



À LA  
**UNE**

*Il a détrôné le boson de Higgs*

# NEUTRI

**LA PARTICULE QUI VA FAIRE  
EXPLOSER TOUTE LA PHYSIQUE**

*Il ne va pas plus vite que la lumière... mais le neutrino n'en est pas moins susceptible de chambouler toute notre vision de la matière. Une nouvelle anomalie dans le nombre de ces particules issues de réactions nucléaires laisse supposer l'existence d'un type de neutrino jusqu'ici inconnu. La physique est décidément aux portes d'un nouveau chapitre de son histoire.*



# NO

PAR MATHIEU GROUSSON

Les révolutions n'arrivent pas toujours par où on les attend. Jusqu'à il y a quelques mois, la particule révolutionnaire par excellence, c'était le boson de Higgs. Durant plusieurs décennies, cette particule a cristallisé l'espoir de nous offrir une vision plus profonde et plus cohérente de la matière. Elle était censée guider les physiciens au-delà du cadre étriqué de leur "modèle standard", une théorie patiemment élaborée au cours du XX<sup>e</sup> siècle pour décrire

le bestiaire de toutes les particules matérielles, mais qui, au vu de ses incohérences, ne peut être la fin de l'histoire et doit être dépassée. La détection du boson de Higgs, baptisé "particule de Dieu", a justifié l'édification par l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (Cern) d'un gigantesque accélérateur de 27 km de diamètre, le LHC, près de Genève. Sa traque, passionnante, a fait la une des journaux, dont *Science & Vie*. Mais cette traque →

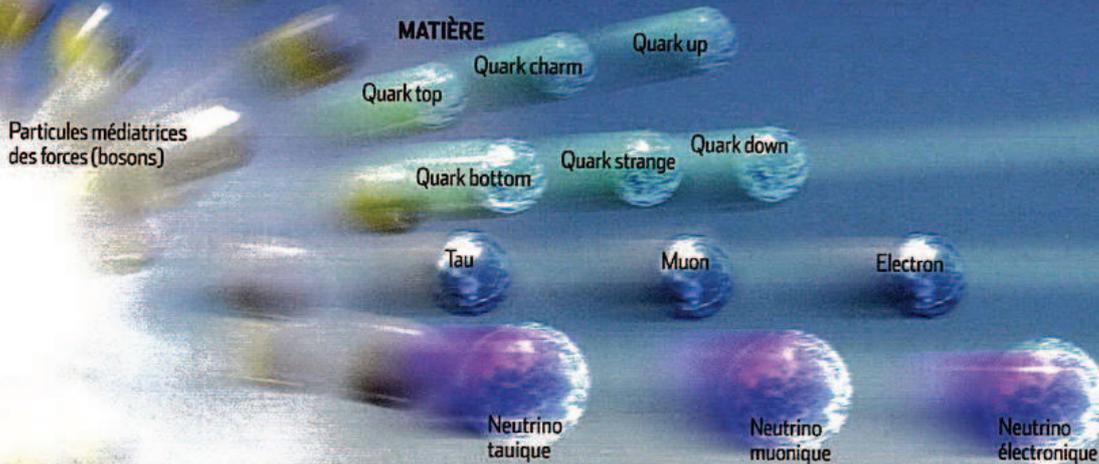
V.MOERHKE/CORBIS - T.HARTMAN/OXFORD  
SCIENTIFIC/GETTY

2012 | JUIN | SVI | 53



À LA  
**UNE**

## Neutrinos : des particules incroyablement discrètes



### 1 Ils forment une famille nombreuse au sein du modèle standard...

Le modèle standard recense 6 types de neutrino : l'électronique, le muonique, le tauique, ainsi que leurs antiparticules associées. Comparés aux 9 autres particules de matière (et antiparticules associées), ils sont tout petits. Ainsi, le plus lourd de ces neutrinos est 10 millions de fois plus léger que l'électron, la plus légère des autres particules.

### ANTIMATIÈRE

Antineutrino tauique

Antineutrino muonique

Antineutrino électronique

→ touche à sa fin, et tout laisse à penser que le boson tant recherché pourrait être entièrement conforme aux prédictions du modèle standard (voir encadré p. 59). Cette contemplation, imminente, qui va mettre un point final à l'un des plus beaux chapitres du grand livre de la science, n'ouvrira probablement

pas le suivant, puisqu'elle ne déflorera rien des nouveaux continents microscopiques. Autrement dit, le boson de Higgs ne va sans doute pas provoquer la grande révolution attendue...

Mais alors que le Cern, depuis quelques semaines, a relancé sa machine à pleine puissance, en vue d'une

annonce officielle avant la fin de l'année de ce qui restera – tout de même! – l'une des plus importantes découvertes de l'histoire de la physique, une autre particule est en train de capter l'attention. Cette particule appartient à une famille beaucoup plus discrète, peu habituée à faire la une des journaux : celle des neutrinos. Sensibles uniquement à la plus ténue des trois forces fondamentales, la force nucléaire faible (voir infographie ci-dessus), les six membres recensés par le modèle standard (les neutrinos électronique, muonique et tauique, ainsi que les antiparticules associées) sont capables de traverser plusieurs milliards de fois la Terre sans être remarqués.

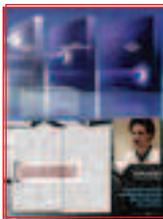
Ces "petits neutres" ont eu un premier et éphémère moment de gloire l'année dernière, lorsque certains spécimens ont été surpris à filer plus vite que la lumière. De quoi faire exploser



**THIERRY LASSERRE**

PHYSICIEN AU CEA-SACLAY

*Depuis quinze ans, les neutrinos laissent entrevoir une nouvelle physique*



## 2... et sont très difficiles à détecter

Contrairement au quark, sensible aux forces forte, faible et électromagnétique, ou à l'électron, sensible aux deux dernières, le neutrino n'interagit qu'avec la force nucléaire faible. Celle-ci porte si bien son nom que les neutrinos peuvent traverser de titanesques quantités de matière sans laisser de trace. Mais ils sont émis en si grand nombre (plusieurs milliers de milliards de milliards par seconde pour un réacteur nucléaire), qu'un détecteur de quelques m<sup>3</sup> peut en attraper quelques dizaines par jour.

toutes les bases de la physique. Peu de spécialistes crurent cependant à un tel chambardement et, sans trop de surprise, la révolution annoncée fit un flop : une expérience indépendante a depuis infirmé "l'impossible" résultat, probablement dû à une erreur expérimentale (voir *S&V* n° 1135, p. 14). Ce qui excite aujourd'hui les spécialistes

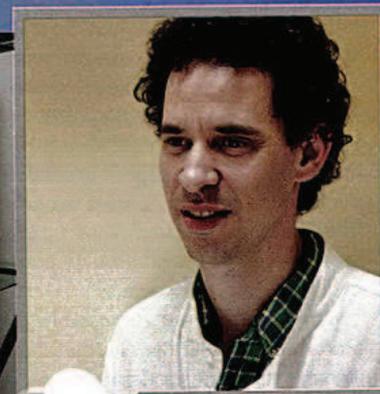
## ET SI LE PLUS FASCINANT DE TOUS LES NEUTRINOS ÉTAIT JUSQU'ICI PASSÉ INAPERÇU ?

de la matière est une tout autre affaire, bien plus crédible à leurs yeux. Elle est fondée sur une vingtaine de résultats anormaux, systématiquement mesurés lors de diverses expériences réalisées à travers le monde. Révélés il y a un an, ces résultats sont si troublants que les plus puissants engins expérimentaux

de la physique des particules, accélérateurs du Cern compris, sont en train d'être réquisitionnés pour les compléter. Car ces anomalies esquissent enfin les premiers contours de cette nouvelle physique que le boson de Higgs sera probablement incapable de nous révéler : pour de plus en plus de spécialistes de la matière, ces résultats

laissent penser que la famille des neutrinos serait plus grande que prévu, que le plus fascinant de ses rejetons serait passé jusqu'à

présent inaperçu, et que ce nouveau neutrino, radicalement différent de toutes les autres particules, serait susceptible de chambouler notre vision de la matière et du cosmos ! D'où cette interrogation : et si la révolution venait des neutrinos ? "Depuis quinze ans, les neutrinos laissent entrevoir une →



**DAVID LHULLIER**  
PHYSICIEN AU CEA-SACLAY

**Nos calculs montrent une flagrante anomalie dans le décompte des neutrinos**



À LA  
**UNE**

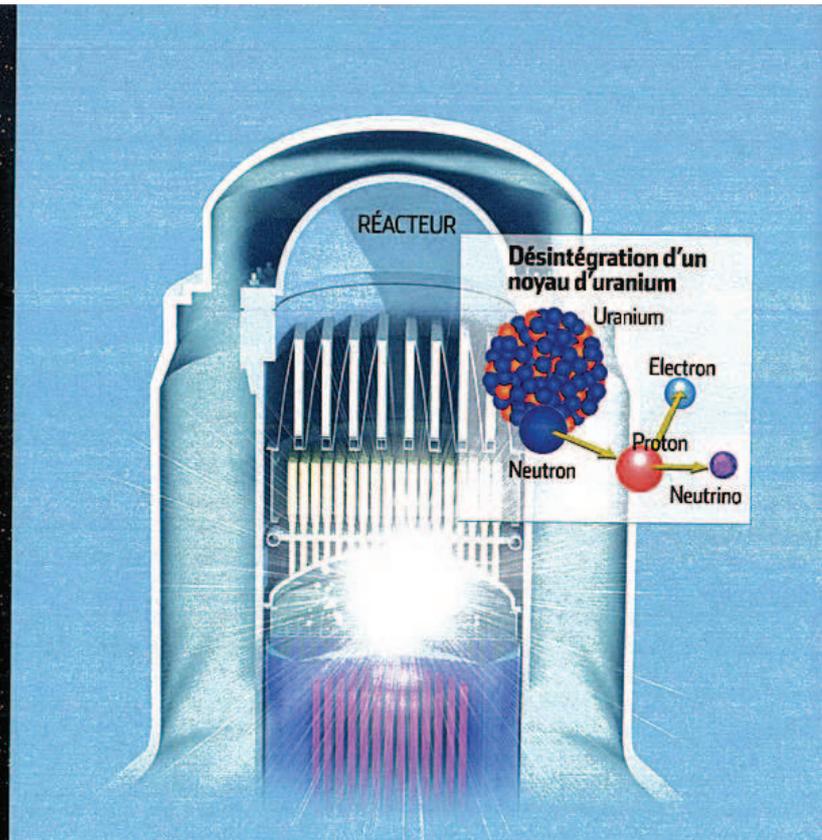
→ nouvelle physique. C'est pour cela que je m'y suis intéressé", s'enthousiasme Thierry Lasserre qui, avec son collègue David Lhuillier, du Commissariat à l'énergie atomique (CEA, Saclay), a mis au jour les dernières anomalies. Car aux yeux du physicien français, le penchant révolutionnaire des neutrinos est connu depuis 14 ans, quand on a découvert leur capacité à se transformer les uns en les autres, selon un processus dit d'oscillation. Ce qui contredit les prédictions du modèle standard, l'actuelle théorie de l'infiniment petit – il s'agit même, à ce jour, de la principale contradiction expérimentale avec nos tables de la matière.

**DES CALCULS REVUS À LA HAUSSE**

C'est justement pour étudier cette déconcertante oscillation que les physiciens préparent depuis quelques années, au sein de la centrale nucléaire de Chooz (Ardennes), une vaste expérience baptisée Double Chooz. Objectif : observer comment varie, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la centrale, le flux d'un type de neutrino émis spontanément par l'un des réacteurs – précisément l'antineutrino électronique. En attendant que le dispositif expérimental soit complet, les chercheurs ont commencé par comparer le nombre d'antineutrinos électroniques comptabilisés par un détecteur placé à 1 km du réacteur avec le nombre de particules émises par le réacteur.

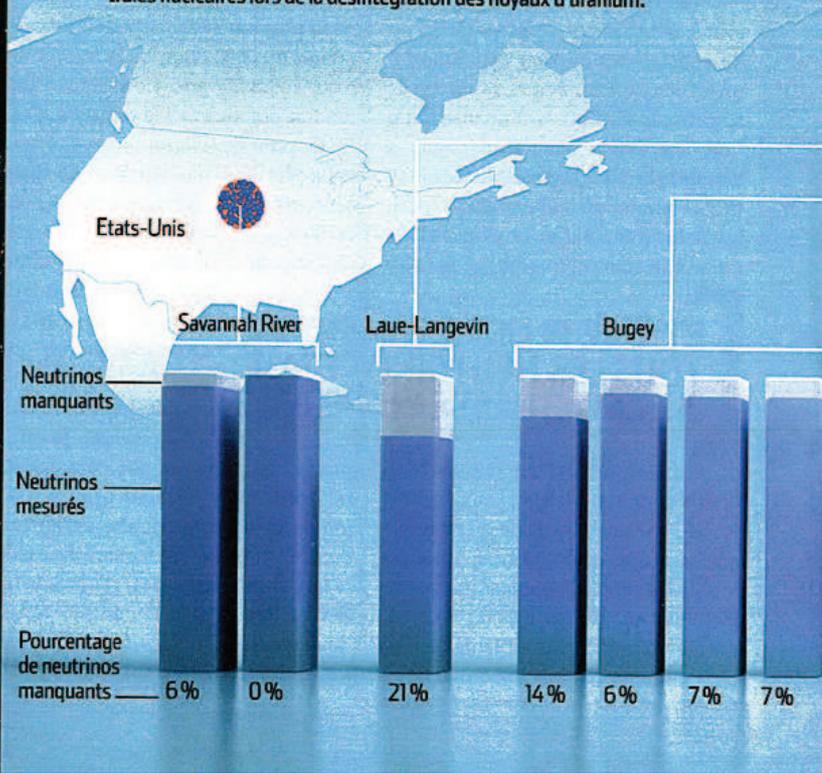
Mais puisqu'il est impossible de placer un détecteur dans le cœur d'un réacteur nucléaire, ce dernier nombre doit être mesuré par des méthodes indirectes. Jusqu'à récemment, toute estimation de ce type se faisait à partir de vieilles tables réalisées dans les années 1980, à l'Institut Laue-Langevin (ILL, Grenoble). A l'époque, les physiciens avaient mesuré avec une extrême précision le flux et l'énergie des électrons, facilement détectables, émis lors de la désintégration des noyaux d'uranium et de plutonium contenus dans un réacteur. Le flux des antineutrinos électroniques émis lors de ces réactions →

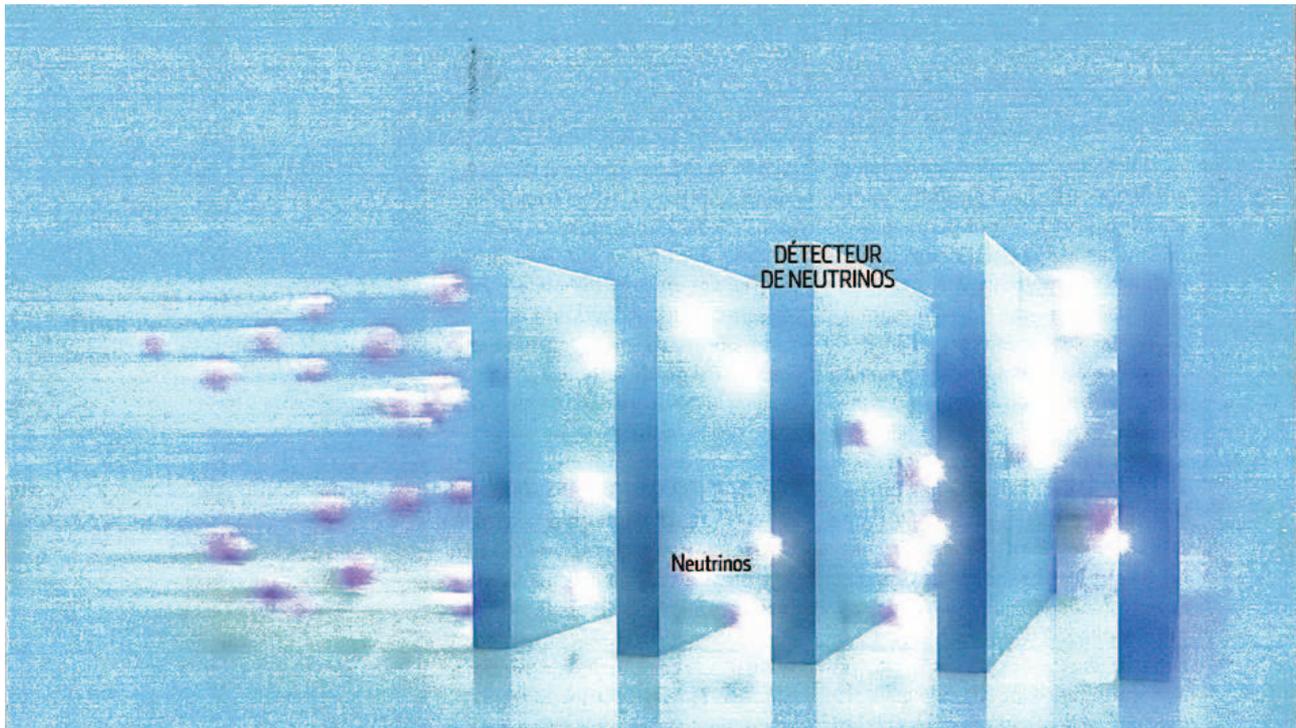
WWW.ILLUSTRE.FR



**1 De nombreuses expériences ont comptabilisé les neutrinos issus de réactions nucléaires...**

Dans les années 1980 et 1990, en France, aux Etats-Unis, en Suisse et en Russie, une vingtaine d'expériences ont mesuré, grâce à des détecteurs, la quantité de neutrinos émis par les réacteurs de centrales nucléaires lors de la désintégration des noyaux d'uranium.

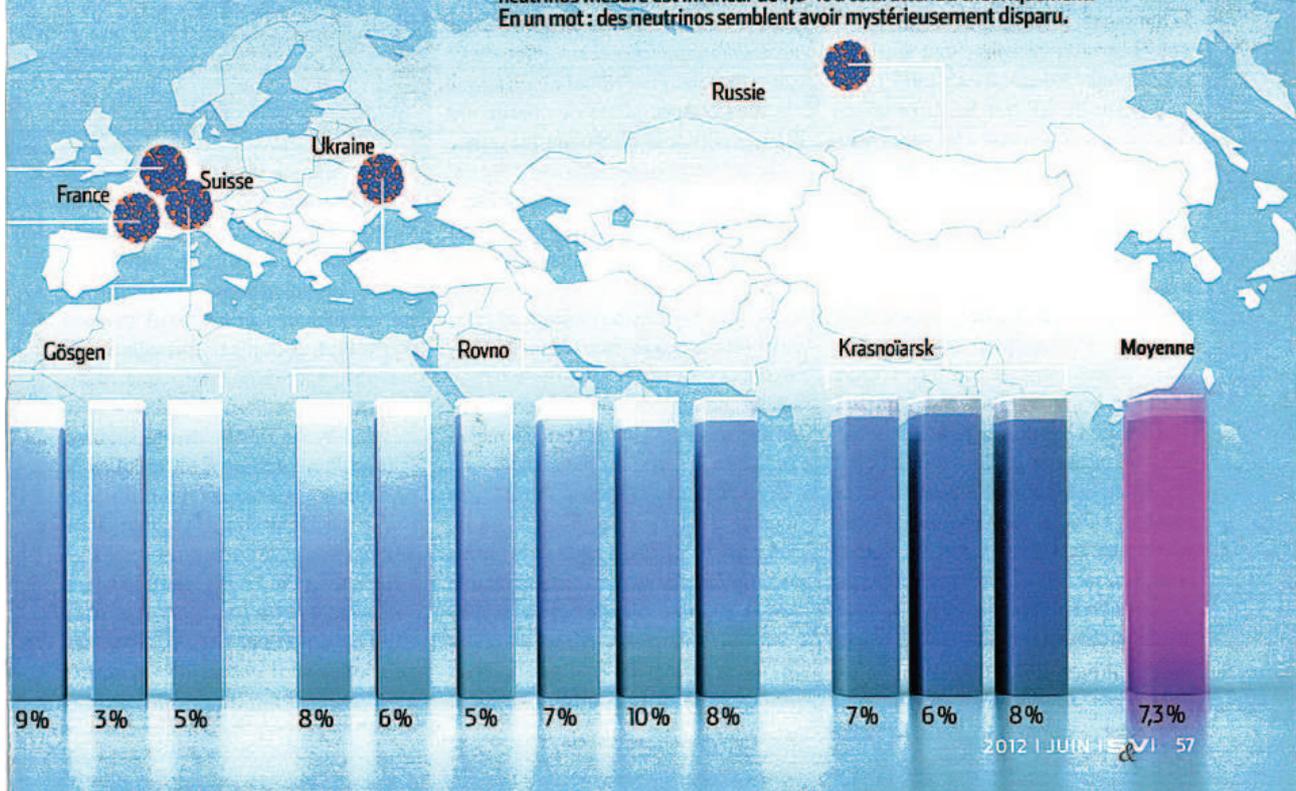




## Neutrinos : en théorie, ils devraient être plus nombreux

**2... mais, systématiquement, le nombre n'y est pas**

L'année dernière, le modèle théorique permettant de déduire le nombre de ces neutrinos à partir des données mesurées par les détecteurs a été recalculé avec une précision sans précédent. Résultat : le nombre de neutrinos mesuré est inférieur de 7,3 % à celui attendu théoriquement. En un mot : des neutrinos semblent avoir mystérieusement disparu.





À LA  
**UNE**

→ nucléaires avait alors été déduit de ces données. De quoi produire des "tables de calibration" qui permettent de déterminer le flux d'antineutrinos produit par n'importe quel réacteur nucléaire, dès lors que l'on a mesuré les propriétés des électrons qu'il émet.

A un détail près. "Techniquement, explique David Lhuillier, le passage des électrons aux neutrinos nécessite de connaître l'intégralité des voies possibles de désintégration des noyaux d'uranium et de plutonium. Or, il y en a une dizaine de milliers!" Un nombre tel que les physiciens de Grenoble avaient fondé leur calcul sur des approximations. "Pour Double Chooz, il nous fallait être plus précis", poursuit le scientifique. Avec ses collègues, il a donc affiné le calcul effectué à l'ILL il y a trente ans, en épluchant la dizaine de milliers d'événements possibles. Et

## LE DÉSORDRE EST BEL ET BIEN SEMÉ DANS TOUTE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

le constat est sans appel : une révision à la hausse de 3 % du flux d'antineutrinos électroniques censé être émis par un réacteur. A laquelle s'ajoute 1,5 % provenant du fait que la durée de vie du neutron a été revue à la baisse dans l'intervalle. Plus 1,5 % supplémentaire à cause d'imprécisions dans l'extrapolation des mesures de Grenoble aux réacteurs commerciaux. Soit, en tout, 6 % d'antineutrinos en plus. Les réacteurs nucléaires crachent finalement plus de "petits neutres" que prévu!

Les physiciens de Double Chooz ont alors eu l'idée d'estimer l'impact de ce nouvel étalonnage sur la vingtaine de mesures du flux d'antineutrinos faites directement à la sortie d'un réacteur entre les années 1980 et 1990 en France, aux Etats-Unis, en Suisse et en Russie. Or, si l'ensemble de ces mesures étaient en accord à 1 % près avec l'ancienne prédiction théorique, issue d'une approximation, elles ne le sont plus du tout avec la nouvelle,

censée être de meilleure qualité (voir infographie p. 57). "C'est comme si, en tout, 7 % des antineutrinos censés être produits par un réacteur avaient tout bonnement disparu", résume Thierry Lasserre. Le hasard a voulu que cette anomalie passe jusqu'ici inaperçue. Maintenant qu'elle est mise au jour, elle sème le désordre dans toute la physique des particules.

### 15 ANS DE DÉCOMPTES DÉFAILLANTS

La première idée qui s'impose est bien sûr que les calculs des physiciens français soient faux. Mais comme l'indique Carlo Giunti, à l'université de Turin (Italie), "tous les experts s'accordent à dire que le calcul effectué par David Lhuillier, Thierry Lasserre et leurs collaborateurs est le plus précis jamais réalisé en la matière. Et personne n'a pu y déceler la moindre erreur". Patrick

Huber, au Virginia Tech (Etats-Unis), est du même avis : "De nombreux facteurs conspirent au déplacement du flux d'antineutrinos atten-

du par rapport à ceux mesurés depuis trente ans. Nous sommes donc probablement face à un effet réel." Carlo Rubbia, prix Nobel de physique en 1984 et spécialiste des particules élémentaires, le confirme lui aussi : "L'écart est incontestablement significatif." Autre idée pour expliquer l'anomalie : invoquer la fameuse oscillation des neutrinos, les individus manquants ayant pu se transformer en route en un autre type. Là encore, l'argument tombe à l'eau : une telle transformation nécessite au minimum plusieurs centaines de mètres pour être observée; or, les flux des expériences ont été mesurés juste à la sortie du réacteur.

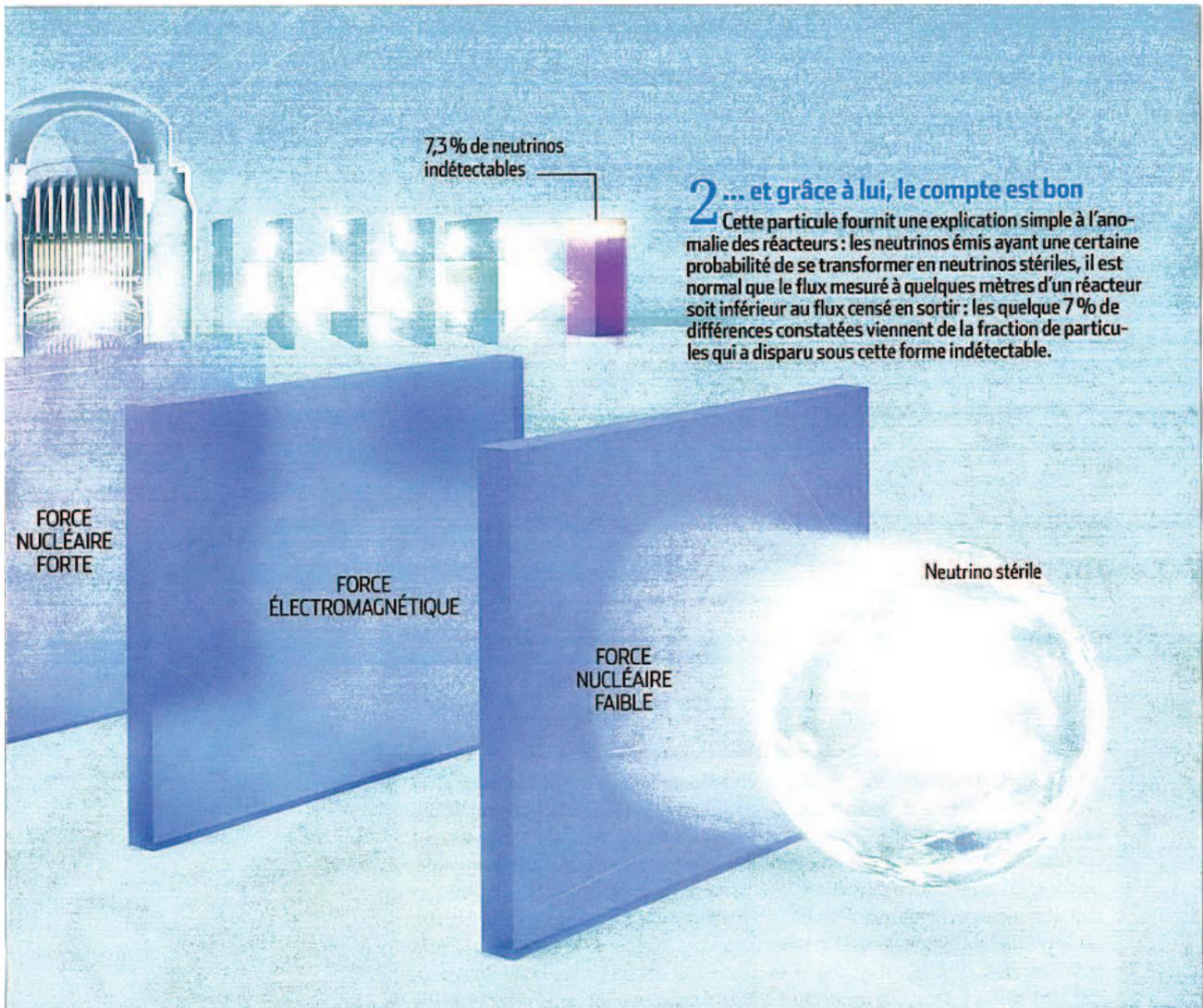
Il y a donc bel et bien un problème. Et celui-ci est d'autant plus pris au sérieux qu'il s'ajoute à plusieurs autres décomptes défallants constatés depuis quinze ans lors d'expériences impliquant des neutrinos. Ainsi, au cours de l'expérience LSND réalisée dans les années 1990 au Laboratoire national

## Neutrinos : un nouveau venu pourrait expliquer l'anomalie

**1** Un neutrino stérile, d'une absolue discrétion, est imaginé par les théoriciens...

Pour expliquer la disparition des neutrinos émis par les réacteurs nucléaires, les physiciens proposent d'ajouter un nouvel ingrédient à leur modèle : un neutrino dit stérile qui, à l'instar de ses cousins standard, n'interagit ni avec la force forte, ni avec l'électromagnétisme, mais qui, en plus, est insensible à la force faible. Une particule, en somme, parfaitement indétectable.

de Los Alamos (Etats-Unis), un excès d'antineutrinos électroniques issu d'un faisceau d'antineutrinos muoniques a été détecté. A la suite de cette observation, les scientifiques du Fermilab, près de Chicago, ont observé un excès équivalent, quoique moins significatif, lors de l'expérience MiniBoone. Enfin, durant la calibration d'expériences visant à détecter des neutrinos solaires, le flux de neutrinos électroniques issu d'une source radioactive artificielle s'est révélé inférieur à la valeur attendue, comme si, là encore, des neutrinos avaient disparu. Pour Thierry Lasserre, "ajoutées à celle que nous avons mise en évidence par hasard, toutes ces anomalies sont désormais prises très au sérieux. Il y a manifestement →



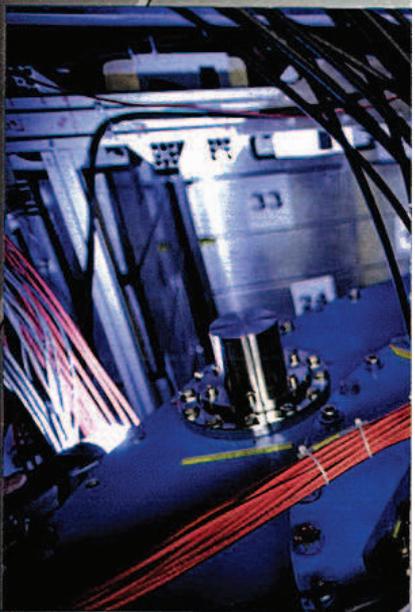
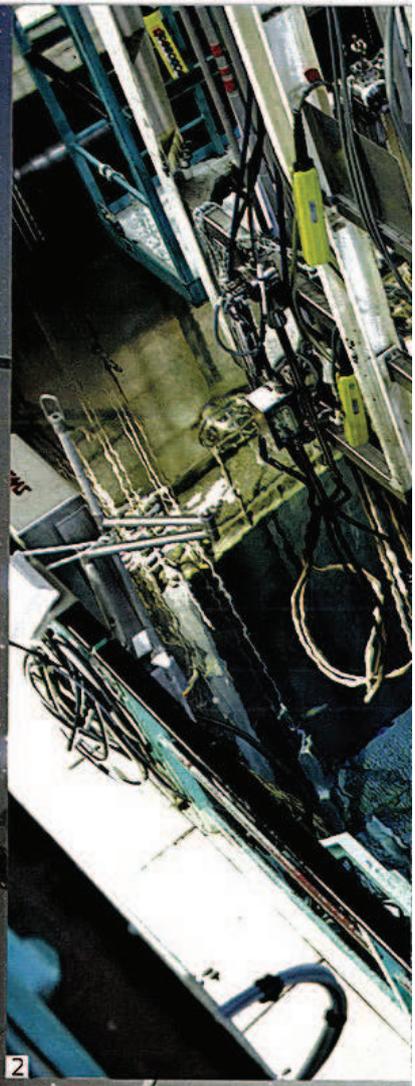
## 2... et grâce à lui, le compte est bon

Cette particule fournit une explication simple à l'anomalie des réacteurs : les neutrinos émis ayant une certaine probabilité de se transformer en neutrinos stériles, il est normal que le flux mesuré à quelques mètres d'un réacteur soit inférieur au flux censé en sortir : les quelque 7 % de différences constatées viennent de la fraction de particules qui a disparu sous cette forme indétectable.

## LA CHASSE AU BOSON DE HIGGS : UN SUCCÈS À LA FOIS IMMENSE... ET DÉCEVANT

Le Cern le promet : la découverte du boson de Higgs sera annoncée avant la fin de l'année. Elle marquera l'épilogue de près de 50 ans de traque, celle des particules élémentaires prédites par le modèle standard, l'actuelle théorie de l'infiniment petit. Avec ce succès expérimental, les physiciens pourront se targuer d'avoir démontré l'existence de la clé de voûte de l'édifice théorique le plus précis jamais rédigé : la particule qui confère leur masse à toutes les autres. Mais il est probable que l'euphorie ne soit pas totale. Car le Higgs risque d'être parfaitement conforme aux prédictions du modèle standard. C'est ce qui ressort de l'analyse la plus complète faite à ce jour

des données disponibles, mise en ligne le 19 mars dernier. Or, les physiciens le savent, le modèle standard ne peut être la fin de l'histoire. Et ils ont longtemps espéré que le Higgs leur permette de commencer à écrire le prochain chapitre. Rien n'est encore joué, et il n'est pas exclu que la particule manquante recèle quelques propriétés exotiques. Mais l'heure n'est pas à l'optimisme. Comme le résume Marco Cirelli, à la division théorique du Cern, "je pense que le LHC [l'accélérateur de particules du Cern] découvrira le Higgs. Et rien d'autre". Grandeur et possible misère de l'une des plus formidables quêtes scientifiques de tous les temps...



→ *quelque chose à comprendre* ". De quoi ces anomalies pourraient-elles être la manifestation? Les experts ne voient qu'une possibilité: une particule encore inconnue fausserait les comptes. Une particule qui, d'un côté, est le résultat de la mutation d'un neutrino standard, d'où leur disparition, et qui, de l'autre, est capable de se transformer en neutrino standard, ce qui expliquerait les excès constatés.

**LA PARTICULE FANTÔME PARFAITE**

Il s'agirait donc d'un neutrino d'une nouvelle espèce, encore plus discret que ses congénères puisqu'il n'a pas encore été détecté. "Toutes les explications invoquées pour interpréter ces anomalies requièrent l'existence de ce nouveau type de neutrino", confirme Carlo Giunti. Or, les théoriciens, peu avertis en spéculations, ont déjà croisé ce profil atypique lorsqu'ils imaginaient des particules au-delà du modèle standard. Ils l'ont baptisé le "neutrino stérile". Sa principale caractéristique: n'être sensible à aucune des trois interactions fondamentales du modèle standard. Comme les autres neutrinos, ce nouveau genre de

particule ne réagit pas à la force électromagnétique, ni à la force nucléaire forte. Mais lui, en plus, est également insensible à la force nucléaire faible. Zéro, zéro et zéro! La particule fantôme parfaite: elle n'interagit avec la matière que par le biais de la gravitation – non prise en compte dans le modèle standard car d'une intensité presque nulle à l'échelle des particules – et est donc parfaitement indétectable dans le cadre d'une expérience de physique microscopique (voir infographie p. 59).

Pourquoi avoir imaginé une chose à ce point évanescence? Pour de sombres histoires de famille. En particulier pour expliquer le mystérieux phénomène d'oscillation des neutrinos observé depuis quinze ans. Cela ne peut s'expliquer qu'à condition que les neutrinos aient une masse, aussi infime soit-elle. Ce que le modèle standard est incapable de prédire. Or, la seule façon, sur le papier, de conférer une masse aux neutrinos est d'introduire dans les équations un ou plusieurs neutrinos non standard – en l'occurrence, des neutrinos stériles. Ainsi, comme l'indique Goran Senjanovic, au Centre international Abdus-Salam de physique →

L.VILLERET/DOLCE VITA

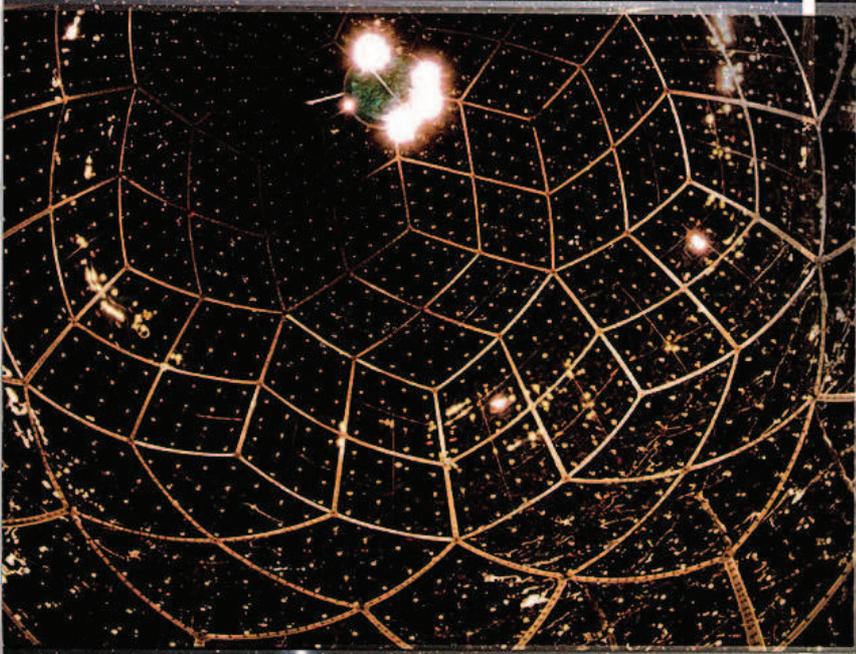


## PROJET NUCIFER : AU PLUS PRÈS DE LA RÉACTION NUCLÉAIRE

Imaginé en 2004, le projet Nucifer, mené par Thierry Lasserre et David Lhuillier (3) vient de démarrer auprès d'Osiris (2), le réacteur nucléaire du CEA, à Saclay. Son rôle : étudier les propriétés des neutrinos émis par un réacteur nucléaire, pour offrir à l'Agence internationale de l'énergie atomique de nouveaux outils de contrôle antiprolifération. Heureux hasard, cette expérience nécessite de placer un détecteur (1 et 4) à quelques mètres d'un cœur de réacteur. Ce qui n'a rien d'évident, étant donné que ce détecteur est rempli d'un liquide inflammable. Or, cette configuration permet d'étudier avec précision la mystérieuse disparition des neutrinos autour des réacteurs, et pourrait permettre de confirmer l'anomalie maintes fois constatée. De quoi faire de cette installation de physique appliquée une expérience à la pointe des questions les plus fondamentales !



À LA  
**UNE**



Les plus puissants engins expérimentaux vont être réquisitionnés pour traquer les neutrinos stériles, dont les accélérateurs du Cern, à Genève (à dr.), et le détecteur géant de l'expérience KamLAND, au Japon (ci-dessus).



**CARLO RUBBIA**  
PRIX NOBEL DE PHYSIQUE 1984

**Ces anomalies sont un sujet magnifique que seule une expérience peut désormais trancher**

→ théorique, à Trieste (Italie), "le problème de la masse des neutrinos est le meilleur argument en faveur de l'existence de neutrinos stériles". Et la mystérieuse disparition des neutrinos qui vient d'être constatée à la sortie des réacteurs nucléaires apporte un poids considérable à cette intuition.

L'heure de la consécration a-t-elle sonné pour la plus discrète de toutes les particules imaginables, cernée à la fois par la théorie et l'expérience? "Je suis prêt à parier sur elle, et à parier beaucoup!", lance Goran Senjanovic. Carlo Giunti, lui, considère qu'avec les nouvelles du boson de Higgs, les physiciens n'auront guère le choix: "Les neutrinos stériles seront peut-être la seule indication, voire preuve, d'une physique totalement nouvelle avant longtemps." Car l'impact d'une telle découverte ne se limiterait pas à la physique des neutrinos: elle ferait à elle seule exploser le modèle standard. Elle pourrait même avoir de vastes

conséquences cosmologiques. "Si on mettait en évidence un neutrino stérile, on aurait alors, après les trois neutrinos connus, la quatrième particule de matière la plus abondante de l'Univers!", décrit Thierry Lasserre. De quoi expliquer, peut-être, la mystérieuse masse manquante de l'Univers, ou l'énigmatique disparition de l'antimatière (voir encadrés p. 65 et 67).

Reste à démontrer expérimentalement l'existence de cette particule potentiellement révolutionnaire. Un défi à la hauteur de la discrétion de l'intéressée. Les physiciens comptent cependant sur le phénomène d'oscillation, valable pour tout type de neutrino: le neutrino stérile pourrait être démasqué par une alternance d'apparitions et de disparitions de neutrinos standard. Pour l'heure, c'est vers le projet Nucifer que les yeux sont tournés. Cette expérience, imaginée en 2004 dans le cadre de la lutte contre la prolifération nucléaire, est exploitée depuis



quelques semaines par David Lhuillier et Thierry Lasserre pour étudier d'éventuelles mues de stériles au plus près de la réaction nucléaire (voir p. 61). "Nu-cifer pourrait nous apporter, peut-être d'ici un an, de nouveaux points de mesure", explique ce dernier.

**TOUTE LA COMMUNAUTÉ MOBILISÉE**

Mais la traque ne fait que commencer. Une quinzaine d'autres projets expérimentaux susceptibles de débusquer ces neutrinos stériles ont été présentés il y a quelques semaines dans un "livre blanc" rédigé par la communauté des spécialistes des neutrinos. Thierry Lasserre et ses collègues ont proposé de placer une intense source radioactive dans un détecteur géant de neutrinos, afin d'observer mètre par mètre les apparitions et disparitions des particules au gré de leurs oscillations avec un stérile. "Nous travaillons conjointement avec les physiciens de l'expérience KamLAND [au Japon] sur un possible

déploiement autour de 2016", précise le physicien, impatient d'exploiter le plus puissant détecteur de neutrinos au monde. Egalement dans les *starting-blocks*, Carlo Rubbia, célèbre pour avoir porté l'expérience ayant découvert les particules médiatrices de l'interaction faible, au début des années 1980, à une époque où l'existence de ces particules était loin de faire consensus parmi les physiciens. Un candidat de poids dans la course à la découverte des stériles, interprété comme un signe fort par toute la communauté. Le scientifique italien envisage de travailler avec un faisceau de neutrinos produit au Cern: "Les anomalies de neutrinos sont un sujet magnifique que seule une expérience peut désormais trancher!"

Ironie de l'histoire: ce sera donc peut-être dans le grand temple de la physique des particules, aujourd'hui entièrement dédié au boson de Higgs, que les physiciens consacreront la grande révolution des neutrinos...

**UNE TRAQUE LONGUE ET TORTUEUSE**

**1930** Wolfgang Pauli (photo) invente le neutrino, seul moyen de sauver le principe de conservation de l'énergie.



**1957** Chien-Shiung Wu observe que les neutrinos n'existent

que dans un seul état de rotation interne, à l'inverse de toutes les autres particules. Leur masse doit donc être nulle.

**1969** Raymond Davis constate que 30 % de neutrinos manquent dans le flux en provenance du Soleil.

**1998** Les physiciens de l'observatoire Super-Kamiokande (Japon) démontrent l'oscillation des neutrinos, ce qui referme la controverse des neutrinos solaires mais implique que ces derniers ont une masse.

**2011** Les physiciens de l'expérience Opera (photo) mesurent des neutrinos plus rapides que la lumière, avant de reconnaître, 6 mois plus tard, une erreur expérimentale.



KAMLAND - PALLARDI/REA - CERN - S. LUCAS/MSB - J. G. BORDIERE