trois saveurs, une propriété quantique.

> L'EXPÉRIENCE T2K a observé plusieurs exemples de transformation d'une saveur en une autre.

> CES TRANSFORMATIONS ne sont possibles que parce que les particules ont une masse.

Les neutrinos en pleine transformation

» plus précisément que chaque état physique de saveur pour les neutrinos est un mélange de trois états de masse. Leur proportion relative est déterminée par des coefficients, nommés « angles de mélange », dont la théorie ne permet pas de calculer les valeurs. Cette proportion détermine la valeur moyenne de la masse pour chaque saveur et la probabilité qu'a une oscillation de se produire.

Observer les oscillations. Au contraire, si les neutrinos n'avaient pas de masse, comme les photons, les lois de la relativité restreinte indiquaient que le temps n'existait pas pour ces particules. Pas question donc qu'ils subissent des oscillations de saveur. Ainsi, pour démontrer que les neutrinos avaient une masse, il suffisait d'observer ces oscillations.

Mais c'était plus facile à dire qu'à faire. Dès les années 1960, des pionniers ont traqué des disparitions de neutrinos électroniques ou muoniques. Ces particules sont constamment produites dans notre Univers, et en quantités impressionnantes. La fusion à l'intérieur du Soleil, les fissions des noyaux dans les réacteurs nucléaires ou encore la radioactivité naturelle de la croûte terrestre nous soumettent en permanence à des flux intenses de ces particules, flux que l'on peut souvent modéliser.

Il a fallu attendre 1998 pour que ces expériences de première génération arrivent à la conclusion définitive qu'il manquait des neutrinos de certaines saveurs dans ces flux. L'explication la plus probable était qu'ils avaient changé de saveur : on avait, semble-t-il, observé des oscillations. Les physiciens pensaient détenir ainsi la preuve que les neutrinos avaient une masse. Celle-ci était très faible : au moins 100 000 fois inférieure à celle de l'électron. Ces expériences leur permirent aussi de mesurer deux des trois angles de mélange : environ 45 et 32 degrés.

À partir des années 2000, les physiciens des hautes énergies ont imaginé des expériences d'oscillation de neutri-

nos de deuxième génération, plus précises. Pour certaines d'entre elles, les neutrinos sont produits par des accélérateurs de particules, dans un flux parfaitement maîtrisé. Grâce à cette innovation technologique, combinée aux connaissances issues des expériences de la fin du XX^e siècle, les physiciens savaient aussi à quelles distances des sources placer les détecteurs et quelles gammes d'énergie sélectionner pour observer disparitions et apparitions avec une plus grande probabilité. Les détecteurs de deuxième génération sont également capables de détecter deux saveurs de neutrinos, une caractéristique nécessaire pour observer l'apparition des nouvelles saveurs.

T2K fait partie de cette nouvelle famille d'expériences. Un accélérateur de particules, situé dans le laboratoire J-PARC, sur la côte est du Japon, bombarde de protons une cible de graphite. Ces collisions produisent des particules instables. Celles-ci se désintègrent ensuite en émettant des muons et des neutrinos muoniques. Un filtre placé 100 mètres après la cible piège les protons et les muons, seuls les neutrinos poursuivent leur course.

Super-Kamiokande. À 280 mètres de la cible, ceux-ci traversent un détecteur qui contrôle précisément la direction du flux et la saveur des neutrinos émis. Tous les neutrinos continuent ensuite leur course à travers l'écorce terrestre, sans interagir avec la matière. Et 295 kilomètres plus loin, ils traversent un second détecteur, Super-Kamiokande. Cette distance de 295 kilomètres n'a pas été choisie par hasard : les neutrinos produits dans le laboratoire J-PARC oscillent avec une plus grande probabilité au bout d'une milliseconde, le temps qu'il leur faut pour parcourir cette distance compte tenu de leur vitesse, très légèrement inférieure à celle de la lumière.

Super-Kamiokande est constitué d'un cylindre de 40 mètres de haut et de 40 mètres de diamètre, rempli de 50 000 tonnes d'eau. Il est tapissé de

dizaines de milliers de photomultiplicateurs qui enregistrent un flash lumineux « Tcherenkov », émis lorsqu'un neutrino muonique ou électronique interagit avec le noyau d'un atome d'une molécule d'eau. Les caractéristiques du flash permettent de déterminer la saveur du neutrino. Un système de synchronisation des horloges par GPS permet de s'assurer que les neutrinos détectés sont bien ceux émis à J-PARC.

Durant la période de collecte des données, de janvier 2010 à mars 2011, Super-Kamiokande a enregistré un total de 88 neutrinos, parmi lesquels 6 neutrinos électroniques qui proviendraient de la métamorphose de neutrinos muoniques. Les 82 neutrinos restants sont des neutrinos muoniques n'ayant subi aucune transformation entre leur production et leur détection. Les physiciens ont calculé que les résultats obtenus sont fiables à 99,3 %. Ces observations prouvent définitivement que les neutrinos ont une masse. Elles ont aussi permis de mesurer une valeur approximative de 8 degrés pour le dernier angle de mélange.

Ces résultats ont été publiés en juillet dernier. L'expérience Minos aux États-Unis a annoncé quelques semaines après un résultat similaire, bien que moins précis. Une autre oscillation, celle d'un neutrino muonique se transformant en neutrino tauique, a aussi été rapportée par l'expérience Opera du CERN. Mises à l'arrêt le 11 mars 2011, après le séisme du Japon, les installations de l'expérience T2K n'ont subi que des dégâts minimes. Elles doivent être remises en service en janvier 2012. Les résultats conjugués de T2K et d'autres expériences à travers le monde laissent entrevoir une mesure précise et rapide du dernier angle de mélange des oscillations, et donc leur caractérisation complète. ■

[1] K. Abe et al., *Phys. Rev. Lett.*, 107, 041801, 2011.

[2] A. D. McGuire et al., *Science*, 124, 103, 1956.

[3] J. Steinberger et al., *Phys. Rev. Lett.*, 9, 36, 1962.

[4] K. Kodama et al., *Phys. Lett.*, 504, 218, 2001.

Pour en savoir plus

» « Les Particules élémentaires », *Les Dossiers de La Recherche*, n° 23, mai 2006.

» François Vannucci, *Le Vrai Roman des particules élémentaires*, Dunod, 2010.