

Contribution Prospectives IN2P3 2020

Expérience SuperNEMO

Author:

Name: François Mauger

Institution: Normandie Univ, ENSICAEN, UNICAEN, CNRS/IN2P3, LPC Caen

Email: mauger@lpccaen.in2p3.fr

Phone: 0231452512

Further IN2P3 authors :

SuperNEMO members

Résumé

L'expérience SuperNEMO a fait l'objet d'un passage au conseil scientifique de l'IN2P3 en octobre 2018. Le document présent reprend certains des éléments du document soumis au CSI [1] et donne quelques perspectives. Pour une introduction à la problématique expérimentale de la recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrino, voir [2].

Technique SuperNEMO

L'expérience SuperNEMO s'appuie sur une technologie de détection dite « track-calorimètre » qui permet non seulement de mesurer l'énergie des électrons émis lors des processus de double désintégration bêta grâce à un calorimètre dédié, mais également d'identifier ces électrons au moyen d'un trajectographe, la source d'isotope émetteur $\beta\beta$ étant quant à elle passive et distincte de ces deux unités de détection. Cette approche se distingue historiquement des détecteurs dits « calorimétriques » purs pour lesquelles la source $\beta\beta$ coïncident avec le volume de détection (germanium, bolomètres, TPC, scintillateur liquide). À ce titre, c'est la seule expérience qui met en œuvre une chambre à fils, qui plus est avec une grande granularité.

Cette instrumentation a permis d'atteindre des performances remarquables quant à l'identification des bruits de fonds : gamma / électron / positron / alpha. L'expérience NEMO-3 a ainsi bénéficié d'un taux de bruit de l'ordre de 10^{-3} coups/kev/kg/an dans la région d'intérêt pour la recherche du processus $\beta\beta 0\nu$ du ^{100}Mo .

Une difficulté inhérente à cette approche tient au fait qu'il faut assembler un détecteur à partir de trois objets distincts (source, trajectographe, calorimètre) avec leurs interfaces et des dispositifs de protections additionnels (bobine, blindage, tente anti-radon) dans un contexte ultra-bas bruit de fond. La difficulté est d'autant plus forte dans le cas d'un isotope de $Q_{\beta\beta}$ inférieur à $Q_{\beta}(^{214}\text{Bi}) = 3,27$ MeV pour lequel la nécessité de lutter contre la diffusion du radon vers le détecteur de traces, son émanation depuis les matériaux internes ou la contamination du gaz du détecteur de traces rend très complexes la conception, la fabrication et l'assemblage du détecteur.

L'idée de la collaboration SuperNEMO a été toutefois de pousser cette technique au maximum pour améliorer encore sa capacité à identifier et réduire les bruits de fond tout en conservant la faculté de détecter et d'identifier formellement un « golden event » signant un processus $\beta\beta 0\nu$.

Un autre trait intéressant de cette approche expérimentale est de pouvoir étudier différents isotopes émetteurs $\beta\beta$ comme il a été démontré dans NEMO-3, le sélénium 82 (^{82}Se) étant l'isotope choisi dans le module démonstrateur de SuperNEMO.

Performances obtenues lors de la R&D

D'énormes progrès ont été faits dans le cadre de la R&D de SuperNEMO par rapport à NEMO-3 dont beaucoup ont été réalisés au sein de l'IN2P3. Au niveau des feuilles sources $\beta\beta$, près de la moitié ont été fabriquées avec une méthode innovante développée en France. Un détecteur ultrapur appelé BiPo a été conçu et construit en France afin de mesurer les feuilles sources $\beta\beta$ avec une sensibilité de quelques $\mu\text{Bq/kg}$ en ^{208}Tl . Il a permis de valider l'obtention d'un niveau de radiopureté de feuilles sources de ^{82}Se cinq fois meilleures en ^{208}Tl que dans NEMO-3. L'amélioration de la résolution en énergie du calorimètre de 14-17% à 8% FWHM à 1 MeV est également un des grands succès de la R&D de SuperNEMO avec un développement essentiellement français. L'un des progrès a également été de mettre en place en amont de la construction des dispositifs permettant de vérifier la radiopureté et l'étanchéité au radon des matériaux afin d'améliorer la radiopureté du gaz du trajectographe de plus d'un ordre de grandeur (de 6 mBq/m^3 à $0,15 \text{ mBq/m}^3$). Enfin, un énorme travail réalisé par des laboratoires de l'IN2P3 a été réalisé au niveau du développement logiciel pour la simulation, la reconstruction et l'analyse des événements dans le démonstrateur de SuperNEMO.

Planning et sensibilité attendue

La phase de construction et d'exploitation du démonstrateur de SuperNEMO est fortement soutenue par l'IN2P3. Le démonstrateur de SuperNEMO est en cours d'achèvement de construction et d'installation au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) avec la mise en place des derniers éléments de protection (bobine, tente anti-radon, blindages gamma et neutron). Il prendra des données en routine en configuration complète à partir de 2020 pour environ trois ans. Le démonstrateur aura le potentiel de vérifier les exigences sur les niveaux des bruits de fond avec une précision de 10% en une journée pour le radon et en huit mois de mesure pour le ^{208}Tl , dans le cas d'un scénario de radiopureté nominale.

Le module démonstrateur SuperNEMO avec 6 kg de ^{82}Se a été conçu pour démontrer la faisabilité d'une expérience modulaire de grande taille, capable de mettre en œuvre une exposition à l'échelle de $m \times t = 500 \text{ kg.année}$. La collaboration a établi les performances d'un tel détecteur en terme de sensibilité au processus $\beta\beta 0\nu$ du ^{82}Se . En configuration complète avec 500 kg.année (soit 100 kg de ^{82}Se et 5 ans de prises de données), la sensibilité attendue sur la masse effective du neutrino dans le cadre de l'échange de neutrino léger est de [82-160] meV.

À l'heure actuelle, la collaboration a pour objectif de tirer le maximum possible du démonstrateur. Avec une exposition de 18 kg.année (6 kg en 3 ans de prises de données), la sensibilité attendue est de [260-500] meV avec un taux de bruit de fond de $0,043 \text{ evt/ROI/kg/an}$. Cette sensibilité n'est pas compétitive avec les autres expériences en cours. Toutefois, la technique « tracko-calo », autorisant la mesure de l'énergie individuelle des électrons, de l'angle d'émission relatif et de l'énergie individuelle des gamma émis, permettra également de mettre des contraintes sur les autres modes de désintégrations $\beta\beta 0\nu$ possibles (courant droit, émission de Majoron, mécanismes de super-symétrie, états excités). Le démonstrateur permettra également de mesurer la désintégration $\beta\beta 2\nu$ du ^{82}Se de manière très précise en terme de demi-vie et de cinématique (identification individuelle des particules dans l'état final) :

- détermination du mécanisme de transition SSH ou HSD, décroissance vers les états excités,
- possible détermination de la constante de couplage vectoriel-axial g_A pour la décroissance double bêta par la mesure des énergies individuelles des électrons.

Enfin, il est prévu de mettre des contraintes sur la violation de l'invariance de Lorentz, l'hypothèse d'un neutrino bosonique et la recherche de la décroissance double bêta (avec et sans neutrinos) avec électron lié.

Retour d'expérience sur le démonstrateur

Le retour d'expérience avant même la prise de données à propos de la conception, la fabrication et l'intégration du module démonstrateur de SuperNEMO permet de tirer un certain nombre de conclusions:

- La preuve ayant été faite par NEMO-3 de son excellente capacité à identifier et rejeter les bruits de fond, la technologie tracko-calorimètre telle qu'implémentée par SuperNEMO n'est toutefois pas facile à mettre en œuvre. En effet, elle nécessite l'assemblage de nombreux composants (trajectographe, calorimètre, source, bobine, tente anti-radon, blindages) avec des interfaces complexes.
- La masse d'isotope $\beta\beta$ est limitée à 5-10 kg par module du fait de la finesse requise des feuilles sources ($<350 \mu\text{m}$).
- La sélection des matériaux en terme de radiopureté est difficile. Les mesures critiques par spectrométrie gamma bas bruit de fond ou via le détecteur BiPo peuvent prendre jusqu'à plusieurs mois pour quelques centaines de grammes.
- Le dispositif expérimental est un gros consommateur de ressources humaines à la construction.
- Il existe de grandes difficultés d'intégration mécanique, surtout en environnement souterrain restreint comme au LSM.
- La complexité des interfaces pose des problèmes d'étanchéité et donc de bruit de fond en terme de contamination par le radon.
- La conception mécanique du démonstrateur est fragile et non optimale (montage, démontage, intervention).
- Une production « industrielle » d'un tel module paraît ainsi peu, voire pas du tout, envisageable.

Il semble donc pratiquement impossible d'envisager une mise à l'échelle du design actuel et donc un avenir pour cette technologie en l'état.

Perspectives

En termes de perspectives physiques, même si le démonstrateur remplit correctement son cahier de charge (radiopureté, résolution énergie, efficacité, réjection des fonds...) et s'il s'avère dans quelques années capable de publier des résultats conformes à son objectif en termes de sensibilité, le passage à l'échelle avec par exemple 20 modules pour une exposition de 500 kg.an dans le futur (vers 2030) ne permet pas d'envisager de concourir auprès des expériences double bêta de nouvelle génération qui ont pris une sérieuse avance en terme de sensibilité.

Depuis une dizaine d'années, les expériences leader ont fait le choix d'accommoder de grandes masses d'isotopes avec une efficacité honorable voire très élevée. Elles bénéficient aujourd'hui de quantités d'isotope émetteur double bêta de plus d'un ordre de grandeur supérieures à celles mises en œuvre par NEMO-3 et SuperNEMO. Avec des progrès très significatifs obtenus en parallèle sur la radiopureté et de nouvelles méthodes de réjection des fonds (Pulse Shape Analysis), cela s'est avéré une formule gagnante.

La communauté SuperNEMO France tire les leçons de ce programme expérimental démarré dans les années 1990. De nouvelles pistes sont explorées (R&D) avec des technologies de détection qui devront présenter les caractéristiques suivantes :

- possibilité de grandes masses d'isotope (compétition avec les projets leader dans la communauté),
- garantie des facteurs d'identification des particules et de discrimination signal *versus* bruit de fond,
- possibilité d'étudier différents isotopes $\beta\beta$,
- simplicité du design et de l'intégration (radiopureté, étanchéité, compacité adaptée pour l'accueil en laboratoire souterrain, optimisation en ressources humaines).

Toutefois, dans l'hypothèse où un signal $\beta\beta_{0\nu}$ serait détecté dans un futur proche par l'une des expériences actuellement en fonctionnement, la communauté devrait considérer l'approche de SuperNEMO pour étudier la conception d'une expérience dimensionnée pour la confirmation indépendante d'un signal $\beta\beta_{0\nu}$ et bénéficiant des caractéristiques remarquables d'identification de la technologie « tracko-calorimètre ».

Références :

- [1] Conseil Scientifique de l'IN2P3, 25-26 octobre 2018, Expérience SuperNEMO http://old.in2p3.fr/actions/conseils_scientifiques/media/2018_octobre/Rapports/06_Mauger_SuperNEMO.pdf
- [2] IN2P3 strategy to search for neutrinoless double-beta decay, A.Giuliani et al.

Annexe : rappel des responsabilités françaises dans SuperNEMO

L'IN2P3 a assuré de nombreuses responsabilités tant pendant la phase de R&D, que celles de la construction et de la mise en route du module démonstrateur :

- porte-parole de l'expérience,
- coordination technique du démonstrateur,
- responsabilité du calorimètre,
- responsabilité de l'électronique,
- responsabilité de la mécanique,
- responsabilité du détecteur BiPo,
- responsabilité de la radiopureté,
- responsabilité du software,
- analysis board,
- run coordinator,
- future strategy board.