Tissage de la chambre à fil d'un secteur du détecteur NEMO-3.

Afin de savoir si le neutrino est identique à son antiparticule, l'expérience NEMO-3, au laboratoire souterrain de Modane, recherche la double désintégration bêta sans émission de neutrinos du ^{100}Mo et du ^{82}Se .

Après quatre ans et demi de prise de données, aucun signal n'a été observé.

Les physiciens de la collaboration ont terminé une phase de trois ans de R&D pour un futur détecteur SuperNEMO : amélioration de la résolution en énergie du calorimètre, construction d'un détecteur pour mesurer dans les sources des taux de radio-impuretés qui seront plus faibles d'un ordre de grandeur. Un module démonstrateur doit être construit à partir de 2011.

Les termes suivis d'un astérisque sont expliqués dans le glossaire.

Le neutrino est-il identique à son antiparticule ?

La recherche du neutrino de Majorana avec l'expérience NEMO-3 et le futur détecteur SuperNEMO

Christine Marquet⁽¹⁾ (marquet@cenbg.in2p3.fr) et Laurent Simard⁽²⁾ (simard@lal.in2p3.fr)

(1) Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux Gradignan, UMR 5797, Université de Bordeaux 1 et CNRS, 33175 Gradignan Cedex

(2) Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, UMR 8607, Université de Paris-Sud 11 et CNRS, B.P. 34, 91898 Orsay Cedex

Présentation du problème

Depuis que son existence a été postulée par Pauli en 1930 pour expliquer les propriétés de la désintégration bêta moins*, notée β^- (désintégration d'un noyau père en un noyau fils comportant un proton en plus et un neutron en moins, avec émission d'un électron et d'un antineutrino), le neutrino* reste une particule mal connue. Une propriété particulière vient du fait que c'est le seul fermion élémentaire qui ne soit pas chargé ; ainsi son antiparticule, l'antineutrino, peut être identique au neutrino et dans ce cas on dit que le neutrino est une particule de Majorana. Cette propriété, si elle est démontrée, pourrait être le signe d'une mise en défaut du Modèle Standard, modèle qui décrit l'interaction des particules élémentaires ; elle permettrait de franchir un grand pas dans la compréhension de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers.

La seule technique expérimentale qui permet actuellement de tester de manière sensible le caractère de Majorana du neutrino est la recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrinos, notée $2\beta\nu$ [1]. C'est une désintégration simultanée dans un même noyau de deux neutrons

en deux protons, avec émission de deux électrons, et dans laquelle la valeur de la somme des énergies des deux électrons est égale à l'énergie de transition, notée $Q_{\beta\beta}$, typiquement de 2 à 4 MeV pour les expériences qui recherchent cette désintégration. L'antineutrino émis lors de la désintégration d'un neutron est réabsorbé en tant que neutrino, ce qui n'est possible que si le neutrino et l'antineutrino sont identiques, c'est-à-dire que si le neutrino

>>>

1. Schéma d'une double désintégration bêta sans émission de neutrino : à l'intérieur d'un même noyau, deux neutrons n se désintègrent simultanément en deux protons p par interaction faible (d'où l'émission de bosons intermédiaires W).

► Réduction du bruit de fond dans l'expérience NEMO-3

Afin de réduire la contamination radioactive pour que le bruit de fond issu de la radioactivité soit le plus faible possible, tous les éléments du détecteur ont été sélectionnés et mesurés avec des détecteurs au germanium. Le détecteur est entouré d'un blindage de 18 cm en fer contre les gammas d'origine externe, et d'un blindage en bois et en eau borée contre les neutrons thermiques. Une enceinte antiradon crée un volume tampon autour du détecteur, avec une teneur en radon inférieure d'un facteur 100 à celle du laboratoire (0,15 Bq/m³ au lieu de 15 Bq/m³).

Le détecteur NEMO-3 a mesuré les diverses composantes de bruit de fond (²⁰⁸Tl et ²¹⁴Bi dans la source, ²¹⁴Bi sur les fils de la chambre à dérive), avec des canaux d'analyse spécifiques (1 électron et 2 ou 3 gammas émis en même temps depuis la source, 1 électron et 1 alpha émis depuis la source ou sur les fils...).

>>>

est une particule de Majorana (fig. 1). La désintégration $2\beta 0\nu$ est susceptible d'être observée pour certains noyaux (⁴⁸Ca, ⁷⁶Ge, ⁸²Se, ⁹⁶Zr, ¹⁰⁰Mo, ¹¹⁶Cd, ¹³⁰Te, ¹⁵⁰Nd...) pour lesquels la désintégration β^- est interdite, par exemple pour des raisons de conservation de l'énergie. Cette double désintégration bêta n'a encore jamais été observée avec certitude ; en 2001, la collaboration Heidelberg-Moscou a annoncé l'avoir détectée, mais ce résultat reste largement controversé [2]. Les limites actuelles sur le temps de demi-vie* sont de l'ordre de 10²⁴ années, ce qui implique qu'un noyau a une probabilité inférieure à 10⁻¹⁴ de s'être désintégré par $2\beta 0\nu$ depuis le début de l'âge de l'Univers ! Cette probabilité est liée à la masse effective du neutrino qui dépend, entre autres, des masses des trois saveurs de neutrinos, ν_e , ν_μ et ν_τ . Du fait de la rareté du phénomène, le taux de tout processus qui peut imiter cette désintégration doit être réduit à un niveau

extrêmement faible (voir encadré 1). Ainsi la recherche de cette désintégration se fait dans des laboratoires souterrains, avec des niveaux de radioactivité ambiante les plus faibles possibles. En effet, non seulement la double désintégration bêta avec émission de deux neutrinos, notée $2\beta 2\nu$, constitue un bruit de fond irréductible lorsque les neutrinos emportent une très faible part de l'énergie de transition, mais aussi les chaînes de la radioactivité naturelle* de l'uranium 238 et du thorium 232 contiennent des émetteurs β^- qui peuvent, dans certains cas, produire deux électrons d'énergie voisine de l'énergie $Q_{\beta\beta}$ [3].

L'expérience NEMO-3

L'expérience NEMO-3 (fig. 2), construite par une collaboration internationale (les laboratoires français impliqués sont le CENBG (Bordeaux), l'IPHC (Strasbourg), le LAL (Orsay) et le LPC (Caen)), est située

3. Reconstruction d'un événement à deux électrons, caractéristique d'une double désintégration bêta, observé avec NEMO-3. Les cercles bleus correspondent aux cellules déclenchées du détecteur de traces ; leurs rayons indiquent à quelle distance du fil central de la cellule est passé l'électron. Les rectangles violets représentent les scintillateurs touchés par les électrons.

2. Vue schématique du détecteur NEMO-3

au Laboratoire Souterrain de Modane, sous près de 1700 m de roche. Elle recherche la désintégration $2\beta 0\nu$, principalement avec des sources de ^{82}Se et de ^{100}Mo . Cette désintégration consiste en l'émission simultanée de deux électrons, dont la somme des énergies est voisine de 3 MeV. Les trajectoires des particules chargées sont reconstruites (fig. 3) avec le détecteur de traces, qui est une chambre à dérive* fonctionnant en régime Geiger. Les énergies et les temps d'arrivée des électrons sont mesurés par le calorimètre*, qui consiste en des blocs de scintillateurs plastiques couplés à des photomultiplicateurs [4].

Deux isotopes de la radioactivité naturelle qui sont des émetteurs β^- ou (β^- , γ), le thallium 208 et le bismuth 214, peuvent produire deux électrons d'énergie proche de 3 MeV et ainsi être responsables d'un bruit de fond similaire à la désintégration recherchée, car leurs énergies de transition sont respectivement 4,99 MeV et 3,27 MeV :

- soit un électron émis par désintégration β^- interagit avec la source par diffusion Møller* (l'électron β^- arrache un électron atomique de la source), ce qui crée un deuxième électron ;
- soit le deuxième électron est créé par interaction Compton du γ avec la source ;
- soit la désexcitation du noyau fils produit par désintégration β^- génère le deuxième électron, qui est appelé dans ce cas électron de conversion*.

Après environ quatre ans de prise de données, aucun excès significatif d'événements à deux électrons proches de $Q_{\beta\beta}$, par rapport au bruit de fond attendu, n'a été observé (fig. 4). Les limites sur la demi-vie de la désintégration $2\beta 0\nu$ à 90% de niveau de confiance sont $1,0 \cdot 10^{24}$ et $3,2 \cdot 10^{23}$ années pour le ^{100}Mo et le ^{82}Se respectivement, ce qui donne une limite supérieure de [0,60-0,94] eV sur la masse effective du neutrino de Majorana [5, 6].

►►►

4. Nombre d'événements à deux électrons sélectionnés (points noirs) provenant du ^{100}Mo (à gauche) ou du ^{82}Se (à droite) en fonction de l'énergie totale déposée par les deux électrons.

L'histogramme bleu représente la simulation du processus de $2\beta 2\nu$ (mode de désintégration principal de ^{100}Mo et ^{82}Se , avec une période respective de $7,8 \cdot 10^{18}$ et $1,08 \cdot 10^{20}$ années). L'histogramme rouge la contribution des désintégrations radioactives qui ont lieu dans la source (bruit de fond interne), et l'histogramme vert la contribution des désintégrations de bismuth 214 déposé sur les fils à cause du radon 222.

La ligne magenta représente la simulation du processus de $2\beta 0\nu$, avec une normalisation qui correspond à une demi-vie arbitraire de $5 \cdot 10^{23}$ et de $2 \cdot 10^{23}$ années respectivement, pour le ^{100}Mo et pour le ^{82}Se .

Glossaire

Calorimètre

Détecteur mesurant l'énergie des particules. Dans le cas de NEMO-3 et de SuperNEMO, ce détecteur est constitué de scintillateurs plastiques à base de polystyrène et de photomultiplicateurs (PMs). Le passage d'un électron dans le scintillateur plastique entraîne l'émission de lumière, convertie par le photomultiplicateur en un signal électrique de charge proportionnelle à l'énergie déposée par l'électron dans le scintillateur.

Chambre à dérive

Détecteur de la trajectoire de particules chargées. Une particule chargée d'assez haute énergie traverse le gaz en l'ionisant. Les électrons et les ions produits dérivent sous l'action d'un champ électrique jusqu'à des fils. Les signaux électroniques mesurés sur ces fils permettent de reconstruire la trajectoire de la particule.

Désintégration β^-

Désintégration d'un noyau radioactif avec émission d'un électron et d'un antineutrino (noté $\bar{\nu}$) selon le processus ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}$

Diffusion Møller

Diffusion d'un électron libre sur un électron lié dans un atome, en électrodynamique quantique.

Électron de conversion

La conversion interne est un mode de désexcitation d'un noyau, qui se traduit par l'expulsion d'un électron du cortège électronique de l'atome et l'émission d'un photon X. Elle est en compétition avec la radioactivité gamma.

Neutrino

Particule élémentaire notée ν , de spin 1/2, de charge nulle et de masse très faible, qui interagit uniquement par interaction faible (la gravité, bien que présente, est négligeable). Il en existe trois « saveurs », une pour chaque famille de leptons : le neutrino-électron ν_e , le neutrino-muon ν_μ et le neutrino-tau ν_τ .

Radioactivité naturelle

Tous les matériaux naturels sont susceptibles de contenir des noyaux radioactifs, tels que l'uranium 238, le thorium 232 et leurs descendants.

Temps de demi-vie

Durée (notée $T_{1/2}$) au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs se sont désintégrés. Le nombre de noyaux $N(t)$ décroît exponentiellement avec le temps : $N(t) = N_0 \exp(-\ln 2 \cdot t / T_{1/2})$. Plus $T_{1/2}$ est grand, plus le signal mesuré par les détecteurs sera faible.

Le projet SuperNEMO

En parallèle à l'exploitation du détecteur NEMO-3, une phase de R&D (voir encadré 2) a débuté en 2006 pour mettre au point un détecteur de nouvelle génération basé sur la même approche expérimentale, dite « tracko-calorimètre », que le détecteur NEMO-3.

Ce nouveau détecteur, SuperNEMO, pourrait contenir plus de 100 kg d'isotope émetteur double bêta (^{82}Se) avec des taux de radio-impuretés plus faibles d'un ordre de grandeur que ceux de NEMO-3 et une résolution en énergie du calorimètre (FWHM) meilleure que 4% à 3 MeV ($Q_{\beta\beta}$). Avec de telles performances, le détecteur SuperNEMO serait 100 fois plus sensible sur la demi-vie du processus recherché, avec une sensibilité sur la masse effective du neutrino de l'ordre de 50 meV : un domaine de masse expérimentalement inaccessible jusqu'à présent !

La sensibilité atteinte sera compétitive avec celles qu'atteindront dans les prochaines années les expériences concurrentes, telles que CUORE [7] et GERDA [8], situées au Laboratoire italien du Gran Sasso. L'originalité de SuperNEMO réside en l'identification des deux électrons $\beta\beta^-$, avec un grand choix d'isotopes émetteurs double bêta.

Le détecteur, de géométrie planaire, serait formé de 20 modules contenant chacun une feuille d'isotope émetteur double bêta (5 kg), entourée de cellules de dérive en régime Geiger et fermée par un calorimètre constitué de scintillateurs plastiques couplés à des photomultiplicateurs (fig. 5).

5. Vue schématique d'un des 20 modules du détecteur SuperNEMO. Dans la partie gauche du détecteur, le calorimètre, la chambre à dérive et la source ont été artificiellement séparés, alors que dans la partie droite le calorimètre et la chambre à dérive ont été regroupés, comme ce sera le cas dans le détecteur SuperNEMO.

La collaboration souhaite aujourd'hui construire un démonstrateur correspondant à un module de SuperNEMO totalisant 7 kg de ^{82}Se . Ce module permettrait de valider à grande échelle les résultats obtenus pendant la phase de R&D et de mesurer les niveaux de bruit de fond dans le détecteur, notamment celui lié au radon. Ce démonstrateur permettrait également d'atteindre une sensibilité sur la période de décroissance $2\beta 0\nu$ du ^{82}Se de $6,5 \cdot 10^{24}$ ans après deux ans

de mesure [9]. Cette sensibilité offrirait au démonstrateur la possibilité de confirmer le résultat de la collaboration Heidelberg-Moscou, si celui-ci est exact.

Suivant les résultats obtenus avec le démonstrateur, le détecteur SuperNEMO complet pourrait être construit à partir de 2014 pour atteindre sa sensibilité finale fin 2019, et nous permettre ainsi de continuer à percer les mystères du neutrino... ■

► SuperNEMO : quelques détails techniques

encadré 2

Le travail de R&D entrepris par la collaboration SuperNEMO a permis de :

- développer un prototype de 90 cellules de dérive de 3,7 mètres de long et 44 mm de diamètre présentant des résolutions longitudinales et transversales respectivement de 1 cm et 0,7 mm, adaptées aux besoins du projet ;
- valider les procédures d'enrichissement et de purification du ^{82}Se pour produire des feuilles sources de 40 mg/cm². La mesure de la radiopureté des feuilles source de sélénium a nécessité le développement d'un détecteur de très faibles radioactivités en ^{208}Tl (2 $\mu\text{Bq/kg}$) et en ^{214}Bi (10 $\mu\text{Bq/kg}$), appelé BiPo. Ce détecteur est basé sur la détection d'un électron et d'une particule alpha retardée, caractéristiques des décroissances associées aux isotopes des chaînes radioactives du ^{208}Tl et du ^{214}Bi . Les développements réalisés ont montré la faisabilité du détecteur BiPo avec les sensibilités demandées ;
- mettre au point un calorimètre formé d'un scintillateur hexagonal en PVT (Poly-Vinyl-Toluène) de 12 cm de haut et 28 cm de « diamètre », couplé à un photomultiplicateur 8 pouces Hamamatsu pouvant mesurer l'énergie des électrons avec une résolution de 4% à 3 MeV, une précision atteinte pour la première fois avec ce type de photodétecteur.

Bibliographie

- 1• www.lal.in2p3.fr/IMG/pdf/lal39.pdf
M. Doi, T. Kotani et E. Takasugi, *Prog Theor. Phys. Suppl.*, **83** (1985) 1-175.
- 2• H. V. Klapdor-Kleingrothaus *et al.*, *Modern Physics Letters A*, **16** (2001) 2409-2420.
- 3• <http://nemo.in2p3.fr/nemow3/> (anglais), www.cenbg.in2p3.fr/spip.php?rubrique205&lang=fr (français), J. Argyriades *et al.*, *NIMA*, **606** (2009) 449-465.
- 4• R. Arnold *et al.*, *NIMA*, **536** (2005) 79-122.
- 5• R. Arnold *et al.*, *Physical Review Letters*, **95** (2005) 182302.
- 6• J. Argyriades *et al.*, NEMO collaboration, *Phys. Rev. C*, **80** (2009) 032501.
- 7• R. Arbitto *et al.*, arXiv: hep-ex/0501010v1 (2005).
- 8• I. Abt *et al.*, arXiv: hep-ex/0404039v1 (2004).
- 9• R. Arnold *et al.*, *Eur. Phys. J. C*, **70** (2010) 927-943.