



Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire

NEMO 3

Rapport de préthèse

Le détecteur NEMO 3 pour l'étude de la $\beta\beta 0\nu$

Bongrand Mathieu

Master 2 Physique Fondamentale et Appliquée

Spécialité Noyaux, Particules, Astroparticules et Cosmologie

2005

Résumé

Depuis l'idée du neutrino en 1930, la physique du neutrino ne manque pas de rebondissements et les découvertes sont chaque fois plus étonnantes. Aujourd'hui l'expérience NEMO 3 tente de répondre à une interrogation fondamentale : le neutrino est-il une particule de Majorana? Je présente ici l'expérience NEMO 3 dans son contexte phénoménologique et expérimental. J'explique ensuite mes motivations pour l'originalité de ce sujet de thèse, puis le déroulement et les objectifs de celle-ci au LAL. Je détaille également comment mon stage de préthèse va se dérouler. Enfin je propose une bibliographie commentée et décrit plus particulièrement deux articles.

Table des matières

1	Contexte général	1
1.1	Physique du neutrino	1
1.2	NEMO et la double désintégration bêta	2
2	Choix de la thèse	2
3	Présentation de l'équipe	4
3.1	L'équipe du LAL	4
3.2	Autres laboratoires	4
4	Présentation de la thèse	5
4.1	Le détecteur NEMO 3	5
4.2	Sujet spécificité et objectifs	7
4.2.1	Analyses avec le détecteur NEMO 3	7
4.2.2	R&D et SuperNEMO	8
4.3	Stage de préthèse	9
4.4	Bibliographie commentée	10
5	Perspectives professionnelles	11
6	Conclusion	11
A	Commentaires d'articles	13
A.1	Technical design and performance of the NEMO 3 detector	13
A.1.1	Description technique du détecteur	13
A.1.2	Performances du détecteur	15
A.1.3	Conclusion	16
A.2	Neutrinoless double beta decay and direct searches for neutrino mass	16
A.2.1	Désintégrations bêta, double bêta et oscillations	16
A.2.2	Neutrinos et cosmologie	17
A.2.3	Désintégrations bêta et mesure directe de masse	18
A.2.4	Perspectives expérimentales de double bêta	18
A.2.5	Conclusion	20

1 Contexte général

1.1 Physique du neutrino

L'histoire du neutrino débute avec l'étude de la désintégration bêta. C'est en 1914 que J. Cadwick mesure le spectre continu de l'électron émis par ce processus. Pour sauver le principe de la conservation de l'énergie, W. Pauli propose en 1930 l'émission d'une particule indétectable de spin $1/2$ et de masse nulle. Cette particule sera baptisée neutrino ν par E. Fermi en 1934 lorsqu'il développe sa théorie (dite de Fermi) pour la désintégration bêta. Il faut ensuite attendre 1956 pour la découverte expérimentale du neutrino par C. L. Cowan et F. Reines. Plus exactement ils découvrent l'antineutrino auprès de réacteurs nucléaires, ils utilisent la décroissance β inverse et mesurent la coïncidence entre l'annihilation du positron et la capture radiative du neutron. En même temps, et toujours avec ces neutrinos de réacteurs, R. Davis montre que $\nu \neq \bar{\nu}$. Avec une version plus grande de son premier détecteur il soulèvera en 1968 le problème du déficit des neutrinos solaires. En 1962, la comparaison entre les neutrinos émis par la désintégration β et ceux de la désintégration des pions démontre que $\nu_e \neq \nu_\mu$. Il faut noter la découverte expérimentale récente (2000) du ν_τ , ainsi que la largeur du Z^0 qui indique qu'il n'y a que 3 saveurs de neutrinos légers.

Aujourd'hui les connaissances sur les neutrinos sont très limitées pourtant il s'agit d'une particule élémentaire (tout comme les quarks et les leptons chargés) de masse nulle dans le modèle standard (SM). En 2002, l'explication du problème des neutrinos solaires par SNO¹, en utilisant le phénomène d'oscillation de saveur, a permis une grande avancée. Cependant, les paramètres de ces oscillations restent encore à déterminer complètement. On cherche également à préciser l'origine de ces oscillations : dans le vide, le Soleil ou la Terre. Les oscillations s'expliquent puisque les états propres de saveurs ne sont pas les états propres de masses (états physiques). C'est donc une piste vers une physique au-delà du SM, avec des neutrinos massifs. La mesure de la masse des neutrinos est donc un champ de recherche actuel. Enfin, le troisième problème ouvert est de savoir si le neutrino est une particule de Dirac (SM) ou de Majorana, auquel cas on aurait $\nu = \bar{\nu}$. Cette recherche s'inscrit également vers une physique au delà du SM (nous verrons pourquoi dans la section suivante) car le seul moyen expérimental favorable pour mettre en évidence cette nature Majorana du neutrino est l'étude de la double désintégration bêta sans émission de neutrinos : $\beta\beta 0\nu$.

On peut également noter que les neutrinos ont une importance fondamentale en astrophysique et en cosmologie. Par exemple, ils permettent d'obtenir des informations directes sur le coeur du Soleil. Les neutrinos permettent également de détecter une supernova avant qu'elle ne soit visible. Pour la cosmologie, les neutrinos sont candidats pour une partie de la masse manquante dans l'univers puisqu'ils font partie du fond diffus cosmologique (CMB). Les neutrinos sont également recherchés dans les rayons cosmiques d'ultra haute énergie (UHE).

¹Sudbury Neutrino Observatory

1.2 NEMO et la double désintégration bêta

La double désintégration bêta avec émission de neutrinos $\beta\beta 2\nu$ s'apparente à deux désintégrations bêta successives (FIG. 1). Elle se produit dans les noyaux pair-pair lorsque la désintégration bêta est énergétiquement impossible, ou fortement supprimée par des principes de conservation. Ceci s'explique avec les excès de masse : $\delta_a(A, Z) \leq \delta_a(A, Z + 1)$ mais $\delta_a(A, Z) \geq \delta_a(A, Z + 2)$. La réaction s'écrit alors : $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$ et le spectre en énergie continu correspond à un spectre à trois corps (FIG. 2). La $\beta\beta 2\nu$ a déjà été mise en évidence expérimentalement et représente une grande statistique dans l'expérience NEMO 3². Son étude reste cruciale, d'une part parce qu'elle représente le bruit de fond ultime pour le processus interdit, et d'autre part pour la détermination des éléments de matrice nucléaire.

La double désintégration bêta sans émission de neutrinos $\beta\beta 0\nu$, qui est un processus interdit par le SM, est extrêmement importante pour la physique du neutrino. Dans ce processus, un antineutrino droit est émis par la désintégration d'un nucléon puis absorbé en tant que neutrino gauche (FIG. 1), il n'y a donc pas émission de neutrino. La réaction s'écrit alors : $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$ et le spectre en énergie se manifeste par une raie (FIG. 2) à l'énergie $Q_{\beta\beta}$ de la réaction. On remarque que ce processus nécessite à la fois la violation du nombre leptonique de deux unités, que neutrino et antineutrino soient une même particule $\nu = \bar{\nu}$, et enfin des neutrinos massifs pour le changement de chiralité. L'introduction du terme de masse de Majorana interdit dans le cadre du SM ce processus par interaction V-A.

L'objectif principal de l'expérience NEMO 3 est la recherche de la $\beta\beta 0\nu$ par échange d'un neutrino léger massif que nous venons de décrire. Il est également possible de rechercher une transition $\beta\beta 0\nu$ vers l'état excité 2^+ qui implique le terme de masse de Majorana par interaction V+A, ou encore l'échange de particules supersymétriques. Enfin un troisième mécanisme peut contribuer à la $\beta\beta 0\nu$ par émission d'un Majoron M^0 (FIG. 1), c'est-à-dire le boson de Goldstone associé à la brisure spontanée de symétrie du nombre leptonique. Ce dernier n'est pas détectable mais le signal associé à ce processus serait caractérisé par un spectre en énergie à trois corps différent (FIG. 2). Pour les mesures, Le détecteur NEMO 3 permet de mesurer (ou de donner une limite) la période $T_{1/2}^{0\nu}$ du processus $\beta\beta 0\nu$ et d'en déduire la valeur (ou la limite) du terme de masse effectif de Majorana $\langle m_e \rangle$ jusqu'à 0.2 eV. Le détecteur NEMO 3 sera décrit complètement dans la SEC. 4.1, mais pour fixer les idées nous pouvons dire que le principe est la détection directe des deux électrons émis par les feuilles sources, grâce à un détecteur de traces et un calorimètre.

2 Choix de la thèse

Mon choix pour cette thèse s'est fait à la suite de mon stage de trois mois en maîtrise, au cours duquel j'ai eu un véritable contact avec l'équipe, l'expérience et le sujet de recherche.

²NEMO : Neutrino Ettore Majorana Observatory

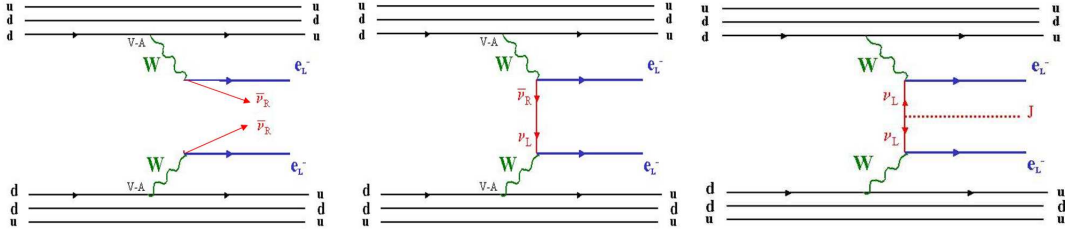


FIG. 1 – Graphes de Feynman associés aux différents processus de double désintégration bêta : $\beta\beta 2\nu$, $\beta\beta 0\nu$ et $\beta\beta M^0$

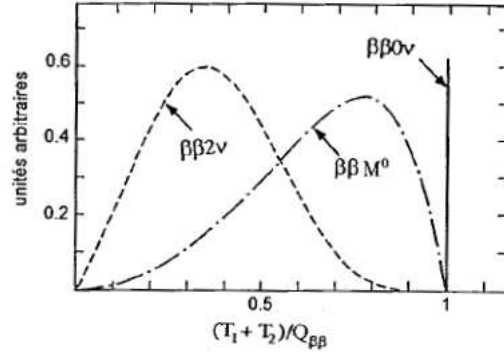


FIG. 2 – Spectre en énergie des 2 électrons attendu en fonction du processus de désintégration, où $Q_{\beta\beta}$ représente l'énergie maximale disponible dans la réaction, et T_i est l'énergie cinétique de l'électron i .

Avant ce stage, je ne connaissais pas le travail de chercheur en physique expérimentale des particules. J'y ai appris énormément de choses grâce aux personnes qui ont encadré mon travail. J'ai découvert la physique du neutrino et de l'interaction électrofaible, domaine qui m'a tout de suite particulièrement plu. Lors de la conférence internationale neutrino 2004 qui a eu lieu à Paris en juin dernier, j'ai pu comprendre l'intérêt fondamental de l'expérience NEMO 3 et l'importance des résultats que toute la communauté scientifique attend.

Ce qui m'a également beaucoup attiré, c'est le double aspect de cette thèse, avec une grande partie sur l'analyse des données de NEMO 3 (je rappelle que le détecteur prend des données depuis près de 2 ans et qu'une longue expérience a été acquise en près de 15 ans sur les différentes phases de NEMO) et une seconde partie portant plus sur l'aspect instrumental de la physique des particules, avec un projet de R&D pour les équipements nécessaires à la préparation du futur détecteur SuperNEMO. C'est donc un sujet qui propose tous les aspects d'une expérience de physique des particules, ce qui est très difficile aujourd'hui compte-tenu de l'envergure des expériences dans ce domaine (on peut penser au planning d'Atlas par exemple). A ceci s'ajoute mon intérêt pour une expérience "d'échelle humaine", tant sur la durée que sur le nombre de personnes impliquées.

3 Présentation de l'équipe

3.1 L'équipe du LAL

L'équipe NEMO du LAL³ comprend six membres permanents :

- S. Jullian, DRCE, physicien émérite à partir de septembre 2005, est le porte-parole de la collaboration internationale NEMO ; il est aussi directeur adjoint du LAL.
- D. Lalanne, DR1, est responsable du système de purification du radon, et coordinateur pour le projet européen ILIAS⁴, et notamment responsable du groupe JRA2 IDEA (Joint Research Activity 2 : Integrated double beta decay).
- G. Szklarz, DR1, s'occupe du fonctionnement du détecteur NEMO 3, du gaz du détecteur de traces et de la contamination en radon.
- C. Augier, Maître de conférences, écrit en ce moment le rapport technique de la collaboration et a en charge la prochaine publication sur l'analyse des résultats $\beta\beta 2\nu$ pour tous les isotopes présents dans NEMO 3. Elle a également des responsabilités importantes en enseignement et dans les conseils de la faculté d'Orsay et de l'université Paris-Sud.
- X. Sarazin, CR1, est le responsable du groupe NEMO du LAL, il s'occupe également du fonctionnement du détecteur, des interventions sur le site du LSM, et de l'analyse de données.
- L. Simard, Maître de conférence, est responsable de plusieurs analyses, et notamment par une méthode de maximum de vraisemblance en 3D pour la recherche de du signal $\beta\beta 0\nu$, ou encore pour les mesures du taux de radon dans le détecteur. Il est également enseignant à la faculté d'Orsay.

3.2 Autres laboratoires

Ma thèse ne s'arrêtera pas aux murs de LAL. En effet, j'aurai l'occasion de travailler avec de nombreuses personnes des différents laboratoires de la collaboration, que j'ai déjà pour certaines pu rencontrer durant mon stage de maîtrise.

C'est au LSM⁵ qu'est situé le détecteur NEMO 3 comme nous l'avons dit précédemment. Je serai régulièrement amené à me rendre là-bas et à travailler avec les permanents de ce laboratoire.

Un autre laboratoire français très impliqué dans l'expérience NEMO est le CENBG⁶ à Bordeaux. Ils sont plus spécialisés dans la calorimétrie et les mesures de radiopureté. Je serai donc en contact avec eux tant pour la partie R&D que pour les réflexions autour de SuperNEMO (voir SEC. 4.2.2).

³LAL : Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, bâtiment 200, Orsay

⁴ILIAS : Integrated Large Infrastructure for Astroparticule Science

⁵LSM : Laboratoire Souterrain de Modane, tunnel du Fréjus

⁶CENBG : Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan

Toujours pour les laboratoires français, le LPC⁷ de Caen est spécialisé dans le trigger et la simulation pour SuperNEMO. Le quatrième laboratoire est l'IREs⁸ de Strasbourg. Je serai amené à m'y rendre dès le début de mon stage afin de mettre au point la méthode d'analyse et les programmes nécessaires à l'analyse du processus $\beta\beta 2\nu$ (voir SEC. 4.3 pour plus de détails).

NEMO est principalement une collaboration franco-russe, un contact très étroit est donc privilégié entre les laboratoires français et les laboratoires russes : JINR⁹ de Dubna et ITEP¹⁰ de Moscou. Les échanges et déplacements sont très fréquents dans le cadre de cette collaboration. Je présenterai mes premiers résultats à Dubna en juillet au prochain NEMO meeting.

4 Présentation de la thèse

4.1 Le détecteur NEMO 3

Le détecteur NEMO 3 est installé au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM), sous 1 700 m de roches pour se protéger des rayonnements cosmiques. Pour reproduire le spectre présenté FIG. 2, le détecteur doit identifier les événements de type deux électrons issus d'un même vertex d'une source d'émetteur $\beta\beta$ et mesurer leurs énergies. Pour ce faire, le détecteur NEMO 3 est de forme cylindrique de 3 m de hauteur et 2.5 m de rayon (hors blindages) et divisé en 20 secteurs.

Le détecteur est composé de différents éléments :

- des feuilles sources verticales sont placées au centre de chaque secteur. Un secteur comporte sept bandes de source de 6 cm de large et 2.5 m de haut. Il existe des sources métalliques (la source est sous la forme d'une fine feuille métallique d'environ 50 μm d'épaisseur) et des sources composites (la source, sous forme de poudre, est mélangée à une colle et recouverte de deux feuilles de mylar, l'épaisseur totale avoisinant les 200 μm). Certains matériaux sont présents pour étudier une partie du bruit de fond (tellure naturel et cuivre), les autres sont des émetteurs $\beta\beta$ comme ^{116}Cd , ^{130}Te , ^{150}Nd , ^{96}Zr et ^{48}Ca , dont les faibles quantités permettront une bonne connaissance du processus $\beta\beta 2\nu$ mais pas forcément du processus interdit. On s'intéresse surtout au molybdène ^{100}Mo et au sélénium ^{82}Se , pour lesquels la grande masse présente dans le détecteur (respectivement 7 kg et 1 kg) devrait permettre une étude fine du processus $\beta\beta 0\nu$ en plus de celle du processus $\beta\beta 2\nu$.

- une chambre à fils permettant de déterminer les trajectoires des particules chargées. Elle regroupe 6 180 cellules Geiger et contient un mélange d'hélium (96%), d'éthanol, d'argon et

⁷LPC : Laboratoire de Physique Corpusculaire

⁸IREs : Institut de Recherches Subatomiques

⁹JINR : Joint Institute for Nuclear Research

¹⁰ITEP : Institute for Theoretical and Experimental Physics

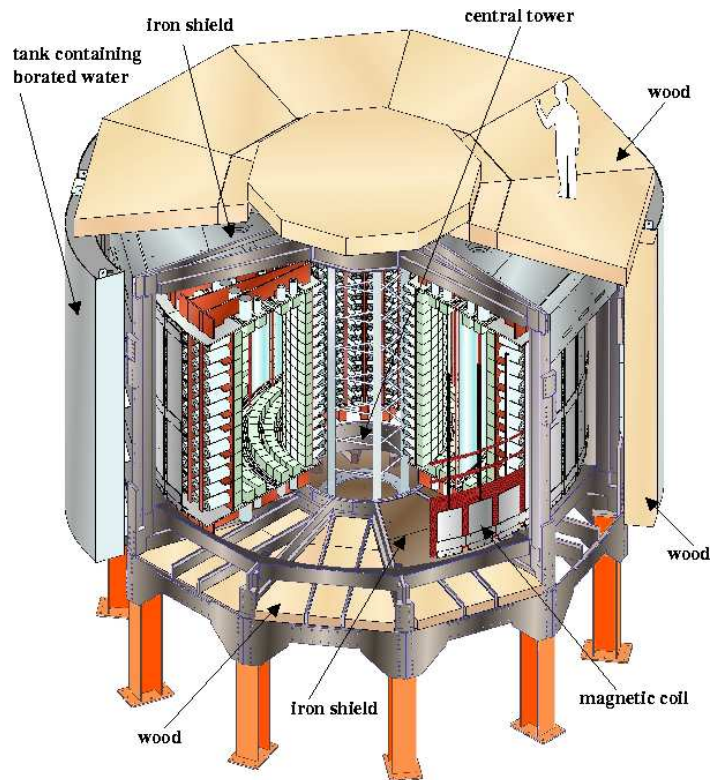


FIG. 3 – Vue d'ensemble du détecteur NEMO 3. A l'intérieur, on distingue en bleu clair les feuilles sources et en vert les scintillateurs avec leurs photomultiplicateurs.

d'eau. Une cellule Geiger est constituée d'un fil anodique entouré d'environ 8 fils de masse. Lorsqu'une particule chargée passe dans la cellule, elle ionise le gaz. Les électrons ionisés migrent vers le fil anodique et lorsqu'ils sont assez proches, un phénomène d'avalanches successives se produit et un plasma se propage le long de ce fil anodique. Ainsi la chambre à fils permet de reconstruire les positions transverse et longitudinale de passage de la particule sur chaque cellule excitée. Cette chambre à fils dispose d'une électronique retardée qui permet aussi l'identification des particules alpha émises dans la désintégration du ^{214}Bi (source de bruit de fond pour les processus $\beta\beta$).

- un calorimètre peut mesurer les énergies des particules jusqu'à 12 MeV et les temps de vol, sa résolution est de 15% (FWHM) en énergie et de 250 ps en temps, à 1 MeV. Il comporte 1 940 scintillateurs plastiques associés chacun à un photomultiplicateur basse radioactivité. Il faut noter que, bien que l'efficacité de détection d'un électron soit proche de 100%, celle d'un photon n'atteint que 50% à 1 MeV. Ceci est cependant suffisant pour l'expérience.

- une bobine de cuivre crée un champ magnétique dirigé verticalement vers le haut et optimisé à 25 Gauss. Ce champ permet de courber les trajectoires et d'identifier la charge électrique de la particule, notamment pour différencier électrons et positrons.

- enfin, un blindage de 18 cm de fer réduit le nombre de photons externes et absorbe les

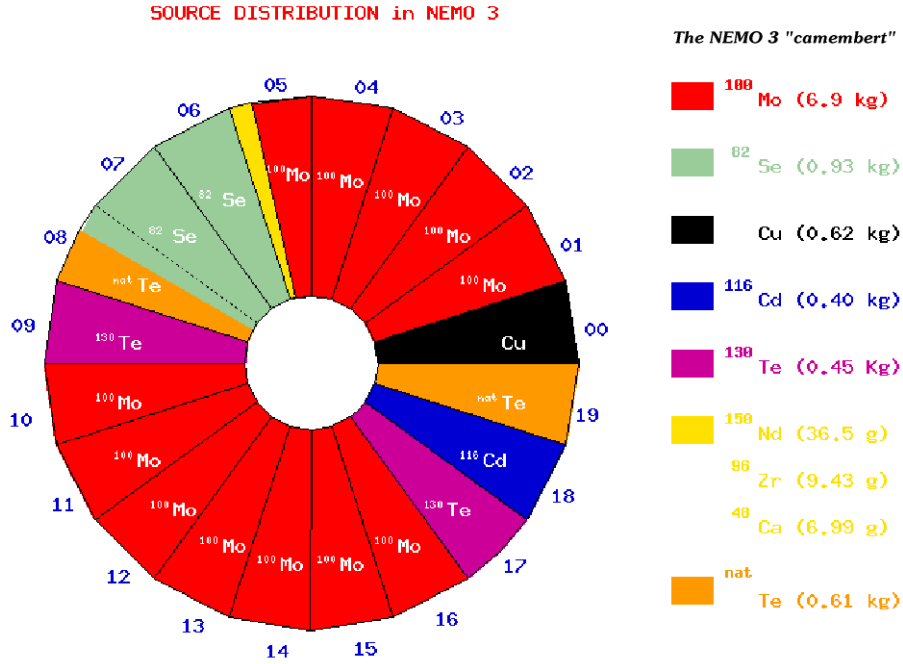


FIG. 4 – *Distribution des sources dans les 20 secteurs de NEMO 3*

neutrons thermiques ($E \approx 0.025$ eV) et épithermiques (d'énergie intermédiaire) résiduels, provenant de la thermalisation des neutrons rapides ($E > 1$ MeV) par des cuves d'eau borée de 30 cm d'épaisseur.

- récemment, une tente anti-radon a été installée tout autour du détecteur, car ce gaz réussissait à pénétrer à l'intérieur ce dernier. Les premières analyses avaient montré que ce bruit de fond était dominant dans la région de la 0ν . Il y a également une usine contenant du charbon actif afin de piéger le radon ce qui permet de filtrer l'air du laboratoire et c'est cet air purifié qui est envoyé à l'intérieur de la tente .

4.2 Sujet spécificité et objectifs

4.2.1 Analyses avec le détecteur NEMO 3

Comme nous l'avons montré dans la description générale du détecteur il y a différents type d'émetteurs $\beta\beta$ concernés par l'expérience. Aujourd'hui les études se concentrent principalement sur les 2 isotopes présents en grande quantité : le ^{100}Mo et le ^{82}Se . En effet, puisqu'ils sont présents avec une masse importante (7 kg et 1 kg respectivement) ils devraient permettre de mettre en évidence la $\beta\beta 0\nu$. Les autres isotopes n'ont pas une masse suffisante pour cela. Cependant leur intérêt se trouve dans les études de la $\beta\beta 2\nu$. Une partie de ma thèse consistera donc à l'étude complète d'un ou plusieurs de ces noyaux, étude incluant des limites sur les modes 0ν . Une analyse complète n'étant possible qu'après une compréhension fine de l'ensemble des bruits de fond provenant du détecteur (dits externes), comme de ceux internes aux sources $\beta\beta$. Il sera

nécessaire de poursuivre les analyses des bruits de fond du type de celles commencées pendant mon stage de maîtrise. Par exemple l'étude de la diffusion Möller¹¹ d'électrons émis par la source de ⁹⁰Sr dans la feuille de Mo. Ceci afin de vérifier si le processus correspond bien aux paramètres qui sont utilisés pour l'analyse des événements associés aux sources de ¹⁰⁰Mo. Entre les secteurs il existe des tubes de calibrations dans lesquels on peut introduire des tiges sur lesquelles des emplacements permettent de placer de petites sources radioactives. Ces tubes ont notamment servi à vérifier la reconstruction de la position des vertex. Durant mon stage de maîtrise j'ai eu l'occasion de me rendre au LSM pour tester la faisabilité de l'introduction dans ces tubes de calibration de fines feuilles de molybdène sur lesquels ont été déposées les sources de ⁹⁰Sr. Nous avons montré que l'étude était ainsi possible et nous avons pu estimer la durée nécessaire à la prise de données. Cette étude constituera une partie de mon travail d'analyse durant la thèse.

L'interprétation des résultats obtenus sur les processus de double désintégration bêta, tant permis $\beta\beta 2\nu$, qu'interdits $\beta\beta 0\nu$, nécessitera aussi d'approfondir mes connaissances en physique théorique : en physique nucléaire, pour comprendre les calculs d'éléments de matrice nucléaire qui interviennent dans la mesure des périodes des processus ; en physique des particules, pour lier les résultats $\beta\beta 0\nu$ aux autres calculs et mesures en physique du neutrino (paramètres d'oscillations, matrice de mélange, violation de CP dans le secteur des neutrinos, hiérarchie de masse, etc.).

4.2.2 R&D et SuperNEMO

La collaboration NEMO a su répondre à de grandes exigences pour la conception du détecteur NEMO 3. Aujourd'hui, son fonctionnement et ses performances sont conformes aux attentes et les analyses de données sont en cours, il ne manque plus que la statistique. C'est donc tout naturellement que la collaboration a commencé à réfléchir à la suite du projet. En démontrant leur savoir-faire, ils ont su attirer de nouveaux partenaires dans l'aventure de NEMO. Le projet SuperNEMO devrait donc s'enrichir de la collaboration de groupes anglais, japonais et américains. Une réflexion sur l'extrapolation des techniques tracko-calor de NEMO 3 pour un détecteur avec 100 kg d'émetteur $\beta\beta$ a commencé. Si le principe de sources minces et le système de tracking et calorimétrie de chaque côté des sources doit être conservé, la géométrie du détecteur sera totalement modifiée. Il sera toujours constitué de différents modules mais parallélépipédiques et indépendants au lieu d'être regroupés sur un même cylindre (FIG. 5). Ceci s'explique pour faciliter la construction et la maintenance, afin d'intervenir sur un secteur tout en continuant la prise de données avec les autres.

L'équipe du LAL pour le projet de R&D SuperNEMO sur les trois années à venir a pris en charge l'étude de l'électronique du système de tracking et de calorimétrie. L'équipe devra également s'occuper de la production des sources. Cette étape impliquera la conception de nouveaux détecteurs pour la mesure de la radiopureté puisque les détecteurs HPGe utilisés pour NEMO 3 ne sont plus assez sensibles. La chambre à fil, qui avait été réalisée par le LAL dans

¹¹L'effet Möller est la diffusion d'un électron du cortège électronique d'un atome par un autre électron.

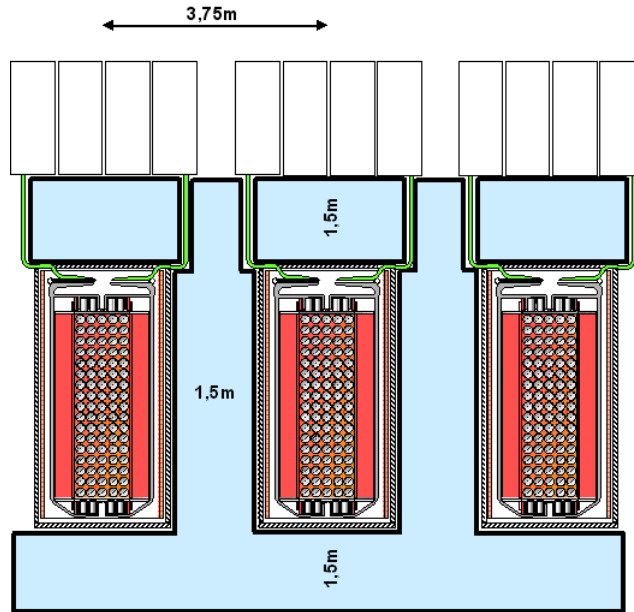


FIG. 5 – Vue de côté d’une géométrie possible pour le futur détecteur SuperNEMO. L’eau entoure tous les modules, en rouge sont représentés les scintillateurs avec leurs PM et les sources devraient être placées verticalement au milieu de chaque module.

NEMO 3, passe sous la responsabilité des nouveaux collaborateurs de Manchester. Cependant le LAL, compte-tenu de son expérience, conserve la possibilité d’étudier la faisabilité de remplacer les fils de masse en inox par des fils de masse en carbone, un numéro atomique Z plus faible permettant de diminuer les pertes en énergie des particules chargées traversant la chambre.

Je serai donc amené à travailler sur ces différents points de la R&D. Je devrai notamment développer des simulations (Géant 4 et C++), dont les analyses permettront de définir les paramètres du nouveau détecteur. Puisque la détermination de ces paramètres ne peut se faire sans les considérations de tous les aspects du détecteur, je devrai rester en contact avec les autres équipes afin de connaître leurs avancées sur ce projet de R&D.

4.3 Stage de préthèse

C. Augier, qui va diriger ma thèse, vient d’être chargée par la collaboration NEMO d’écrire la publication de référence sur le processus $\beta\beta 2\nu$ pour l’ensemble des noyaux présents dans le détecteur, sur la période de prise de données avec radon (février 2003-septembre 2004). Un groupe de travail composé de chercheurs qui vont pratiquer les analyses associées, sera formé d’ici fin avril. J’en ferai partie. Chaque noyau sera analysé par au moins deux personnes différentes. Je vais au cours de mon stage récupérer les derniers programmes de pré-reconstruction communs à tous les analystes et vérifier avec les autres membres du groupe un lot commun d’événements sur un run bien défini. Après toutes ces vérifications, il faudra reprocesser l’ensemble des données afin de sélectionner les types d’événements nécessaires aux analyses : $1 e^-$, $e^- \gamma$, $e^- \alpha$, $2 e^-$, ... Pour ce faire je serai amené à partir à Strasbourg, pour

une semaine, dès le début de mon stage afin de définir les points de départ de ces analyses (les programmes d'analyse utilisés actuellement au LAL étant différents de ceux utilisés à Strasbourg, il semble bien de disposer des deux programmes pour choisir ensuite le plus adapté à cette analyse).

J'aurai ensuite en charge l'étude complète des isotopes ^{150}Nd et/ou ^{96}Zr . Pour cela, je vais ainsi réaliser mes programmes d'analyse qui seront utilisés pour la suite de la thèse. Avec le groupe d'analystes, nous nous réunirons à Dubna du 11 au 13 juillet pour se mettre d'accord sur la méthode commune d'analyse pour l'étude de l'ensemble des noyaux. Les résultats de toutes ces analyses (chacun choisissant ses propres coupures) seront compilés pour la publication de la fin de l'année 2005, qui inclura donc mes premiers résultats. Pour remplir cette tâche et être dans les temps par rapport aux autres personnes faisant les analyses, je compte poursuivre mon stage en juillet et en septembre.

4.4 Bibliographie commentée

- **Technical design and performance of the NEMO 3 detector**, R. Arnold et al, Nucl. Inst. Meth. A536 (2005) 79-122. Cet article, après une présentation des objectifs de l'expérience NEMO donne une description complète du détecteur NEMO 3, ses caractéristiques, ses performances et ses limites. On y décrit les méthodes de reconstruction et les tests qui ont permis de déterminer les performances de NEMO 3. C'est l'article à lire pour comprendre le détecteur NEMO 3, une version en prépublication sous forme de rapport LAL était déjà disponible avant la publication dans NIM de cet article. Cet article est commenté en annexes SEC. A.1.

- **Neutrino Physics**, K. Zuber, IoP (2004). Ce livre paru en 2004 dresse un panorama complet de la physique du neutrino depuis ses débuts. L'auteur décrit les très nombreuses expériences de physique du neutrino, leurs résultats ainsi que leurs interprétations. Il explique également les théories qui correspondent aux connaissances et recherches actuelles.

- **Neutrinoless double beta decay and direct searches for neutrino mass**, Aalseth et al. American Physical Society Journal (2004). Deux américains membres de la collaboration NEMO ont pris part à la rédaction de cet article. On y traite des grandes questions actuelles sur les neutrinos : masse, oscillation et $\beta\beta$. L'article commence par les descriptions phénoménologiques et théoriques de ces questions, puis dresse un bilan des expériences et mesures actuelles pour enfin explorer les futures expériences, comme SuperNEMO par exemple. Cet article est commenté en annexe SEC. A.2.

- **First results**, X. Sarazin pour la collaboration NEMO, Neutrino 2004 (fichier powerpoint disponible à l'adresse hep-ex/0412012). Il s'agit de la présentation que X. Sarazin a fait à la conférence internationale Neutrino 2004 au Collège de France. Après la description générale du détecteur, il montre que les performances de NEMO 3 sont conformes aux attentes initiales.

Il présente ensuite les études de la $\beta\beta 2\nu$ et la recherche de la $\beta\beta 0\nu$. Lors de cette conférence Xavier a montré que la tente anti-radon avait permis la diminution d'un facteur 7 de ce bruit de fond.

- **Search for neutrinoless double beta decay with the NEMO 3 detector : first results**, X. Sarazin pour la collaboration NEMO, Nuclear Physics B 143 (2005) 221-224. C'est un article très court publié à la suite de la conférence Neutrino 2004. L'auteur présente les mesures de la $\beta\beta 2\nu$ avec NEMO 3, les études de bruit de fond et donne les premières limites posées pour la $\beta\beta 0\nu$, puisque ce processus n'a pas encore été mis en évidence.

5 Perspectives professionnelles

Etant depuis longtemps intéressé par l'enseignement (j'ai effectivement donné de nombreux cours particuliers et été professeur pour des stages intensifs de révisions), j'envisage de poser ma candidature à un monitorat. Si je ne suis pas accepté pour ce monitorat je chercherai des vacances dans les universités, à Orsay ou encore à Versailles où j'ai effectué mes études. J'envisage également de participer à une école d'été (au CERN par exemple) et je serai amené à participer à des conférences internationales. Cette thèse me préparera donc pleinement aux carrières de chercheur ou d'enseignant-chercheur.

Dans l'éventualité d'un post-doc ou d'un ATER, je vais développer des contacts nationaux avec les collaborateurs de Bordeaux, de Strasbourg et de Caen en particulier. Je vais également développer des contacts internationaux intéressants avec les nouveaux collaborateurs anglais et américains mais aussi par l'intermédiaire du projet européen de double bêta IDEA dans le cadre de SuperNEMO.

Enfin pour préparer une éventuelle réorientation professionnelle dans l'industrie, je participerai aux Doctoriales de l'UPS au moins une fois pendant ma thèse. Dans le cadre de la R&D de SuperNEMO, je serai aussi en contact avec l'entreprise Canberra-Eurisys Mesures pour le développement de nouveaux détecteurs bas bruit de fond pour l'étude des radiopuretés des sources. Les compétences informatiques (fortran, C++, Geant 4, etc.) que je vais acquérir en réalisant mes analyses et simulations seront également un atout. De même pour les compétences en électronique acquises dans le cadre de la R&D.

6 Conclusion

L'expérience NEMO 3 est basée sur la mesure directe des deux électrons émis par la double désintégration bêta des différents isotopes placés dans le détecteur. Nous avons vu que ce dernier utilise un calorimètre constitué de blocs de scintillateurs couplés à des PM basse radioactivité et d'une chambre à dérive constituée de cellules fonctionnant en régime Geiger. Nous avons vu

les enjeux théoriques pour la mesure du processus $\beta\beta 0\nu$ et la difficulté de sa mise en évidence, qui nécessite une expérience “zéro bruit de fond”. Nous avons également exprimé l’importance de l’étude de la $\beta\beta 2\nu$, qui peut être réalisée avec une grande statistique dans NEMO 3.

Je me suis ensuite appliqué à expliquer l’intérêt de ma thèse et des enjeux qu’elle présentait. J’ai montré mes choix pour la physique du neutrino et pour cette expérience en particulier, un choix bien considéré suite à un stage de maîtrise effectué dans l’équipe où je ferai ma thèse. Un des atouts de cette thèse est le double aspect analyse de données avec un détecteur qui fonctionne parfaitement et un programme de R&D en vue de réflexions sur l’expérience future SuperNEMO. J’aurai ainsi une vision complète d’une expérience de physique des particules. Dès le début de mon stage de préthèse, je serai impliqué dans une étude importante sur le processus $\beta\beta 2\nu$, en vue d’une publication de la collaboration en fin d’année 2005. Durant cette thèse je serai amené à développer de nombreux contacts nationaux et internationaux, avec des laboratoires, des entreprises et dans l’enseignement.

A Commentaires d'articles

A.1 Technical design and performance of the NEMO 3 detector

Publié dans Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 536 (2005) 79-122, R. Arnold et al.

L'article commence par une description rapide des objectifs de l'expérience que je ne répèterai pas ici (SEC. 1.2). Il y a ensuite une description générale du détecteur que j'ai déjà décrit dans (SEC. 4.1). Par contre, dans cette première partie d'introduction, il y a aussi la description des bruits de fond que je n'ai pas encore faite. La région d'énergie intéressante dans NEMO 3 est autour de 3 MeV, cette région est complètement dominée par la radioactivité naturelle. Il est donc nécessaire de bien connaître les bruits de fond de l'expérience, qui proviennent des chaînes de désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium, et qui vont se manifester à la fois de façon interne (contaminations des sources) ou externe (contaminations des PM, blindages, roches du laboratoire, neutrons, gammas de haute énergie, ...) aux feuilles sources d'émetteur double bêta présents dans le détecteur.

A.1.1 Description technique du détecteur

Dans un premier temps, l'article décrit les sources radioactives qui sont utilisées comme émetteur $\beta\beta$. On comprend aisément l'importance d'une bonne préparation de ces sources et on imagine les difficultés de purification de celles-ci. Les différents isotopes sont rappelés dans (SEC. 4), leur choix a été commandé par la valeur de $Q_{\beta\beta}$ (valeur de l'énergie disponible dans la réaction). En effet, dans les bruits de fond naturels dont on a parlé il y a la désexcitation du ^{208}Tl avec un γ de 2.615 MeV, les noyaux choisis doivent donc avoir une valeur de $Q_{\beta\beta}$ supérieurs à cette valeur (par exemple 3.035 MeV pour le ^{100}Mo). L'autre facteur important était l'abondance naturelle des isotopes (9.6 % pour le ^{100}Mo), trop faible dans chacun des cas, il y a donc eu une procédure d'enrichissement isotopique en Russie (90 % au minimum). On peut citer l'exemple intéressant de ^{48}Ca qui avec $Q_{\beta\beta} = 4.272$ MeV serait un isotope à choisir absolument du point de vue du bruit de fond, si son abondance naturelle n'était pas de 0.187 %. Cet isotope est tout de même présent dans NEMO 3, mais en très faible quantité puisque seulement 7 g ont pu être réalisés. Un soin tout particulier a évidemment été apporté à la radiopureté des sources, notamment en ^{214}Bi et ^{208}Tl . Il y a également des sources de cuivre et de tellure naturel très pures qui servent à l'étude des bruits de fond externes aux feuilles sources. Les sources sont disposées verticalement dans le détecteur avec 7 bandes par secteur, d'environ 2.5 m de haut, et 6.3 cm ou 6.5 cm de large. Dans cet article l'auteur décrit ensuite plus particulièrement les sources une à une.

On s'intéresse ensuite au calorimètre de NEMO 3, en plus de l'énergie des particules il mesure le temps de vol des particules et donne un signal de trigger. Nous avons déjà dit que ce calorimètre comporte 1940 scintillateurs plastiques, avec des PM pour des énergies allant

jusqu'à 12 MeV. Ces scintillateurs sont répartis sur les murs internes, externes, inférieurs et supérieurs du détecteur. Leur épaisseur est de 10 cm pour garantir une efficacité de détection de 50 % pour les photons sans perdre la transparence à la lumière de scintillation pour la résolution en énergie des électrons. Ces scintillateurs, tout comme les PM, répondent à des contraintes de radiopureté expliquées dans l'article. La transmission de lumière est de 75 % pour la longueur d'onde de 420 nm utilisée, et 98 % pour les guides de lumière. Avant leur installation sur murs et les pétales des secteurs, les scintillateurs ont été enrobés d'un film de Teflon et de mylar aluminisé sur leurs parois pour réfléchir la lumière de scintillation et augmenter la collection de lumière. Les résolutions du calorimètre sont finalement de 15 % (FWHM) et 250 ps à 1 MeV.

L'autre part importante du détecteur est le détecteur de traces, il est composé de rangées verticales de cellules de dérive fonctionnant en mode Geiger. La chambre à dérive est baignée dans un mélange d'hélium et d'alcool. Chaque cellule est composée d'un fil anodique central, d'un anneau de cuivre (cathode) à chaque extrémité et de 8 à 10 fils de masse (suivant la cellule). Lorsqu'une particule chargée traverse la cellule elle ionise le gaz, les électrons produits (6 électrons par cm) dérivent vers l'anode. La mesure de ce temps de dérive donne la position transverse de la particule initiale. Le fonctionnement en mode Geiger permet la propagation d'un plasma le long du fil anodique et la mesure des temps d'arrivée en haut et en bas de la cellule donne la position de passage vertical de la particule initiale. La chambre à trace est soumise à un champ magnétique de 25 G pour déterminer la charge de la particule d'après le sens de courbure. La réalisation du détecteur de trace a nécessité la production de 200 km de fil en acier inoxydable de 50 μm de diamètre.

Les deux systèmes que nous venons de décrire nécessitent un système électronique d'acquisition et de trigger. Il faut des alimentations haute tension pour les PM du calorimètre et pour le détecteur de traces. Lorsqu'un signal de PM dépasse le seuil (150 keV) une mesure de TDC et une fenêtre de 80 ns de mesure de charge s'ouvrent. A la fin de cette acquisition les données sont stockées et un système ADC 12 bits assure la conversion des signaux : 3 keV/canal pour la charge et 53 ps/canal pour les temps. Pour le détecteur de traces, lorsqu'un signal anodique dépasse le seuil, les signaux à recueillir sont envoyés vers 4 TDC chacun qui mesurent les temps anodique, cathodique bas, cathodique haut sur 12 bits sur 82 μs , ainsi qu'un signal retardé sur 17 bits pour les particules α sur 2.6 ms.

Dans une expérience telle que NEMO 3, dont la stabilité doit être assurée pour plusieurs années il faut prévoir un moyen de tester les performances du détecteur. Une première méthode de calibration consiste en l'introduction de sources dans les tubes de calibration dont nous avons déjà parlé. Cette opération n'est renouvelée que trois fois par an, avec des sources de ^{207}Bi et ^{90}Sr , compte tenu de la maintenance que cela demande. Par contre, un autre système permet une calibration plus rapide et plus simple, cette calibration est réalisée quotidiennement. Ce système de calibration laser a donc été intégré à NEMO 3. Ce système permet des calibrations en énergie et en temps par la correction de la mesure du pic d'émission du laser N_2

de longueur d'onde 337 nm, couplé à des mesures avec des PM de référence ayant une source de ^{207}Bi intégrée à leur guide de lumière. Les deux méthodes sont complémentaires.

L'article décrit ensuite les blindages autour du détecteur que j'ai déjà décrit dans (SEC. 4.1) : le blindage fer et le blindage d'eau surtout pour les neutrons. Il décrit aussi le champ magnétique qui permet de couper ce bruit de fond après acquisition puisque le neutron émet un photon après capture radiative qui se matérialise en paire e^+e^- que l'on peut alors différencier d'une paire e^-e^- .

A.1.2 Performances du détecteur

Afin de vérifier les performances du détecteur, celui-ci a été complètement simulé par un programme développé avec GEANT 3. La description géométrique et celle des 60 matériaux qui constituent le détecteur plus les différentes sources ont été intégrées au programme. Il y a également un programme générateur d'événements appelé GENBB qui permet de simuler les processus de $\beta\beta 0\nu$, les bruits de fond internes et externes. Par exemple, des comparaisons avec un run neutrons (une source de neutrons avait été placée dans la tour centrale du détecteur) ont permis de vérifier le programme tout en faisant des tests du détecteur, les résultats sont présentés dans l'article.

On regarde ensuite les performances du détecteur en acquisition $\beta\beta$, l'article compare les simulations avec les efficacités pour déterminer les paramètres du trigger. Ensuite on cherche à déterminer les proportions de chaque type d'événement pendant une période d'acquisition, tenant compte du fait que les particules détectées avec NEMO 3 sont des électrons, des positrons, des photons et des particules α . L'auteur montre des événements et explique ce qui permet d'identifier chaque particule dans le détecteur. Les e^+ et e^- laissent une trace (reconstruite) dans la chambre à dérive qui est associée au scintillateur touché, la courbure de la trace donne le signe de la charge électrique. Les particules α font une trace très courte (20 cm) et ne touchent donc pas de scintillateurs. Enfin, les photons ne laissent pas de trace mais activent un ou deux scintillateurs adjacents.

Enfin l'article explique la reconstruction des événements et la qualité de celle-ci avec les résolutions et les tests effectués. Un algorithme connecte par paires les cellules activées par la particule chargée et reconstruit une trace optimisée en deux étapes pour tenir compte du champ magnétique. Il faut ensuite associer la trace au scintillateur touché et on extrapole la position de l'impact sur le bloc. En comparant les positions de la trace reconstruite et du point d'impact dans la cellule on peut déterminer la résolution de cette reconstruction : 0.5 mm en transverse et 0.8 cm en longitudinal en moyenne. A partir de la trace on détermine, par extrapolation, la position du vertex dans la feuille source. Pour tester cette reconstruction on utilise les tubes de calibration dans lesquels on place des sources de faible dimension en des coordonnées précises. On détermine alors des résolutions de 0.6 cm en transverse et 1.0 cm en longitudinal en moyenne.

Enfin, l'article présente les performances du calorimètre, avec notamment les résolutions en énergie de 6.1% pour les PM 5" et 7.3% pour les PM 3".

A.1.3 Conclusion

Cet article présente les caractéristiques techniques du détecteur NEMO 3 de type tracko-calor. L'auteur explique méthodiquement les problèmes auxquels il a fallu faire face pour obtenir les performances souhaitées. On a vu l'importance de la préparation des sources, de la radiopureté des matériaux, du blindage, de la compréhension des bruits de fond ... Il montre comment les paramètres ont été optimisés pour la mesure de 2 électrons d'énergie autour de 3 MeV. On fait enfin le bilan des performances après construction et l'on détaille les tests qui ont été réalisés. Cette article fait donc le bilan de toute la construction et montre que le détecteur NEMO 3 fonctionne comme prévu et laisse place à la période de prise de données nécessaire pour répondre aux questions de physique.

A.2 Neutrinoless double beta decay and direct searches for neutrino mass

Publié dans le journal de l'American Physical Society (APS) en 2004, par Aalseth et al.

Cet article a été écrit après une réunion des membres de l'APS travaillant sur la double désintégration bêta et la masse des neutrinos. Comme introduction les auteurs montrent que la physique du neutrino offre des pistes extrêmement nombreuses vers la physique au delà du modèle standard. Ils expliquent également l'importance des neutrinos en cosmologie, qui n'est plus aujourd'hui la source dominante de matière noire dans l'univers mais qui reste à considérer. Malgré ses triomphes récents, la physique du neutrino pose encore des questions fondamentales : les neutrinos sont-ils leurs propres anti-particules ? Quelles sont les masses des neutrinos ? Y a-t-il violation de CP dans le secteur des neutrinos ? Les neutrinos sont-ils la clé de la compréhension de l'asymétrie matière-antimatière dans l'univers ? Que peuvent nous apprendre les neutrinos sur les propositions de nouveaux modèles de physique ? Le groupe de travail participant à la rédaction de cet article n'est en mesure de tenter de répondre qu'aux deux premières questions.

A.2.1 Désintégrations bêta, double bêta et oscillations

La première partie de l'article s'intéresse aux oscillations des neutrinos et aux désintégrations β et $\beta\beta 0\nu$. Le principe des oscillations de neutrinos est basé sur le fait que les états propres de saveurs (ν_e, ν_μ, ν_τ) ne sont pas les états propres de masses (ν_1, ν_2, ν_3), qui sont les états physiques. On a donc une superposition cohérente de ces états : $|\nu_l\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{li} |\nu_i\rangle$, la matrice de mélange U étant unitaire. On montre facilement que la probabilité de changement de faveur

est donnée par la formule suivante : $P(\nu_l \rightarrow \nu_{l \neq i}) = \sin^2 2\theta \sin^2[1.27 |\Delta m_{ji}^2|(eV^2) \frac{L(km)}{E_\nu(GeV)}]$ qui fait intervenir la différence du carré des masses (ce qui suggère que les neutrinos sont massifs). Les oscillations ont été mise en évidence par l'étude des neutrinos solaires. Si le déficit de neutrinos solaire est observé depuis 1960, avec l'expérience Chlorine, il aura fallu attendre l'expérience SNO pour comparer le flux de ν_e au flux total de neutrinos solaires. Les paramètres de ces oscillations sont encore à déterminer, notamment au niveau de la matrice de mélange. L'article montre ensuite les mesures que l'on peut faire avec les désintégrations β et $\beta\beta 0\nu$ tant sur les états propres de saveur que de masse.

On s'intéresse ensuite plus précisément à la $\beta\beta 0\nu$, l'article montre l'enjeu de la violation du nombre leptonique et présente d'autres alternatives à l'échange d'un neutrino de Majorana massif. Dans ce processus, on est sensible à un terme de masse effectif par l'intermédiaire de la durée de demi-vie : $[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu} |M_{0\nu}|^2 < m_\nu >^2$, les termes sont dans l'ordre : le facteur de phase, les éléments de matrice nucléaire et la masse effective du neutrino pour ce processus. Ce dernier peut être relié aux masses des ν_i . Il se pose alors le problème de la hiérarchie des masses avec le graphe bien connu de la masse effective en fonction de la masse minimum des ν_i .

Comme nous venons de le montrer, l'observation de la désintégration $\beta\beta 0\nu$, indiquerait immédiatement que les neutrinos sont des particules de Majorana et nous permettrait d'estimer leurs échelles de masse. Mais pour atteindre des conclusions sur les masses et la hiérarchie, il nous faut des calculs précis des éléments de matrice nucléaire. Pour tester ces calculs, il faut recourir à la $\beta\beta 2\nu$ et aux désintégrations bêta. Il y a deux méthodes principalement utilisées : calculer à partir d'une méthode de type QRPA¹² ou à partir du modèle en couches. Le point de départ est un déterminant de Slater des nucléons indépendants, ensuite les méthodes de corrélations sont différentes. Dans la QRPA, on considère un grand nombre de nucléons actifs dans un grand espace. Par contre, dans le modèle en couches, on ne considère qu'une faible partie du nucléon dans un espace limité. Ces approches différentes conduisent à des résultats à peu près similaires.

A.2.2 Neutrinos et cosmologie

La seconde partie, nettement plus courte, cherche à montrer ce que la cosmologie peut nous apprendre sur la masse des neutrinos. Nous avons déjà dit que les neutrinos constituaient une fraction importante de la matière noire qui influence l'évolution de l'univers. La détermination de la contribution des neutrinos est capitale pour la compréhension de la formation des grandes structures. Les études cosmologiques se font par exemple sur les fluctuations du fond diffus cosmologique (CMB), pour lequel WMAP donne une limite : $m_\nu < 0.27$ eV avec une évidence de masse non nulle. Cependant la mesure directe de ces neutrinos reliques du CMB n'est même

¹²QRPA : Quasiparticle Random Phase Approximation

pas envisageable dans un futur proche puisque leur énergie est de l'ordre du μeV . Du point de vue astrophysique, la masse des neutrinos est également très importante pour la dynamique des supernovae et pour la physique des rayons cosmiques de ultra haute énergie.

A.2.3 Désintégrations bêta et mesure directe de masse

Ensuite l'article traite de la mesure directe de la masse des neutrinos par la désintégration bêta. Du point de vue théorique il y a plusieurs manières de rendre les neutrinos massifs : le mécanisme du see-saw, la supersymétrie ou encore un modèle de Higgs étendu. La compréhension théorique de la faible masse des neutrinos est importante pour la compréhension de la masse des fermions en général. Pour la mesure directe de la masse des neutrinos, il y a deux méthodes expérimentales : l'étude de la distribution de la désintégration bêta et des désintégrations de particules ou la mesure du temps de vol dans la détection des neutrinos de supernova. Cependant l'étude de la désintégration bêta est la meilleure méthode puisqu'elle ne dépend pas de contraintes théoriques. Les meilleurs résultats sont obtenus par l'étude de la queue de distribution de la désintégration bêta. Les auteurs présentent la future expérience KATRIN¹³ visant la mesure de la distribution de la désintégration bêta du tritium avec une sensibilité au sub-eV de la masse du neutrino électronique.

A.2.4 Perspectives expérimentales de double bêta

La dernière partie de l'article, qui occupe une part importante de celui-ci, traite des perspectives expérimentales pour la $\beta\beta 0\nu$. C'est évidemment la partie qui nous intéresse le plus dans cet article, on y parle des futures expériences et notamment de SuperNEMO. L'intérêt est donc de placer ce projet face aux autres avancées et idées. Il est désormais nécessaire d'obtenir une évidence indiscutable du processus (certains résultats très controversés ont déjà été présentés). Les futures expériences doivent donc soigner le rapport signal sur bruit pour avoir un résultat à 5σ dans le cas d'une mesure d'un signal, puisque les résultats à 2σ ne permettent pas de conclure. Les expériences de type tracko-calorimètre, capables de reconstruire entièrement l'événement, ont un net avantage dans ce domaine. Par contre, elles ont en général une résolution en énergie moins bonne.

L'article présente un tableau récapitulatif des expériences, que je reproduis ci-dessous (TAB. 6). Je ne présenterai pas ici toutes les expériences dont il est fait référence dans l'article. Je m'attacherai plus précisément aux projets européens puisque la collaboration NEMO est membre du réseau ILIAS et notamment du groupe IDEA sur la $\beta\beta$. Les auteurs montrent que les détecteurs qui doivent être construits de nos jours nécessitent 100 kg d'isotopes pour obtenir une réponse dans un délai raisonnable. Ils estiment également que le bruit de fond doit être inférieur à 0.5 événements par kg d'isotope et par an dans la fenêtre en énergie associée au processus $\beta\beta 0\nu$.

¹³KATRIN : The KARlsruhe TRItium Neutrino project

Collaboration	Isotope (kmol)	Anticipated Background (counts/y)	Detector Description
CAMEO[137]	^{116}Cd (2)	few/year	CdWO ₄ crystals in liq. scint.
CANDLES[139]	^{48}Ca (0.04)		CaF ₂ crystals in liq. scint.
COBRA[140]			CdTe semiconductors
CUORE[141]	^{130}Te (1.4)	$\approx 60/\text{y}$	TeO ₂ bolometers
DCBA[142]	^{82}Se (2)	$\approx 40/\text{y}$	Nd foils and tracking chambers
EXO[143]	^{136}Xe (4.2)	$< 1/\text{y}$	Xe TPC,
GEM[144]	^{76}Ge (11)	$\approx 0.8/\text{y}$	Ge detectors in LN
GENIUS[145]	^{76}Ge (8.8)	$\approx 0.6/\text{y}$	Ge detectors in LN
GSO[147, 148]	^{160}Gd (1.7)		Gd ₂ SiO ₅ crystals in liq. scint.
Majorana[149]	^{76}Ge (3.5)	$\approx 1/\text{y}$	Segmented Ge detectors
MOON[150]	^{100}Mo (2.5)	$\approx 8/\text{y}$	Mo foils and plastic scint.
MPI bare Ge[151]	^{76}Ge (8.8)		Ge detectors in LN
Nano-crystals[152]	≈ 100 kmol		suspended nanoparticles
Super-NEMO[153]	^{82}Se (0.6)	$\approx 1/\text{y}$	foils with tracking
Xe[154]	^{136}Xe (6.3)	$\approx 118/\text{y}$	Xe dissolved in liq. scint.
XMASS[155]	^{136}Xe (6.1)		liquid Xe

FIG. 6 – Récapitulatif des expériences futures proposées pour la $\beta\beta 0\nu$. On donne les estimations de bruit de fond et les quantités d’isotopes nécessaires.

CUORE

L’expérience CUORE¹⁴ utilise une technique de détecteur cryogéniques (bolomètres). Les absorbeurs de ces détecteurs sont, dans ces conditions de basse température, sensibles à l’énergie libérée par une simple désintégration radioactive. On utilise des blocs d’environ 1 kg de TeO₂ et la mesure de l’énergie passe par des thermistors en germanium, ayant une très grande résolution. Il n’y a pas besoin d’enrichissement des cristaux puisqu’il y a déjà une abondance naturelle en ^{130}Te de 34%. Aujourd’hui le prototype CUORICINO est situé dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso et comporte 44 cristaux. Les résultats de ce prototype sont déjà très bons, l’extension vers CUORE est donc en route, cette version comportera un total de 1000 cristaux.

GERDA

La collaboration issue du groupe du Max Plank Institute d’Heidelberg et utilisant la proposition d’expérience GENIUS, prépare une expérience avec une tonne de germanium enrichi sous forme de barres plongées dans de l’azote liquide. En limitant les supports, ils cherchent à limiter les bruits de fond d’origine externe. Cette collaboration souhaite s’investir dans ce projet de plus grande envergure pour confirmer ou infirmer le résultat d’Heidelberg-Moscou. Une première mesure avec 40 kg de germanium enrichi provenant de HM et IGEX devrait être réalisée rapidement. Ce prototype de l’expérience est en train d’opérer pour démontrer la faisabilité de la stratégie retenue.

SuperNEMO

Contrairement à la majorité des expériences, les sources de NEMO 3 ou de SuperNEMO ne sont pas leur propre détecteur. Le principe est de placer un détecteur de traces et un calorimètre

¹⁴CUORE : Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

de chaque côté de feuilles sources très fines. Avant SuperNEMO, une autre phase de NEMO 3 est déjà prévue (après les 5 ans de prises de données actuelles) avec 20 kg de ^{82}Se à la place des sources actuelles. L'intérêt est déjà le coût réduit, puisqu'on réutilise un détecteur qui fonctionne déjà et ensuite la durée de vie du processus $\beta\beta 2\nu$ pour le ^{82}Se est de l'ordre de 10 fois celle du ^{100}Mo ce qui entraîne moins de bruit de fond. L'article décrit le problème du radon qui a diffusé à l'intérieur du détecteur et qui n'avait pas été prévu. Mais il montre ensuite que le détecteur a atteint les performances attendues notamment au niveau de ce bruit de fond. Le projet SuperNEMO sera donc une version conservant la même stratégie mais avec 100 kg d'isotopes. Par contre, le détecteur devra être placé ailleurs que dans le Laboratoire Souterrain de Modane qui ne pourra pas accueillir une version plus grande (sauf en cas d'extension du tunnel).

A.2.5 Conclusion

Cet article montre que les principales sources d'informations pour la recherche de la masse des neutrinos se trouvent dans les études de désintégrations bêta et double bêta. Les auteurs ont résumé les intérêts majeurs de l'étude de la masse des neutrinos tant du point de vue théorique qu'expérimentale. Enfin ils consacrent une grande partie de l'article aux expériences et techniques, actuelles ou futures, qui vont permettre de répondre aux questions fondamentales de la physique du neutrino.