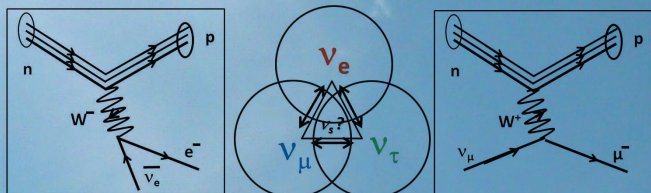


## La valse des neutrinos

♦ **Courants d'écrantages** dans les bobines **supraconductrices** HTS ReBCo (p. 2-3).

Dossier – Les neutrinos, expériences et analyses à l'Irfu

- ♦ **Les oscillations des neutrinos** : une ouverture vers la nouvelle physique (p. 4-5)
- ♦ À la recherche du **quatrième neutrino** (p. 6)
- ♦ L'expérience **T2K** sur la piste de l'**asymétrie matière-antimatière** (p.7)
- ♦ Les neutrinos auprès des **accélérateurs**, modélisation des **interactions neutrinos-noyau** (p.8-9)
- ♦ **Stereo**, à la recherche de **neutrinos stériles** auprès du réacteur de l'ILL (p.10)
- ♦ Source **CeSOX**, des **neutrinos stériles** à prendre au cérium (p.11)
- ♦ Des neutrinos, des noyaux et des hommes (p. 12)



Les activités de l'Irfu oscillent entre trois saveurs de physique : ingénierie en aimants et accélérateurs, détection des signaux et analyses des expériences. Ce numéro en présente les exemples : dans le cas des aimants, avec le combat mené pour surmonter les contraintes techniques liées aux courants d'écrantage dans les bobines, et dans le domaine de la physique des neutrinos, à travers le dossier sur les expériences en cours ou en projet à l'Irfu. Après la proposition d'une nouvelle particule par Wolfgang Pauli en 1930, la physique des neutrinos a débuté comme une aventure italienne, celle du « neutrino-petit neutron », baptisé par Edoardo Amaldi, puis théorisé par Enrico Fermi en 1933, pour expliquer les observations du rayonnement bêta. L'histoire a été jalonnée de découvertes majeures – preuve d'existence du neutrino en 1956, oscillations en 1998 – qui ont confirmé les théories de Pauli et de Fermi. Deux physiciens plus furtifs ont aussi laissé leurs noms à la physique à travers la particule de Majorana, et la matrice PMNS (voir p.12), transcription des oscillations de neutrinos que Pontecorvo postulait dès 1957. La valse des neutrinos-antineutrinos se poursuit pour l'instant à trois familles. Elle se danse dans les accélérateurs ou auprès des réacteurs nucléaires, pour mesurer les caractéristiques des neutrinos et de leurs oscillations, avec des aires expérimentales à l'échelle des pays (Cern-Gran Sasso ; T2K au Japon, Fermilab aux Etats-Unis).

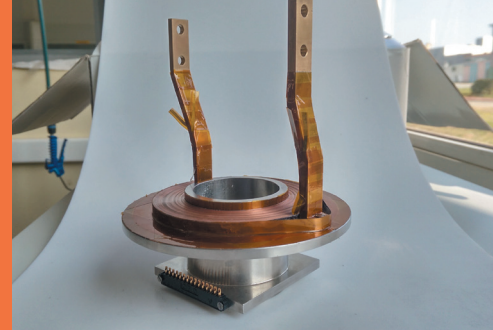
Ce numéro présente quelques pistes explorées par les physiciens de l'Irfu : l'interprétation des mesures de T2K en incluant les effets cruciaux des corrélations nucléaires, les études de l'asymétrie matière-antimatière à travers les analyses des expériences de T2K, les évaluations des différences de masse des neutrinos et la recherche d'une 4<sup>e</sup> famille de neutrinos, avec Stereo et CeSOX. Les résultats pourraient conduire à des conceptions nouvelles de la théorie des particules, prolongeant ainsi les rêves des fondateurs de la physique des neutrinos.

Valérie Lapoux



# Les courants d'écrantage dans les ReBCO, des voisins encombrants !

Par Guillaume Dilasser (SACM)



**L**es supraconducteurs à haute-température critique de la famille des ReBCO ont élargi les possibilités en matière de conception d'aimants, notamment en permettant d'atteindre des intensités de champ inédites. Néanmoins, ces matériaux prometteurs présentent encore des inconvénients limitant leurs applications, parmi lesquels on trouve le problème des courants d'écrantage. Des travaux sont menés au SACM dans le cadre de ma thèse (2014-2017) afin de trouver comment se débarrasser de ces voisins encombrants ou, au pire, à apprendre à vivre avec !

Les supraconducteurs à haute température critique de la famille des ReBCO<sup>1</sup> sont des matériaux prometteurs pour les futurs équipements devant générer du champ magnétique. Leur première qualité est de rester supraconducteurs à des températures bien plus élevées que les matériaux couramment utilisés. En comparaison, le Niobium-Titane et le Niobium-Etain répandus dans les applications actuelles demandent à être refroidis respectivement au-dessous de 9 K et 18 K, sans champ. Les composés ReBCO peuvent fonctionner jusqu'à 93 K. Ce gain permet notamment de concevoir des aimants dont le refroidissement ne nécessite plus d'hélium liquide, très coûteux. De plus, la supraconductivité dans les ReBCO résiste mieux à la présence du champ magnétique que dans les précédents matériaux.

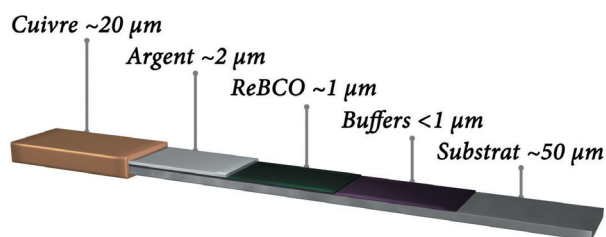


Figure 1 - Structure d'un ruban ReBCO.

Ainsi, ils permettent de construire des aimants capables de générer des champs magnétiques plus intenses que jamais : un prototype tout-ReBCO fabriqué par Sunam<sup>2</sup> détient un record avec un champ central de 26 teslas.

Bien que la production industrielle de ReBCO ait atteint une certaine maturité, ce matériau conserve des défauts qui limitent ses utilisations. En particulier, c'est le cas des courants d'écrantage. Comment sont-ils produits et comment en limiter les effets ? Les procédés de fabrication actuels sont basés sur la croissance successive de couches cristallines sur un substrat.

Cette méthode ne permet de produire que des rubans, larges de quelques millimètres et épais d'une centaine de micromètres au total, mais avec une couche supraconductrice ne mesurant qu'un micromètre d'épaisseur environ (Fig. 1).

Tout champ magnétique variable ayant une composante normale à la surface du ruban génère alors des courants qui se rebouclent dans la largeur du supraconducteur. Ces courants sont appelés courants d'écrantage parce qu'ils s'opposent à la traversée du champ initial. Ils persistent indéfiniment dans le matériau qui ne crée aucune dissipation. En pratique, dans les aimants ReBCO, les courants d'écrantage génèrent des dégradations de la qualité spatiale et de la stabilité temporelle du champ généré.

Le sujet de ma thèse porte sur l'étude de ce problème, afin de faciliter l'emploi des ReBCO dans les projets d'aimants pour la génération de champs intenses. Elle s'oriente selon deux directions qui sont le développement de moyens de simulations pour anticiper ces effets lors de la conception de nouveaux systèmes, et la recherche de parades, pour supprimer les courants d'écrantage d'aimants déjà existants.

Avant de développer mon modèle numérique, j'ai commencé par préparer une expérience (le bandeau en haut à droite, p. 3, présente une vue de l'aire expérimentale). Mes travaux en première année de thèse ont ainsi consisté à développer une petite bobine supraconductrice instrumentée (voir la Fig. 2 pour le dispositif), puis à la tester de manière à mesurer l'impact des courants d'écrantage sur son champ magnétique total.

Cela a permis de constater une relaxation logarithmique en temps de la perturbation sur le champ, ayant pour origine la lente redistribution de la densité de courant dans la largeur du matériau supraconducteur (Fig. 3). En faisant varier les paramètres, j'ai constitué une base de résultats expérimentaux qui ont servi de cas de validation pour le modèle numérique.

<sup>1</sup> Les « ReBCO » sont une famille de céramiques supraconductrices de compositions chimiques voisines comprenant du baryum (B), du cuivre (C), de l'oxygène (O) et une ou plusieurs terres rares (Re pour « rare earth » en anglais).

<sup>2</sup> Sunam Co., Ltd. est un fabricant coréen de rubans supraconducteurs ReBCO.

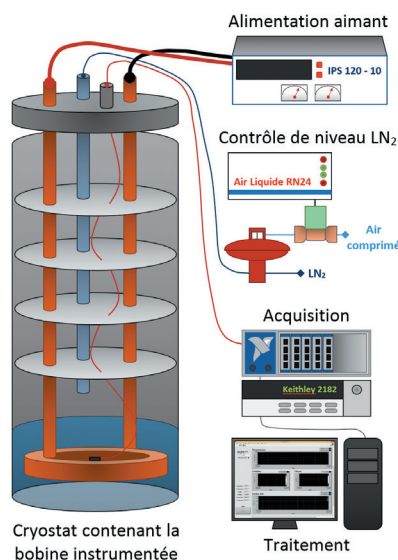
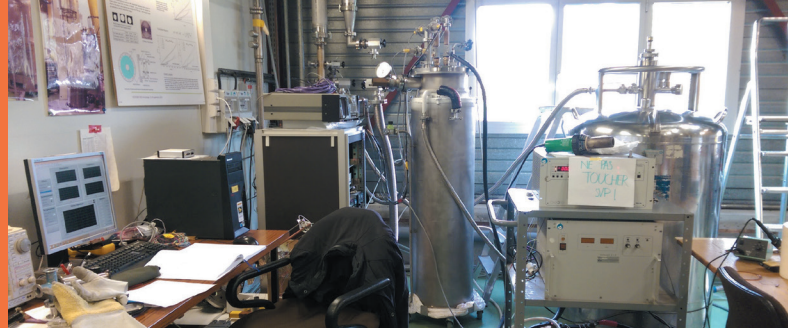
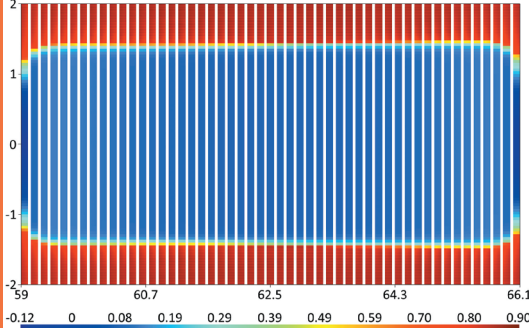


Figure 2. Schéma de principe de l'expérience de mesure des courants d'écrantage dans une bobine ReBCO.

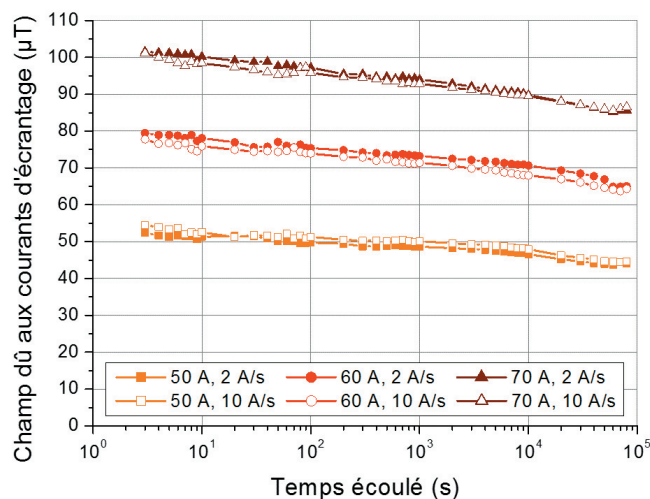


Figure 3. Décroissance mesurée du champ magnétique rémanent d'une bobine ReBCO après un cycle de charge-décharge.

Le développement du code s'est ensuite basé sur des logiciels *open-source* et gratuits permettant de faire du calcul par éléments finis : Gmsh et GetDP<sup>3</sup>. La difficulté pour simuler ce problème vient de la description du comportement du supraconducteur : dans les ReBCO, le champ électrique dépend de la densité de courant locale élevée à des puissances pouvant atteindre 20 ou 30 ! Les algorithmes de résolution ont donc besoin d'être très robustes.

Au final, le modèle numérique actuel permet de retrouver en partie les données expérimentales et a été comparé avec Comsol Multiphysics. Actuellement, le but est d'améliorer la précision des résultats et de réduire les temps de calculs.

Enfin, pour proposer une parade aux courants d'écrantage, je mets actuellement en œuvre la technique du « *vortex shaking* ». Il s'agit de forcer la relaxation des courants d'écrantage dans le supraconducteur en lui appliquant un champ magnétique alternatif de faible amplitude, quelques centaines de milliteslas. Cette technique n'est pas la seule piste existante mais elle a l'avantage de ne demander aucune altération du ruban supraconducteur. Dans certains cas, elle est même simple à mettre en œuvre, comme dans celui des aimants hybrides où un insert ReBCO est utilisé à l'intérieur du champ de fond généré par un autre aimant, car celui-ci peut alors aussi produire le champ de *shaking*. Pour valider la faisabilité, une expérience à petite échelle est en cours d'assemblage avec un solénoïde de *shaking* en cuivre servant à supprimer les courants d'écrantage dans une bobinette ReBCO (voir la photo du bandeau p.2) refroidie par un bain d'azote liquide. Si tout se passe bien, le *vortex shaking* permettra de dissiper l'effet des courants d'écrantage en quelques dizaines de secondes seulement.

Avec l'exploitation de la nouvelle expérience et la mise au point du modèle, 2017 s'annonce comme une dernière année de thèse prometteuse. Les résultats de cette thèse pourront être introduits dans les futurs aimants ReBCO conçus par le SACM, comme l'insert Nougat<sup>4</sup> pour le LNCMI de Grenoble par exemple.

<sup>3</sup> Gmsh, GetDP (logiciels libres) et Comsol Multiphysics (logiciel propriétaire) sont des logiciels de simulations numériques par éléments finis. Gmsh (gmsh.info) et GetDP (getdp.info) sont développés par l'Université de Liège ; Comsol Multiphysics ([www.comsol.fr](http://www.comsol.fr)) par Comsol. La figure du bandeau (p.3, en haut à gauche) présente la simulation de la densité de courant dans la bobine d'essais pour les mesures de champ d'écrantage après une rampe de courant de 0 à 30 A.

<sup>4</sup> Nougat (NOuvelle Génération d'Aimant supraconducteur pour la production de Teslas avec une consommation électrique réduite), est un projet (financé par l'Agence Nationale pour la Recherche à partir de 2014) impliquant le SACM dans la conception et la fabrication d'un insert REBCO pour un aimant haut-champ qui sera installé au Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) de Grenoble.



## Les oscillations des neutrinos : une ouverture vers la nouvelle physique

Par Marco Zito (SPP)

L'étude des neutrinos, particules élémentaires de charge nulle, a été à l'origine de nombreuses avancées fondamentales. En 2015, le prix Nobel de Physique a été attribué à Arthur McDonald, porte-parole de la collaboration SNO<sup>9</sup> (observatoire des neutrinos solaires de Sudbury au Canada) et à Takaaki Kajita, porte-parole de la collaboration Super-Kamiokande<sup>9</sup> au Japon, pour la découverte des oscillations des neutrinos.

En 2016, des collaborations internationales travaillant sur ce sujet, en particulier les équipes de T2K<sup>9</sup>, dont celle de l'Irfu, ont été récompensées par le prestigieux prix *Breakthrough* pour leurs avancées dans ce domaine.

L'intérêt pour ces découvertes peut se comprendre facilement : les oscillations des neutrinos démontrent que ces particules ont une masse non nulle, dont l'origine est à ce jour inconnue. Cette masse est très faible, inférieure de six ordres de grandeur à celle des particules qui forment la matière, ce qui constitue une énigme en soi. Elle pourrait être liée à des phénomènes au-delà du modèle standard de la physique des particules. L'étude de cette particule pourrait donc nous mettre sur la bonne piste pour élaborer une nouvelle théorie encore plus puissante. Les équipes de l'Irfu ont joué un rôle de premier plan dans ces études depuis plusieurs décennies. Rappelons que la chambre à bulles Gargamelle (aujourd'hui sur une pelouse du Cern, dans le jardin du musée du *Microcosm*) a été construite en 1971 dans les ateliers de l'accélérateur Saturne du CEA à Saclay. Elle a permis de découvrir les courants neutres, des interactions faibles impliquant notamment les neutrinos et faisant intervenir la particule Z<sup>0</sup>.

Mais revenons aux oscillations. A l'origine de cette découverte, il y a une série de mesures des neutrinos solaires. Le cœur de notre astre est en effet le siège de réactions de fusion nucléaire qui sont à l'origine de sa production d'énergie. À partir de 1968, les premières mesures de ces neutrinos dans le laboratoire souterrain *Homestake* aux Etats-Unis ont montré qu'il y avait un déficit par rapport à la valeur attendue : l'hypothèse des oscillations de ces particules (voir encadré) a été proposée pour l'expliquer, mais la preuve de ce phénomène ne fut obtenue qu'après une longue série d'études.

Dans les années 1980-1990, l'Irfu a participé à trois expériences importantes, toutes dédiées à la recherche des oscillations des neutrinos : l'expérience *Bugey*<sup>9</sup>, auprès de la centrale nucléaire du même nom, a étudié les antineutrinos émis par ce réacteur et constitue encore aujourd'hui une référence dans le domaine. L'expérience radiochimique *Galex*<sup>9</sup> au Gran Sasso (Italie) a confirmé le déficit des neutrinos solaires en mesurant ceux émis dans les réactions de fusion entre deux protons pour former un noyau de deutérium. L'expérience *Nomad*<sup>9</sup> au Cern a cherché des oscillations à courte distance avec des neutrinos produits par un accélérateur.

La découverte des oscillations des neutrinos, en 1998-2001, a constitué un tournant décisif. De nombreuses expériences ont vu le jour afin de mesurer avec précision les paramètres qui caractérisent ce phénomène et en particulier l'angle de mélange  $\theta_{13}$ , à l'époque encore inconnu. L'expérience Tokai to Kamioka (T2K<sup>9</sup>, voir p.7) au Japon utilise pour cela un faisceau de neutrinos muoniques dirigés vers le détecteur souterrain Super-Kamiokande (photo au centre du bandeau p.5), situé à 295 km de distance. En 2011, pour la première fois, T2K a fourni des indications que l'angle  $\theta_{13}$  n'est pas nul, puis, en 2013, T2K a découvert l'apparition de neutrinos électroniques (le bandeau p.5, à gauche, présente une image des signaux mesurés). Ensuite, des expériences auprès des réacteurs nucléaires, comme Double Chooz<sup>9</sup>, ont effectué des mesures de précision de ce même angle. Soulignons le fait que l'Irfu a apporté une contribution importante dans ces deux expériences, notamment par une participation de premier plan à la construction des détecteurs et dans les analyses des données<sup>1</sup>.

À ce jour, de nombreuses questions fondamentales restent ouvertes dans ce domaine. Si les oscillations ont été établies sur une base très solide pour ce qui est des trois neutrinos connus, certaines anomalies expérimentales pourraient indiquer l'existence d'un quatrième type de neutrino (p. 6 de ce dossier) avec une masse proche de 1 eV/c<sup>2</sup>. L'expérience Stereo<sup>9</sup> (p. 10) auprès du réacteur de recherche ILL à Grenoble, et l'expérience CeSOX<sup>9</sup> (p. 11) avec une source intense d'antineutrinos, qui sera déployée près du détecteur Borexino au laboratoire du Gran Sasso, ont pour objectifs d'éclaircir la question.

### Les oscillations des neutrinos

Le neutrino électronique ( $\nu_e$ ) est le partenaire pour l'interaction faible de l'électron. Les partenaires du muon et du tau, des cousins de l'électron, sont respectivement les neutrinos muonique ( $\nu_\mu$ ) et tauonique ( $\nu_\tau$ ). Selon la mécanique quantique,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$  sont représentés chacun par une superposition différente de trois ondes, correspondant aux trois neutrinos de masse définie ( $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $\nu_3$ ). Chaque onde possède une fréquence différente, proportionnelle à cette masse. Dans la propagation des neutrinos, il se produit un déphasage entre ces ondes, et donc des phénomènes d'interférence. Ainsi, un neutrino de type  $\nu_\mu$  peut disparaître au cours de sa propagation et un neutrino d'un autre type peut apparaître. Ces phénomènes sont caractérisés par une longueur d'oscillation, qui dépend de l'énergie du neutrino et de la différence entre les carrés des masses de  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  et  $\nu_3$ . La relation entre ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$ ) et ( $\nu_1$ ,  $\nu_2$  et  $\nu_3$ ) est décrite par une matrice de rotation, caractérisée par trois angles  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$  et  $\theta_{13}$ , dits angles de mélange.

<sup>1</sup> Voir les articles sur les analyses des données Double Chooz et T2K dans le numéro 93 de Scintillations, p.2-3.

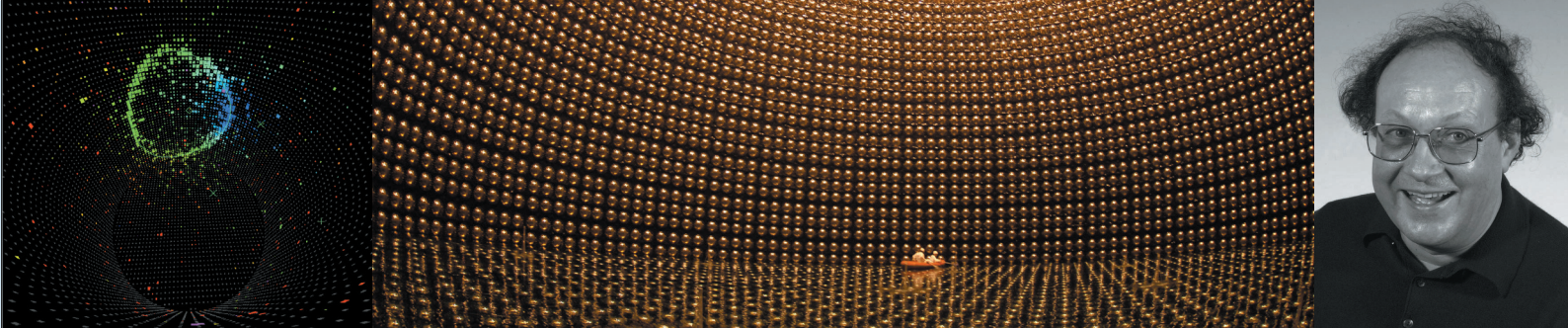
<sup>9</sup> Glossaire des expériences et liens (suite du glossaire en note de la page 5) :

+ Détecteurs de grand volume dans des laboratoires souterrains (domaine des oscillations)

- **Galex** : Gallium Experiment, détection de neutrinos solaires au Gran Sasso en Italie (1991-1997).

- **Kamiokande**, *Kamioka Neutron Decay Experiment* et **Super-K** (1996) au laboratoire souterrain Kamioka, au Japon avec des détecteurs **Tcherenkov** à eau. Les découvertes de ce laboratoire ont été récompensées par deux prix Nobel : en 2002, pour l'observation de neutrinos cosmiques (M. Koshiba) ; en 2015, pour la découverte des oscillations (T. Kajita). **Hyper K** : projet de détecteur d'une mégatonne (observations en 2025). **KamLAND** : *Kamioka Liquid scintillator AntiNeutrino Detector* (2002).

- **SNO Sudbury Neutrino Observatory**, Observatoire souterrain des neutrinos à Sudbury (Canada) créé en 1999 pour observer les oscillations des neutrinos solaires.



Le neutrino est la seule particule élémentaire de spin  $\frac{1}{2}$  dépourvue de charge électrique. Il pourrait ainsi avoir une nature différente des autres particules de la matière et être identique à sa propre anti-particule : on parle alors de **neutrino de Majorana**. Dans ce cas aurait lieu une désintégration bêta très rare, avec production de deux électrons et d'aucun neutrino, qui fait l'objet de nombreuses recherches, avec en perspective la participation de différentes équipes de l'Irfu.

Les oscillations des neutrinos permettent de mesurer avec précision les différences de leurs masses au carré. Néanmoins, leurs masses absolues restent inconnues. Puisque le neutrino est la particule la plus abondante dans l'univers après le photon, il a joué un rôle important dans son évolution. C'est en étudiant la structure de l'univers à plusieurs échelles qu'on pourra peut-être déterminer cette masse avec les données de Planck<sup>9</sup>, BOSS<sup>9</sup> et d'autres expériences.

Finalement, des questions fondamentales peuvent trouver une réponse en étudiant la propagation des neutrinos sur de longues distances. L'expérience T2K a déjà fourni la meilleure mesure de l'angle de mélange  $\theta_{23}$ . Récemment, la collaboration T2K a publié la première mesure obtenue en comparant la propagation des neutrinos et celle des antineutrinos (voir p. 7). Elle a ainsi fourni une première indication d'une nouvelle source de violation de la symétrie charge-parité (CP). Celle-ci pourrait éclairer l'origine de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'univers. Ces indications nécessitant une confirmation, de nombreux projets sont à l'étude ou en construction. T2K prévoit une extension de la prise de données jusqu'en 2026, avec un détecteur proche plus performant. Dans la prochaine décennie, les expériences DUNE<sup>9</sup> et Hyper-Kamiokande<sup>9</sup> donneront des mesures de précision de cette asymétrie.

La mise en évidence des oscillations des neutrinos a ainsi ouvert une nouvelle voie pour comprendre la nature profonde de la matière et l'évolution de l'univers. Les prochaines expériences nous apporteront sans doute une nouvelle moisson de résultats et de découvertes.

Pour en savoir plus :

- M.Zito, *Dans le tourbillon des particules*, éd. Belin Essais.
- S. Lavignac et M. Zito, *Les neutrinos n'ont pas livré tous leurs secrets*, Reflets phys. N°50 (2016) 4-9 ;
- DOI : <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/201650004> .

## Les Neutrinos au CEA, par Michel Cribier (SPP)

L'étude des neutrinos au CEA s'inscrit dans une longue tradition, mais très récemment un épisode a repoussé encore plus loin l'origine de cette tradition. En effet, le livre\* de Franck Close *Le Mystère Pontecorvo*, passionnant à bien des égards, révèle un épisode jusque-là inconnu qui concerne la détection des neutrinos du Soleil en utilisant la transmutation d'atomes de Chlore-37 en Argon-37.

Jusqu'alors la paternité de cette idée était attribuée à Bruno Pontecorvo, mais dans une note manuscrite du physicien italien lui-même, il écrit : « d'après Jules Guéron le meilleur composé pour la détection par irradiation des neutrinos devrait être le  $C_2Cl_4$  ». C'est bien en utilisant 600 tonnes de ce produit détachant, le perchlo que Ray Davis fera son expérience qui lui vaudra le prix Nobel en 2002. Or Jules Guéron (1907-1990), chimiste nucléaire français, fut aussi le premier directeur du centre de Saclay en 1951.

Bien plus tard, les physiciens des particules de Saclay utiliseront les neutrinos produits en abondance dans les faisceaux au Cern pour sonder la matière (expériences CDHS<sup>9</sup>, BEBC<sup>9</sup>), puis se tourneront vers les réacteurs du Bugey pour les premières recherches d'oscillations, elles-mêmes poursuivies par Nomad<sup>9</sup>. Ils prendront part à la saga des neutrinos solaires avec Gallex<sup>9</sup>.

Parallèlement, le rôle des neutrinos en astrophysique (explosion de supernovæ) et en cosmologie a été de mieux en mieux établi. L'apport de la physique nucléaire dans la compréhension des mécanismes d'interaction des neutrinos est essentiel. Aujourd'hui, c'est son rôle sociétal que l'on entrevoit dans des applications de contrôles d'installations nucléaires (Nucifer<sup>9</sup>).

*Ainsi, cette particule si peu interactive crée un lien très fort entre les services de l'Irfu.*

\* livre de F. Close aux éditions Flammarion (2016). Voir aussi la vidéo du « colloque de l'Orme » (CEA, Saclay) donné par F. Close : <http://ceasciences.fr/Phocea/Video/index.php?id=177>

+ Expériences auprès d'accélérateurs avec des faisceaux de neutrinos (dates de début, ou projets)

- au Cern, expériences avec **Gargamelle** pour tester le modèle standard : mise en évidence des courants neutres faibles (1973) ; **CDHS** (années 70, accélérateurs SPS) ; études avec le grand collisionneur électron-positron (LEP) sur les trois types de neutrinos légers (années 90).

- mesures à courte distance (932m, au Cern) **BEBC** : *Big European Bubble Chamber* (1973).

- mesures des oscillations à grande distance (732 km) entre le Cern (faisceau  $\nu_\mu$ ) et le laboratoire italien du Gran Sasso (détection des  $\nu_\mu$ ), expériences avec le détecteur **Opera** (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus, 2006). - **Nomad** : *Neutrino Oscillation MAgnetic Detector*, au Cern (1995-1998).

- **T2K** : Tokai to Kamioka, au Japon (p. 7, p.8-9). Mesures entre l'accélérateur J-PARC (*Japan Proton Accelerator Research Complex*, protons, 4MW) et Super-K.

<http://t2kexperiment.org/>.

- **LSND** : *Liquid Scintillator Neutrino Detector* (1997), au laboratoire américain de Los Alamos.- expérience **MiniBooNE**, *Booster Neutrino Experiment* (2002) détecteur à Fermilab (Etats-Unis). - **Minos** : *Main Injector Neutrino Oscillation Search* (2005), mesures avec un détecteur lointain, à 735 km du Fermilab. - **DUNE** : *Deep Neutrinos Underground Experiment* (Fermilab – Sanford, 1300 km, en projet).

+ Mesures cosmologiques (limites sur la somme des masses des neutrinos) avec le satellite **Planck** ; études avec le télescope **BOSS** : *Baryon Oscillation Spectroscopic Survey* (2009, Apache Point Observatory).

+ Expériences auprès des réacteurs nucléaires (exploration de l'angle de mélange  $\theta_{13}$ ) : - **Bugey**, réacteur de la centrale homonyme (exp. 1989) ; - **Double Chooz** (1996) en France ; - détecteur d'antineutrinos **Daya Bay** (2012) en Chine et Reno en Corée ; - **Nucifer** : études des oscillations de neutrinos auprès du réacteur d'Osiris, à Saclay (2013) ; - **Stereo** : recherche de neutrinos stériles auprès de l'ILL à Grenoble (p. 6, p. 10) ; - **NEOS** : *Neutrino Experiment for Oscillation at Short baseline*, pour explorer les neutrinos stériles. + Expérience avec une source radioactive, **CeSOX** : *Cerium Antineutrino Generator*, au Gran Sasso (p.6, p. 11).



# Les neutrinos à l'Irfu

## À la recherche du quatrième neutrino

Par Thierry Lasserre (SPP) et Thomas Materna (SPhN)



**S**uite à la découverte d'un déficit significatif dans le nombre d'antineutrinos détectés à courte distance des réacteurs nucléaires, l'Irfu s'est engagé dans deux projets, CeSOX et Stereo, pour confirmer la possibilité d'une oscillation vers un quatrième état stérile du neutrino.

6  
N° 96 - DÉCEMBRE 2016

L'hypothèse d'un neutrino stérile, insensible aux trois interactions forte, faible et électromagnétique, a été postulée pour expliquer une accumulation d'anomalies observées sur différentes expériences, auprès d'accélérateurs (LSND<sup>9</sup>, MiniBooNe<sup>9</sup>), dans la calibration de détecteurs avec des sources (Gallex<sup>9</sup>) ou encore à courte distance de réacteurs nucléaires. La dernière anomalie, qui découle d'un travail de réévaluation<sup>1</sup> (par les équipes du SPP et du SPhN) d'anciennes données mesurées auprès de plusieurs réacteurs avec différents détecteurs, a été significative et est à l'origine d'un élan à l'échelle mondiale pour confirmer ou réfuter l'existence d'un neutrino stérile léger<sup>1</sup>. Les réacteurs produisent une énorme quantité d'antineutrinos électroniques suite à la désintégration  $\beta$  des fragments de fission. Mais le nombre d'antineutrinos détectés est plus faible que le nombre prédit, de 7,3 % en moyenne (le ratio est de  $0,927 \pm 0,023$ , soit une déviation de  $3\sigma$ ).

L'explication de cette anomalie - mise en évidence par l'Irfu, puis confirmée par d'autres instituts - serait qu'une partie des antineutrinos disparaît en oscillant vers un état stérile, indétectable par les détecteurs en place. Cette oscillation dépend de la distance parcourue par les antineutrinos et de leur énergie. L'effet maximal (aux énergies caractéristiques des antineutrinos de réacteur) aurait lieu après un parcours de quelques mètres. À plus grande distance, l'oscillation serait moyennée mais continuerait à se manifester par un déficit quasi constant<sup>1</sup>.

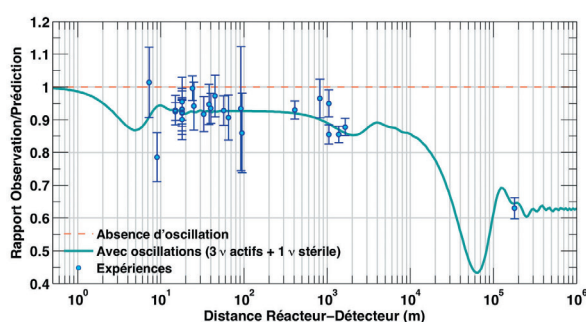


Figure 1 : Taux d'antineutrinos en fonction de leur parcours. Le premier creux dans la courbe (~5 m) correspond à l'« anomalie réacteur » et serait dû à une oscillation vers un état stérile. Les deux suivants (~2 km et ~60 km) sont reliés aux oscillations déjà connues (anomalies atmosphérique et solaire).

Pour arriver à cette conclusion, il faut se rappeler que les antineutrinos que l'on détecte sont en fait une superposition de trois états de masse qui se déphasent lors de leur parcours entre la source et le détecteur, du fait de vitesses différentes, créant ainsi des oscillations dans le taux de antineutrinos observés.

Ces oscillations sont connues (voir encadré p. 4) et interviennent à grande distance (p. 7). Si le déficit observé est lié à une oscillation à courte distance (Figure 1), il serait la signature d'un quatrième et nouvel état de masse.

Pour tester la réalité de cette oscillation à courte distance, qui pourrait n'être qu'un biais systématique dans les prédictions, plusieurs laboratoires sont en lice. L'Irfu s'est engagé dans deux projets de grande envergure : Stereo et CeSOX, présentés dans les articles détaillés (pages 10-11). Ces projets ont pour ambition d'obtenir une preuve directe de l'oscillation des antineutrinos électroniques en fonction de la distance parcourue et dans le spectre en énergie.

Stereo recherche cette oscillation avec un détecteur segmenté en six cellules placé au plus près du cœur du réacteur de recherche de Grenoble. Ce type de mesure a également été adopté par d'autres laboratoires, avec des technologies de détection plus simples (une cellule unique que l'on peut déplacer, comme Neutrino4) ou plus innovantes (un détecteur 3D composé de milliers de cubes scintillants, comme Solid).

Le second projet de l'Irfu, CeSOX, recherche une oscillation dans les antineutrinos produits lors de la désintégration du Praséodyme-144 (Pr-144 ; il est généré par le Cérium-144), à l'aide d'un détecteur de grande précision, déjà en place à Borexino, qui donne la possibilité de retrouver la position d'interaction.

D'autres laboratoires (Best) ont pour ambition d'observer l'oscillation avec une source de neutrinos électroniques, et d'améliorer l'expérience Gallex<sup>9</sup>. D'autres encore recherchent une oscillation avec une source de neutrinos muoniques. Sans être exhaustif, quelles que soient la source et la technique de détection utilisée, de nombreuses expériences<sup>2</sup> sont prévues, voire déjà en place, et certaines ont commencé à accumuler des données. Jusqu'ici, il s'agit de maîtriser les effets importants liés au bruit de fond dans les analyses, aucun signal significatif n'a encore été indiqué. Il faut ajouter que des expériences non dédiées à la compréhension de l'anomalie à courte distance, telles que le satellite Planck<sup>9</sup>, le détecteur-télescope IceCube (Antarctique) ou Minos<sup>9</sup> (Fermilab, aux Etats-Unis) ont déjà mis des contraintes sur l'hypothèse de l'existence d'un état stérile sans que la question puisse être définitivement tranchée.

Si l'hypothèse d'un neutrino stérile était confirmée, elle ouvrirait une fenêtre vers des particules non accessibles via les interactions du modèle standard.

<sup>1</sup> L'anomalie des neutrinos au niveau des flux enregistrés auprès des réacteurs a fait l'objet d'un article dans *Scintillations* n°86. Découverte à l'Irfu suite aux calculs prédictifs réalisés pour Nucifer [Phys. Rev. D 83, 073006 (2011)], elle a conduit à une publication commune d'un livre blanc sur les neutrinos stériles légers et les moyens à mettre en œuvre pour les détecter (<https://arxiv.org/abs/1204.5379>).

<sup>2</sup> D'autres projets sont à la recherche du neutrino stérile, par exemple et sans être exhaustif : Neos<sup>9</sup> (Corée), Neutrino4 et Danss (Russie), Prospect (E.U.), Solid (Belgique).



# L'expérience T2K sur la piste de l'asymétrie matière-antimatière

Par Sara Bolognesi (SPP) et Marco Zito (SPP)



**T**2K est une expérience dédiée à la mesure des oscillations des neutrinos et antineutrinos muoniques d'un faisceau produit au laboratoire J-PARC et dirigé vers Super-Kamiokande, où des neutrinos de saveur muonique ou électronique sont détectés. Récemment, en comparant les oscillations des neutrinos et des antineutrinos, T2K a ouvert l'étude de l'asymétrie entre matière et antimatière dans le secteur des neutrinos.

Les neutrinos existent en trois saveurs : électronique, muonique et tauonique. Ils sont créés avec une saveur spécifique par des processus d'interaction faible. Par exemple, les neutrinos produits dans les réactions au cœur du soleil sont des neutrinos électroniques. Par ailleurs, la grande partie des neutrinos produits dans les accélérateurs, comme celui du laboratoire J-PARC au Japon, sont des neutrinos muoniques. Mais quand les neutrinos se propagent dans l'espace, ils perdent leur identité et changent de saveur. On parle alors d'« oscillation » (voir l'encadré p. 4) des neutrinos parce que le changement est périodique, comme l'oscillation d'un pendule : s'ils voyagent assez longtemps, ils vont tous revenir à leur saveur initiale et ainsi de suite.

La conservation de CP correspond à des valeurs de la phase  $\delta_{CP} = 0$  et  $\delta_{CP} = \pi$ . Les nouvelles données de T2K montrent une préférence pour une valeur de l'angle de mélange  $\theta_{23}$  proche de  $\pi/4$  et pour une valeur de  $\delta_{CP}$  proche de la valeur maximale  $-\pi/2$ . Les physiciens de T2K ont effectué une analyse complète, en ajustant simultanément les paramètres d'oscillation avec les données prises avec le faisceau des neutrinos et celles prises avec le faisceau des antineutrinos. L'intervalle de confiance pour  $\delta_{CP}$  exclut à 90 % la conservation de CP (Fig. 2).

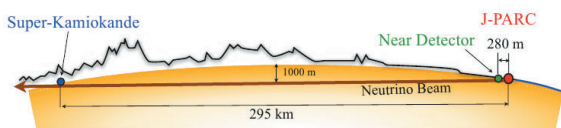


Figure 1 : Schéma de l'expérience T2K au Japon.

C'est ce phénomène que l'expérience T2K est capable de mesurer avec grande précision, en comparant la saveur des neutrinos mesurés avec le détecteur proche (ND280), et la saveur des neutrinos après un voyage de 295 km, mesurés avec le détecteur lointain (Super-Kamiokande), placé sur la côte opposée du Japon (Fig. 1). Le détecteur proche, construit entre autres par les équipes de l'Irfu et de l'IN2P3, permet de mesurer avec précision les caractéristiques du faisceau avant toute oscillation. Ces données sont comparées avec les interactions des neutrinos observées dans le détecteur lointain SuperKamiokande : un cylindre géant rempli d'eau (50 ktonnes) et équipé avec environ 13000 détecteurs de lumière photomultiplicateurs (photo T2K, au centre du bandeau p. 5). Dans ce volume d'eau, les neutrinos peuvent interagir par l'interaction faible, en produisant un lepton (muon or électron). Celui-ci émet un cône de lumière en traversant l'eau (effet Tcherenkov) qui est ensuite détecté par les photomultiplicateurs. En comparant les neutrinos interagissant dans le détecteur proche et le détecteur lointain, on peut mesurer la probabilité d'oscillation. Ces oscillations peuvent être décrites en fonction d'angles de mélange ( $\theta_{13}$ ,  $\theta_{23}$ ), de différences de masses entre neutrinos ( $\Delta m_{12}$ ,  $\Delta m_{23}$ ) et d'une phase de violation de CP ( $\delta_{CP}$ ) (voir p. 4). La violation de la symétrie CP se manifeste par une différence dans les probabilités d'oscillation des neutrinos et des antineutrinos.

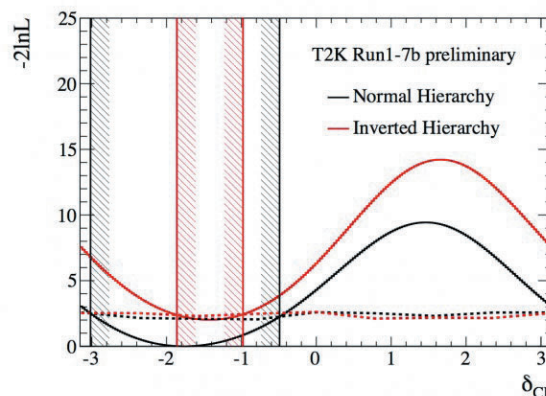


Figure 2 : Logarithme de la vraisemblance en fonction du paramètre  $\delta_{CP}$ . Les courbes noires (rouges) montrent le résultat avec l'hypothèse de la hiérarchie normale des masses :  $m_3 > m_2 > m_1$  (inverse :  $m_2 > m_1 > m_3$ ). Les lignes verticales noires (rouges) montrent la région permise à 90 % de niveau de confiance pour la hiérarchie normale (inverse). Cette figure présente le résultat de T2K, avec des données en mode neutrino et antineutrino, combiné avec les résultats des réacteurs. Les valeurs correspondant à la conservation de la symétrie CP ( $\delta_{CP} = 0$  and  $\delta_{CP} = \pi$ ) se trouvent en dehors de la région à 90 %.

Ce nouveau résultat correspond à 20 % de la statistique totale prévue pour T2K, qui prendra des données jusqu'en 2021. La collaboration T2K propose une extension de la prise des données qui pourrait mener à une observation de la violation de la symétrie CP avec une sensibilité de 3 sigmas (probabilité d'environ 99%) à l'horizon 2025. L'étude de la violation de la symétrie CP dans les neutrinos pourrait apporter des éléments de réponse à une des questions les plus profondes de la science, à savoir : pourquoi l'univers est-il actuellement constitué de matière, alors que le Big Bang avait produit des quantités égales de matière et d'antimatière ? Même si le résultat actuel de T2K n'est pas encore concluant, l'étude des neutrinos continuera de produire des découvertes qui vont changer notre compréhension de l'univers.

Pour en savoir plus, voir : <http://t2k-experiment.org/> et les pages T2K sur le site de l'Irfu (projets, faits marquants, et la page d'août 2016 sur la symétrie CP) : [http://irfu.cea.fr/Phocea/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_techique.php?id\\_ast=2032&voir=fm](http://irfu.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_techique.php?id_ast=2032&voir=fm)



# Les neutrinos au cœur de la matière nucléaire

Par Sara Bolognesi (SPP) et Marco Martini (ESNT\*, SPnH)



**P**our mesurer les oscillations de neutrinos, les expériences auprès des accélérateurs, comme T2K, comptent le nombre de neutrinos interagissant dans un détecteur proche avec celui des neutrinos interagissant dans un détecteur lointain. Pour analyser les mesures, il faut maîtriser précisément la probabilité d'interaction, ou section efficace, des neutrinos avec les noyaux constituant les détecteurs.

## Les effets de la matière nucléaire dans les mesures d'oscillation

Pourquoi, après presque 50 ans d'études des neutrinos, ne connaissons-nous pas encore assez précisément leur probabilité d'interaction avec la matière ? Dans les expériences actuelles, les neutrinos n'interagissent pas avec des nucléons isolés, comme dans l'hydrogène des anciennes chambres à bulles, mais avec les nucléons composant les noyaux des détecteurs (carbone, oxygène, argon, etc...). Par conséquent, la section efficace d'interaction des neutrinos avec les nucléons est modifiée par la présence d'effets nucléaires.

Les neutrinos peuvent interagir avec les nucléons contenus dans la matière des détecteurs de différentes façons. La réaction la plus fréquente aux énergies des neutrinos de T2K<sup>9</sup> (à environ 600 MeV, voir Fig. 1) est celle dite de « courant chargé quasi-élastique », où le neutrino se transforme en lepton chargé et le neutron se transforme en proton :  $\nu + n \rightarrow \mu^- + p$ . D'autres réactions, avec production de pions, deviennent de plus en plus importantes quand l'énergie des neutrinos augmente. La présence de plusieurs canaux de réaction ainsi que le fait que ces réactions se passent dans le milieu nucléaire rend la thématique de l'interaction neutrino-noyau très délicate, à la fois du côté expérimental et du côté théorique.

Dans le cadre des expériences d'oscillation, un programme de mesures de sections efficaces neutrino-noyau a été développé. En particulier, une mesure publiée en 2010 par MiniBooNE<sup>9</sup> (voir Fig. 1, pour le flux de neutrinos) a révélé une anomalie apparente sur les sections efficaces (Fig. 2) : les résultats obtenus semblaient être trop grands par rapport aux modèles intégrés dans les codes de calculs Monte Carlo.

L'explication suivante a été proposée, à partir d'un modèle<sup>1</sup> incorporant les effets nucléaires : si seul le muon sortant est détecté (ce qui est le cas des détecteurs Tcherenkov comme MiniBooNE et Super-Kamiokande<sup>9</sup>), l'émission d'un seul nucléon, qui est le vrai événement quasi-élastique, n'est qu'une possibilité ; il faut en effet considérer aussi la probabilité d'émission d'une paire de nucléons (ou plus).

Dans le langage de la physique nucléaire, il s'agit d'excitations deux particules—deux trous (2p-2h). Ce canal d'émission multi-nucléonique (2p-2h ou np-nh) augmente la section efficace « quasi-élastique » (Fig. 2). Ce mécanisme<sup>1</sup> est illustré en page 9, les images du bandeau présentent les représentations graphiques et diagrammatiques des excitations quasi-élastique et deux particules—deux trous (2p-2h) induites par la diffusion des neutrinos sur un noyau, représenté par ses nucléons (en bleu les neutrons, en rouge les protons, l'éjection d'une ou deux particules est ici symbolisée par un proton, ou par deux).

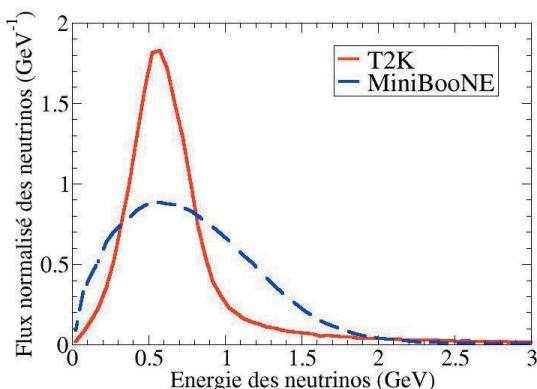


Figure 1 : Flux de neutrinos en fonction de leur énergie pour T2K et MiniBooNE.

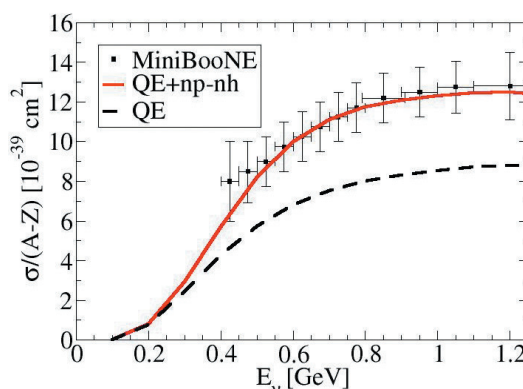
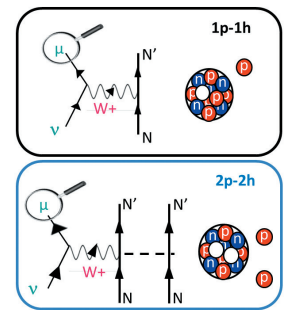
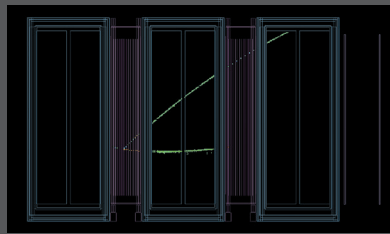
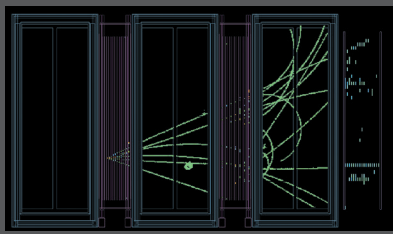


Figure 2 : Section efficace mesurée par MiniBooNE en fonction de l'énergie des neutrinos comparée au modèle<sup>1</sup> avec ou sans la contribution np-nh.

\* L'ESNT est l'Espace de Structure et de réactions Nucléaires Théorique, co-géré par le SPN (pour le CEA, DAM) et le SPnH (pour le CEA, DRF). Voir N°94 de Scintillations, p.11.

<sup>1</sup> M. Martini, M. Ericson, G. Chanfray, J. Marteau, Phys. Rev. C 80, 065501 (2009).





## La mesure de section efficace avec le détecteur proche de T2K

Le groupe T2K du SPP a mesuré (Fig. 3) la section efficace de la réaction  $\nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu + X^*$  (+ 0 pion dans l'état final) au détecteur proche ND280 de T2K<sup>3</sup>. Le bruit de fond principal, dû aux interactions avec production de pions, a été éliminé en conservant une haute efficacité sur le signal grâce aux très bonnes performances des Chambres à Projection Temporelle (TPCs) de ND280, qui ont été conçues, construites et mises en œuvre par une équipe conjointe SPP-Sédi. Les images du bandeau (p.9), présentent deux exemples d'événements dont les signaux ont été enregistrés par le détecteur ND280. Dans le bandeau, sur l'image à gauche, les traces sont des processus d'interactions multiples à haute énergie ; sur l'image centrale, les deux traces en vert correspondent au muon et au proton, ils sont produits par une réaction « quasi-élastique ». La mesure effectuée par l'équipe T2K du SPP est au cœur des actuels débats et études sur la précision des futures expériences d'oscillation. Grâce à une collaboration SPP-SPhN, deux modèles théoriques ont déjà été comparés aux mesures [Fig. 3]. Les deux calculs diffèrent mais peuvent être considérés comme compatibles avec les résultats expérimentaux de T2K. La précision actuelle sur les mesures ne permet pas de trancher.

À la suite de cette explication, il y a eu une relance des activités théoriques et expérimentales concernant les contributions 2p-2h dans la diffusion de neutrinos (et d'électrons) sur noyaux. Au niveau théorique, ce canal d'émission multi-nucléonique est très délicat à traiter, ce qui reflète la complexité de la physique nucléaire, et nécessite différents niveaux d'approximations (pour le formalisme et les calculs numériques).

Un atelier<sup>2</sup> entièrement dédié à ce sujet a été organisé en avril 2016 dans le cadre de l'ESNT\* : les résultats obtenus à l'heure actuelle par les différents groupes théoriques dans ce canal peuvent parfois différer jusqu'à un facteur deux.

Les incertitudes liées aux effets nucléaires, qui interviennent dans les analyses des mesures d'oscillation, sont estimées autour de ~5-10%, ce qui doit absolument être amélioré pour la prochaine génération d'expériences.

## Une fructueuse ligne de recherche

La probabilité d'oscillation des neutrinos dépend de l'énergie des neutrinos, donc pour déterminer les paramètres d'oscillation, il faut évaluer cette énergie, alors que les faisceaux ne sont pas monochromatiques (Fig. 1), et qu'on ne connaît au départ que des flux plutôt étalés.

Dans les détecteurs Tcherenkov à eau, comme Super-Kamiokande<sup>9</sup>, l'énergie du neutrino est reconstruite en partant de l'énergie et de l'angle du lepton chargé détecté.

Cette reconstruction, qui repose sur l'hypothèse d'une diffusion quasi-élastique sur un nucléon n'est pas exacte dans le cas d'interaction des neutrinos avec les nucléons dans le noyau. Les effets nucléaires, en particulier les excitations 2p-2h, induisent un biais dans l'estimation de l'énergie du neutrino et donc dans la détermination des paramètres d'oscillation<sup>4</sup>. Pour mieux contrôler l'impact des effets nucléaires sur la détermination de l'énergie reconstituée, les équipes T2K du SPP et du laboratoire LPNHE travaillent en collaboration sur la mesure de section efficace dans le détecteur proche ND280 en fonction de la cinématique du nucléon sortant.

Deux codes de calculs Monte Carlo sont principalement utilisés dans la physique des neutrinos. Il faut donc inclure dans ces deux codes les éléments du modèle nucléaire théorique<sup>1</sup> qui permet de traiter d'une façon unifiée et cohérente tous les canaux d'interaction ouverts dans les expériences d'oscillations. Cette implémentation est effectuée en collaboration entre le SPhN et le SPP, depuis 2015, elle se poursuivra avec des tests et des études sur les mesures actuelles, répondant ainsi aux besoins de la communauté des physiciens des neutrinos.

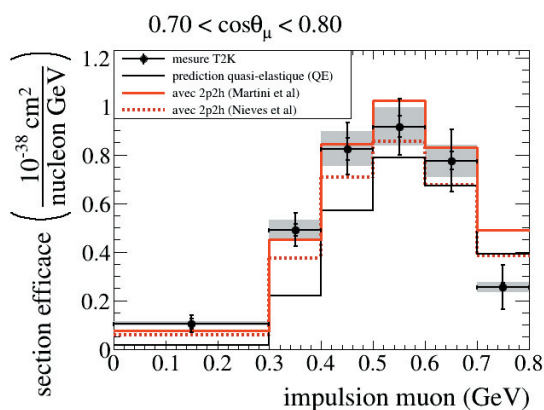


Figure 3 : Section efficace mesurée par T2K en fonction de la cinématique du muon sortant, comparée à deux modèles théoriques différents, incluant la contribution np-nh.

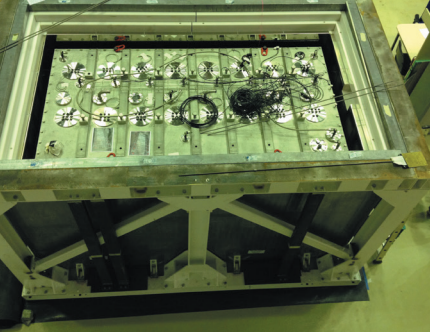
<sup>2</sup> Le programme et les présentations de cet atelier intitulé «Two-body current contributions in neutrino-nucleus scattering », sont disponibles sur : <http://esnt.cea.fr/Phoceae/Page/index.php?id=59>.

<sup>3</sup> K.Abe et al. [T2K Collaboration], Phys. Rev. D 93, 112012 (2016).

<sup>4</sup> M. Martini, M. Ericson, G. Chanfray, Phys. Rev. D 85, 093012 (2012).

# Le détecteur Stereo est prêt pour la découverte du neutrino stérile

Par Thomas Materna (SPhN) pour l'équipe Stereo de l'Irfu



Le détecteur Stereo mesure ses premiers antineutrinos produits par le réacteur à haut flux de neutrons de Grenoble depuis le 10 novembre 2016. Il devrait être en mesure de confirmer (ou de réfuter), dans un avenir proche, l'existence d'une oscillation à courte distance, signature d'un quatrième état, dit stérile, du neutrino.

10

N° 96 - DÉCEMBRE 2016

Les réacteurs nucléaires sont des sources puissantes d'antineutrinos, issus de la désintégration bêta des produits de fission. Le cœur du réacteur de recherche de 58 MW de Grenoble génère ainsi environ  $10^{18}$  antineutrinos électroniques par seconde. Ce réacteur est particulièrement adapté à la recherche d'une oscillation à courte distance : un cœur très compact, de 40 cm de diamètre, avec un combustible d'Uranium enrichi à 93 % en  $^{235}\text{U}$ .

Le projet Stereo est né à l'Irfu. Il est le fruit de la collaboration entre l'Irfu, l'ILL et le LPSC (Grenoble), le LAPP (Annecy), le MPIK (Munich) et l'Université de Casablanca. Notre équipe à l'Irfu a initié et coordonne le projet<sup>1</sup>, et est en particulier responsable de la conception et de la réalisation de la partie interne du détecteur, dédiée à la signature des interactions neutrinos.

Ce projet consiste à mesurer l'oscillation des antineutrinos électroniques avec un détecteur segmenté en six cellules (Figure 1), placé à environ 10 m du cœur du réacteur. Les six cellules de Stereo sont larges de 40 cm, ce qui permet de suivre l'oscillation des neutrinos sur 2,4 m. La technologie de détection des antineutrinos emploie des liquides scintillants dopés au Gadolinium, comme c'est le cas pour les détecteurs de Double Chooz<sup>2</sup> et Nucifer<sup>3</sup>. La capture d'un neutrino par un atome d'hydrogène du liquide donne lieu à l'émission d'un positron et d'un neutron retardé de quelques dizaines de microsecondes.

Cette signature caractéristique de la détection d'un antineutrino est primordiale pour s'affranchir des effets du bruit de fond ambiant mais n'est pas suffisante lorsque le détecteur est si proche du cœur de réacteur : cet environnement est « bruyant » en neutrons et en rayonnements gamma de haute énergie, et il faut protéger le détecteur des signaux produits par ces particules. Ceci est d'autant plus vrai que le nombre d'antineutrinos attendu sur Stereo ne dépasse pas 400 par jour. Une coque de 90 tonnes de blindage (15 à 20 cm de plomb et 15 à 30 cm de polyéthylène haute densité) a donc été réalisée et entoure le détecteur. L'ensemble a ensuite été installé au plus près du cœur en se déplaçant sur coussins d'air. Plusieurs murs de blindages ont également été ajoutés autour du détecteur afin de réduire encore le bruit de fond. Un détecteur

de muons couvre la totalité de la surface supérieure du détecteur pour rejeter ces événements qui, dans certains cas, produisent un signal similaire aux antineutrinos.

L'oscillation des antineutrinos dépendant de leur énergie, il était important de garantir leur détection avec une bonne résolution en énergie, ce qui n'est pas simple quand les photons produits dans une cellule sont détectés dans des photomultiplicateurs situés (pour des raisons de place) au-dessus de la cellule. Une résolution satisfaisante (environ 6 % à 1 MeV) a été obtenue d'une part en entourant les six cellules par une large couronne remplie d'un liquide scintillant sensible aux gammas mais pas aux neutrons, qui récupère l'énergie échappée des cellules sous forme de gammas. D'autre part, toutes les parois internes ont été recouvertes avec un miroir dont la réflectivité<sup>2</sup> est supérieure à 98 %. L'énergie mesurée devient ainsi quasi indépendante de la hauteur à laquelle a lieu le dépôt d'énergie.

La première campagne de mesures a commencé et se terminera en mars 2017. Elle permettra de donner une première estimation des paramètres de l'oscillation à courte distance, si elle existe. D'autres campagnes seront nécessaires pour avoir une statistique suffisante pour confirmer ou rejeter de manière certaine l'oscillation. Ces mesures permettront également de fournir un spectre d'antineutrinos de réacteur de référence, image neutrino des spectres bêta mesurés avec ce même réacteur dans les années 80 et qui servent de référence pour toutes les prédictions.

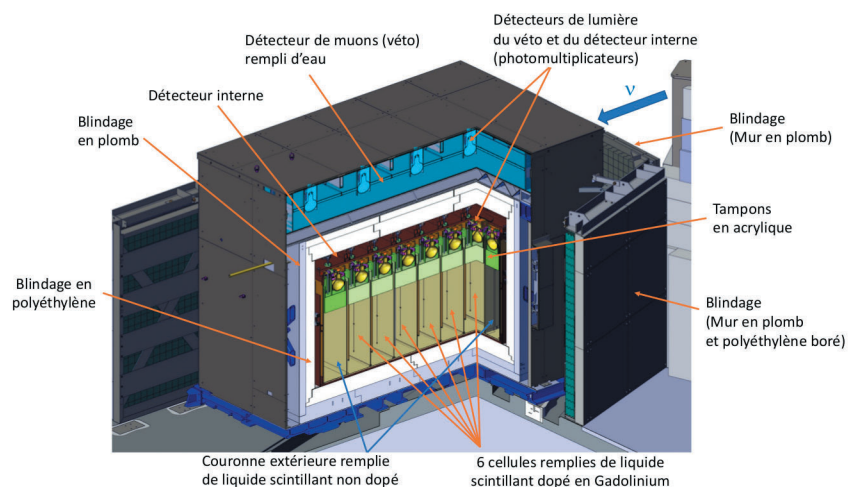


Figure 1 : Schéma du détecteur Stereo avec ses différents blindages.

<sup>1</sup> Ce projet est financé par l'Agence Nationale de la Recherche, qui a apporté un soutien important, 990 k€.

<sup>2</sup> Ce miroir est composé d'un film multicouche biréfringent développé et vendu par la société 3M. Sa réflectivité dans l'air est supérieure à 98,5 %. Une astuce technique, trop longue pour être développée ici, nous permet de l'utiliser dans les cellules remplies de liquide scintillant.



# Des neutrinos stériles à prendre au Cérium

Par Thierry Lasserre (SPP) et Michel Cribier (SPP)

**A** fin de tester l'hypothèse des neutrinos stériles, le CEA et la collaboration Borexino ont associé leurs efforts en vue du déploiement d'un Générateur d'Antineutrinos de Cérium/Praséodyme -144 à proximité du détecteur Borexino situé au laboratoire souterrain du Gran Sasso.

L'expérience CeSOX consiste à déployer un puissant générateur d'antineutrinos à quelques mètres du détecteur Borexino. Les physiciens de l'Irfu ont sélectionné le  $^{144}\text{Ce}^1$  comme meilleur candidat émetteur d'antineutrinos électroniques. Ce noyau se désintègre par radioactivité  $\beta$  en  $^{144}\text{Pr}$  émetteur d'antineutrinos de plus de 1,8 MeV, soit au-delà du seuil de la réaction de détection. Le  $^{144}\text{Ce}$  a, quant à lui, une durée de vie suffisamment longue pour permettre la production, le transport et la mesure. Le  $^{144}\text{Ce}$  est abondant dans les produits de fission de l'uranium 235 (5%) et du plutonium 239 (3%). Le générateur d'antineutrinos sera donc produit par retraitement de combustible nucléaire irradié, selon un procédé Purex<sup>2</sup> suivi d'une chromatographie sur colonne. L'entreprise russe Mayak possède les installations de chimie chaude, uniques au monde, adaptées à l'isolation d'environ 40 g de  $^{144}\text{Ce}$  (soit environ  $5 \cdot 10^{15}$  Bq). Sous la forme de pastilles de dioxyde de Cérium l'ensemble sera scellé dans une double capsule en acier inoxydable résistant à une pression de

six atmosphères et à une température de plusieurs centaines de degrés. Cette source radioactive sera certifiée sous « forme spéciale »<sup>3</sup> selon les normes ISO internationales en vigueur, et ensuite importée en France sous réserve de l'obtention des autorisations par les autorités de sûreté compétentes. Le contrat de production est en cours de ratification. La production démarrera en janvier prochain pour une livraison prévue à la fin de 2017. La comparaison du nombre total de neutrinos détectés et attendus renforcera la recherche de modulations spatiales (Fig. 1, p.6).

Dans ce but, l'activité du générateur d'antineutrinos devra être connue au pourcent. Elle sera établie par la combinaison de la mesure de la puissance dégagée, de l'ordre d'un kilowatt, et de la forme des spectres de désintégration  $\beta$  de la paire  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  fournissant l'énergie moyenne par désintégration. Un calorimètre construit par l'Irfu et la DEN est actuellement en test à Saclay. Deux mesures de spectroscopie  $\beta$  du  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  sont en cours, en collaboration avec le LNHB<sup>4</sup> et l'université de Munich. Le générateur d'antineutrinos doit contenir un faible niveau d'impuretés. Par exemple, la puissance thermique émanant de ces impuretés doit être inférieure à un millième de celle fournie par le  $^{144}\text{Ce}$  afin de ne pas perturber la calorimétrie. Afin d'atténuer le rayonnement  $\gamma$  intrinsèque au  $^{144}\text{Pr}$ , d'au moins 12 ordres de grandeur, le générateur d'antineutrinos sera inséré dans un blindage en alliage de tungstène de 19 cm d'épaisseur. Fort de ses 2,3 tonnes, il s'agit de la plus grosse pièce jamais réalisée en un seul tenant. Un défi réussi par l'entreprise chinoise XTC. Ce blindage a été livré à Saclay en 2016. Les tests seront menés au Gran Sasso (Photo ci-dessous). Il sera ensuite expédié à Mayak (Russie) pour l'encapsulation définitive de la source. L'ensemble sera alors inséré dans un conteneur de transport de « type B (U) »<sup>4</sup>. S'ensuivront deux à trois semaines d'un périple en train, bateau, camions jusqu'à sa livraison au Gran Sasso (voir encadré).



Test d'intégration du blindage factice de CeSOX au Gran Sasso.

En 18 mois de prises de données après le déploiement sous Borexino, environ 10 000 neutrinos seront détectés. L'existence d'un neutrino stérile se manifesterait sous la forme d'une modulation périodique de la distribution des interactions des antineutrinos dans le détecteur. L'absence de modulation permettrait de déterminer des contraintes très strictes sur son existence. À l'issue de la prise de données, fin 2019, le générateur d'antineutrinos sera rapatrié en Russie en vue de son stockage définitif.

## 23 tonnes d'emballage pour livrer 40 grammes

Les antineutrinos sont générés par 40 grammes de Cérium-144, sous forme d'oxyde, mais ils restent mélangés aux autres isotopes stables du Cérium, ainsi ce sont 2,5 kg en pastilles qui sont tassés dans la double capsule en inox capable de supporter sans dommage des pressions et températures élevées-tout cela dégageant aussi 1 200 W. La capsule est introduite à Mayak au centre du blindage de tungstène et le colis à livrer pèse alors 2,3 tonnes. L'emballage servant au transport, tout comme le nouveau panier de calage du colis, doit répondre à de multiples contraintes (tenue aux chocs, au feu...) et être agréé dans les différents pays traversés. Pour notre colis très lourd et volumineux, un seul emballage au monde existe : par chance c'est le TN-MTR d'Areva d'une masse de 20 tonnes. Il ne reste plus qu'à l'arrimer solidement dans l'un de ces containers multi usages bien connu et le voyage peut commencer. Un trajet en train de Mayak dans l'Oural jusqu'au port de Saint-Petersbourg, puis un trajet sur un bateau dédié jusqu'au Havre, enfin un trajet routier du Havre au Gran Sasso avec des arrêts, au minimum pour la nuit, à Saclay et et/ou à Cadarache. Au total, deux à trois semaines. Au Gran Sasso, le déchargement est lui aussi entouré de précautions multiples : ainsi un tapis d'une texture spéciale recouvrira le sol pour amortir la très improbable chute du colis. Enfin pour son dernier trajet, bien plus court, qui doit amener notre générateur d'antineutrinos à l'aplomb du détecteur Borexino, le colis retrouvera le rail sur une petite voie ferrée spécialement construite. Toutes ces opérations ne peuvent se faire que validées dans leurs moindres détails par les différentes autorités de sûreté nucléaire compétentes, ROSATOM en Russie, l'ASN en France et pas moins de six ministères en Italie.

<sup>1</sup> Pour plus d'informations, lire : Phys. Rev. Lett. 107, 201801 (2011) et consulter les pages CeSOX sur <http://irfu.cea.fr>.

<sup>2</sup> Acronyme pour : Plutonium Uranium Refining by Extraction.

<sup>3</sup> Sous forme non aisément dispersable (solide compact).

<sup>4</sup> Laboratoire National Henri Becquerel, laboratoire de métrologie <http://www.nucleide.org>.

<sup>5</sup> Colis de haute résistance pour la matière fortement radioactive, suivant les catégories répertoriées par l'AEIA, Agence Internationale de l'Énergie Atomique.

# Des neutrinos, des noyaux et des hommes



*Quelques références pour découvrir, lire ou relire les premiers articles de physique sur les neutrinos par ceux qui ont construit les théories et imaginé les expériences susceptibles de confirmer leurs postulats ; des lectures pour en savoir plus sur ces hommes qui ont vécu et incarné la physique des neutrinos.*

Le neutrino apparaît officiellement en 1930 avec la lettre adressée par Wolfgang Pauli (Vienne 1900, Zurich 1950) à ses collègues « *Liebe Radioaktive Damen und Herren* » (Mesdames, messieurs, chers radioactifs) à l'occasion de leur réunion sur la radioactivité à Tübingen. Il postule (« sortie de secours désespérée », dit-il) une nouvelle particule neutre électronique (lepton) permettant d'expliquer pourquoi l'électron de la décroissance bêta n'est pas émis avec l'énergie de réaction totale de la transition nucléaire. Pauli présente le neutrino devant le public des physiciens lors du 7<sup>e</sup> congrès Solvay, à Bruxelles, en 1933. En introduisant ce neutrino dans le bilan énergétique de la transition  $\beta$ , le principe de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement est respecté. Enrico Fermi (*Rome 1901, Chicago 1954*) développe alors sa théorie de la désintégration nucléaire  $\beta$  fondée sur l'existence du neutrino – qui est finalement observé en 1956. En 1933, Fermi écrit une note « Tentative de théorie du rayonnement  $\beta$  »<sup>1</sup>. Après avoir proposé son article à la revue *Nature* (qui le refuse au motif qu'il contient « des spéculations trop éloignées de la réalité pour être utile au lecteur »), il le publie en 1934 en italien dans la revue *Nuovo Cimento* et en allemand dans *Zeitschrift für Physik*. L'article est devenu l'un des fondements de la théorie de l'interaction faible, et il contenait une partie de confrontation expérience-théorie (« *confronto con l'esperienza* ») qui rendait compte de la réalité de la théorie, au vu des observables de la désintégration  $\beta$  pour quelques échantillons radioactifs.

Pauli et Fermi furent récompensés par le prix Nobel pour d'autres travaux<sup>2</sup>. Leurs idées originales sur le neutrino déclenchèrent d'intenses activités expérimentales dans les laboratoires du monde entier. Il faut se souvenir aussi de l'effervescence des idées échangées au sein du groupe que Fermi avait constitué à Rome : « *i ragazzi di via Panisperna* »<sup>3</sup> qui ont tous contribué à des réflexions originales et à l'éclosion de théories majeures unissant la physique nucléaire et celle, naissante, des particules.

Parmi eux, Edoardo Amaldi, Bruno Pontecorvo, Ettore Majorana (son directeur de thèse était Fermi), Emilio Segré. Fermi, Segré, Pontecorvo, du fait de leur métier de physicien nucléaire et du contexte historique des années 40, ont aussi mené des travaux auprès des réacteurs nucléaires. Leurs travaux à Rome en 1934 sur les réactions induites par neutrons lents ont marqué l'origine de la physique des réacteurs et de la fission ; les développements menés aux Etats-Unis, auxquels participèrent Fermi et Segré, produisirent la pile atomique, et la bombe atomique dans le cadre du projet Manhattan. Dans les années 60, les évolutions expérimentales de la physique des neutrinos ont remis en lumière les travaux de Majorana et de Pontecorvo. Leurs trajectoires furent particulières, leur vie et leur imaginaire, dominés par les neutrinos. Majorana (*Catane, 1906 ; il disparût en 1938 sans laisser de traces*) travailla sur la théorie des noyaux et les forces d'échange, ensuite qualifiées d'« Heisenberg-Majorana »<sup>4</sup> et sur une particule qui serait sa propre antiparticule, le neutrino de Majorana. Le processus le mettant en jeu serait une double désintégration bêta sans émission de neutrino ( $0\nu\beta\beta$ ). Pontecorvo<sup>5</sup> (*Marina di Pisa 1913 ; Dubna 1993*) compte lui aussi parmi les pères de la théorie de l'interaction faible. Il passa de l'Europe aux Etats-Unis en 1940. En 1950, avec sa famille, il rejoignit l'U.R.S.S., où il mena ses travaux à l'institut JINR de Dubna. L'importance de ses travaux ne fut largement reconnue qu'après sa mort. Physicien à l'origine des idées concernant les oscillations des neutrinos, il postula leur découverte en prédisant un déficit dans le flux des neutrinos solaires. Les développements de la théorie de l'interaction faible utilisent une matrice unitaire appelée PMNS, d'après les noms de Pontecorvo, et des trois physiciens Maki, Nakagawa et Sakata, dont les travaux ont formalisé l'hypothèse de Pontecorvo, confirmée par la découverte expérimentale des oscillations des neutrinos, qui conduisit à la preuve de leur masse. En 1967, dans l'un de ses articles<sup>5</sup>, Pontecorvo imagina la possibilité d'une conversion, par oscillation, d'un neutrino en un neutrino quasi-indétectable qu'il qualifia de « stérile »<sup>5</sup>. Un tel neutrino fait actuellement l'objet d'intenses recherches et est conçu comme une particule au-delà du modèle standard.

V. Lapoux

<sup>1</sup> Note initiale de Fermi : « *Tentativo di una teoria Dei Raggi  $\beta$*  », La Ricerca Scientifica, vol. 2, no 12, 1933. L'article, en version italienne : *Nuovo Cimento* vol 11, n°1, p.1-19 (1934), DOI 10.1007/BF02959820 ; traduit en anglais : F. L. Wilson *Am. J. Phys.* 36, 1150 (1968) ; <http://dx.doi.org/10.1119/1.1974382>.

<sup>2</sup> Fermi en 1938 pour sa « démonstration de la production de nouveaux éléments radioactifs produits par les irradiations de neutrons, et les réactions nucléaires induites par neutrons » et Pauli en 1945 pour « la découverte du principe d'exclusion » qui porte son nom.

<sup>3</sup> Ce surnom « les garçons de la rue Panisperna » vient de la rue où se situait l'institut de physique à l'université de Rome « La Sapienza ». La photo du bandeau montre la coupole du « Palazzo della Sapienza », siège initial de l'université. Pour en savoir plus : « *Enrico Fermi : his work and legacy* », Bologna Berlin New York, Società Italiana di Fisica & Springer Verlag, 2004, sous la direction de C. Bernardini et L. Bonolis.

<sup>4</sup> E. Majorana, « *Sulla teoria dei nuclei* », La Ricerca Scientifica, 1933, p. 559-565 ; « *Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone* », Il Nuovo Cimento, vol. 14, avril 1937, p. 171-184 ; DOI : 10.1007/BF02961314.

<sup>5</sup> « *Bruno Pontecorvo : From slow neutrons to oscillating neutrinos* », L. Bonolis, *Am. J. Phys.* 73, 487 (2005) ; DOI : 10.1119/1.1852540.

Evocation du neutrino stérile : Bruno Pontecorvo, *Sov. Phys. JETP* 26 (1968) 984-988, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 53 (1967) 1717-1725.

**Directeur de la publication (chef de l'Irfu) :** A.-I. Etievre - **Conseiller scientifique :** G. Cohen-Tannoudji - **Édition, rédaction en chef :** Valérie Lapoux

**Comité éditorial et scientifique du numéro 96 :** Comité éditorial et scientifique du numéro 96 : Nathalie Besson (SPP), Gilles Cohen-Tannoudji (Larsim), Bertrand Hervieu (SACM, LCSE), Fabien Jeanneau (Sédi, Dephys), Caroline Lahonde-Hamdoun (Sédi, Lasyd), Valérie Lapoux (SPhN, Lena), Ange Lotode (SIS, Leige), Pierre Manil (SIS, LCAP), Thomas Materna (SPhN, LEARN), Emmanuel Moulin (SPP), Yves Sacquin (SPP) ; avec la collaboration de la cellule de communication de la direction de l'Irfu : Sophie Kerhoas-Cavata (Dir Com), Philippe Briet (Sédi, Lis), Angèle Séné (Dir Com).

**Crédit photos :** CEA, SACM, Irfu (p. 2-3) ; collaborations : Stereo (p. 10) ; CeSOX (p. 11), T2K (p. 5, image du bandeau ; p. 7 ; p. 9) ; V. Lapoux (photos p. 1, p. 12 : Palazzo della Sapienza, diagrammes p. 1).

**Dépôt légal :** Décembre 2016 - ISSN 1268-7855 **Pour lire et demander les numéros de la revue :** <http://irfu.cea.fr/Scintillations>