

Study of ^{208}Tl background rejection influence on the $0\nu\beta\beta$ decay sensitivity Characterisation of SuperNEMO demonstrator calorimeter timing performance

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'Université Paris Saclay au sein du Laboratoire Irène-Joliot Curie
(anciennement Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire)

École doctorale n°576 Particles, Hadrons, Energy, Nuclei,
Instrumentation, Imaging, Cosmos et Simulation (PHENIICS)
Spécialité de doctorat : Physique des particules

Thèse présentée et soutenue à Orsay, le 11 décembre 2020, par

CLOÉ GIRARD-CARILLO

Composition du Jury :

Alessandra Tonazzo
APC - Paris

Rapporteure

Mark C. Chen
Queen's University

Rapporteur

Christine Marquet
CENBG - Bordeaux-Gradignan

Examinatrice

Achille Stocchi
IJCLab - Orsay

Examineur

Laurent Simard
IJCLab - Orsay

Directeur de thèse

Mathieu Bongrand
IJCLab - Orsay

Co-directeur de thèse

Contents

Acknowledgement	3
Contents	5
Introduction	9
1 Phenomenology of particle physics and experimental status	11
1.1 The Standard Model of particle physics	11
1.1.1 Particle content	12
1.1.2 Where the Standard Model ends	13
1.2 Going beyond the Standard Model with neutrinos	14
1.2.1 Neutrino flavors and oscillations	14
1.2.2 Neutrino masses and nature	16
1.2.3 Double beta decays	23
1.3 $0\nu\beta\beta$ experimental status	26
1.3.1 Experimental design criteria	26
1.3.2 $0\nu\beta\beta$ direct search experiments	27
1.3.3 Bolometers	29
1.3.4 Time projection chambers	30
1.3.5 Liquid scintillators	32
1.3.6 Tracking calorimeters	34
1.3.7 Summary	35
1.4 Conclusion	35
2 The SuperNEMO demonstrator	37
2.1 The SuperNEMO technology	38
2.1.1 Detection principle	38
2.1.2 The source foils	40
2.1.3 The tracker	43
2.1.4 The calorimeter	47
2.1.5 Interaction of particles in the SuperNEMO scintillators	52
2.1.6 The magnetic coil and the shieldings	53
2.1.7 Calibration strategy	56

2.1.8	Detector cabling	58
2.1.9	Electronics	58
2.1.10	Detector gas tightness	61
2.2	Backgrounds	63
2.2.1	Internal background	63
2.2.2	External background	66
2.2.3	Radon background	67
2.2.4	Background reduction	68
2.3	The SuperNEMO software	69
2.3.1	Simulation	69
2.3.2	Reconstruction pipeline	69
2.3.3	Analysis tools	70
2.4	Summary	73
3	Sensitivity of the SuperNEMO experiment to the $0\nu\beta\beta$	75
3.1	The $0\nu\beta\beta$ signal and background model	75
3.1.1	The $0\nu\beta\beta$ signal	76
3.1.2	Inside detector backgrounds	76
3.1.3	External backgrounds	77
3.1.4	Expected number of decays	77
3.2	Event selection	78
3.2.1	Electron definition	78
3.2.2	Total energy spectrum	79
3.3	Demonstrator sensitivity to the $0\nu\beta\beta$ decay of ^{82}Se	81
3.3.1	Sensitivity to the $0\nu\beta\beta$ half-life	81
3.3.2	Limit on the effective neutrino mass	82
3.4	Impact of sources contamination levels on the sensitivity	84
3.4.1	Contamination levels	84
3.4.2	Optimisation of event selection	87
3.5	Impact of the magnetic field on the sensitivity	93
3.5.1	Simulations of the magnetic field	93
3.5.2	Impact of the magnetic field on signal and background selections	93
3.5.3	Influence of the magnetic field on optical modules and reconstruction efficiency	95
3.5.4	Simulations with a non-uniform magnetic field	97
3.6	Searching for the ^{150}Nd $0\nu\beta\beta$ decay	98
3.6.1	Searching for the $0\nu\beta\beta$ of other isotopes	99
3.6.2	Sensitivity to the $0\nu\beta\beta$ of ^{150}Nd	99
3.7	The final detector sensitivity	101
3.8	Conclusion	102
4	Improvement of the internal ^{208}Tl background rejection	105
4.1	Motivations	105
4.2	The internal ^{208}Tl background	106
4.2.1	The internal conversion process	106
4.2.2	^{208}Tl disintegrations in the 2e channel	108

4.3	Simulated demonstrator performances	108
4.4	Analysis tools to describe the ^{208}Tl internal background	110
4.4.1	The internal probability	110
4.4.2	The exponential probability	112
4.5	Event selection	115
4.5.1	Energy selection	115
4.5.2	Time-of-flight cut-off	115
4.5.3	Probability cut-off	117
4.5.4	Influence of the calorimeter time resolution	120
4.6	Impact of ^{208}Tl rejection on the experiment's sensitivity	121
4.6.1	Sensitivity results	123
4.6.2	Expected number of background	125
4.7	Conclusion	126
5	Calorimeter commissioning	129
5.1	Optical modules calibration	129
5.1.1	Pulse shape studies	129
5.1.2	Baseline studies	130
5.1.3	Gain studies	130
5.1.4	Energy calibration	131
5.2	Light Injection System	132
5.3	Calorimeter cabling network	134
5.3.1	Motivations	134
5.3.2	Experimental setup	135
5.3.3	Pulse shape analysis	136
5.3.4	Pulse timing	137
5.3.5	Signal attenuation	143
5.3.6	Summary	144
5.4	Synchronisation of calorimeter FEBs	145
5.5	Conclusion	147
6	Characterisation of the calorimeter time resolution	149
6.1	Time response of optical modules	149
6.1.1	Scintillator time dispersion	150
6.1.2	Photomultiplier time dispersion	152
6.2	Description of ^{60}Co nucleus	152
6.3	Experimental design	153
6.3.1	Setting up the experimental design	153
6.3.2	Simulations and analysis pipelines	154
6.4	Signal events selection	155
6.5	Energy calibration	157
6.6	Background estimation	158
6.6.1	Types of background	159
6.6.2	Background characterisation	160
6.7	Determination of the optical modules timing resolution	163
6.7.1	Time difference distributions	164
6.7.2	Coupled time uncertainties	165

6.7.3 Decoupling the Σ_t uncertainties	166
6.8 Conclusion	168
Conclusion	169
Résumé	171
Bibliography	173

Bibliography

- [1] Fermi E. Tentativo di una teoria dei raggi ? *La Ricerca Scientifica*, 1933.
- [2] Pontecorvo B. Mesonium and antimesonium. *Soviet Phys. JETP*, 1958.
- [3] Fukuda Y. et al. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Phys.Rev.Lett.*, 81:1562–1567.
- [4] F. Capozzi et al. Status and prospects of global analyses of neutrino mass-mixing parameters. *Journal of Physics: Conference Series*, 888:012037, sep 2017.
- [5] Giunti C. and Kim C. W. *Fundamentals of neutrino physics and astrophysics*. Oxford, 2007.
- [6] Minkowski P. $\mu \rightarrow e\gamma$ at a rate of one out of 109 muon decays? *Physics Letters B*, 67:421–428, 1977.
- [7] Ernest M. Pathways to naturally small neutrino masses. *Physical Review Letters*, 81:1171, 1998.
- [8] Marshak R. and Mohapatra R. Invited talk given at orbis scientiae, 14-17 Jan 1980.
- [9] Drewes M. The phenomenology of right handed neutrinos. *International Journal of Modern Physics E*, 22, 2013.
- [10] Goeppert-Mayer M. Double beta-disintegration. *Physical Review*, 48:512, 1935.
- [11] Dell’Oro S. et al. Neutrinoless double beta decay: 2015 review. *Advances in High Energy Physics*, 2016:37, 2015.
- [12] Furry W.H. On transition probabilities in double beta-disintegration. *Physical Review*, 56:1184, 1939.
- [13] S.I. Alvis et al. Search for neutrinoless double-beta decay in ^{76}Ge with 26 kg-yr of exposure from the majorana demonstrator. *Phys. Rev. C*, 100, 2019.

- [14] G. et al Anton. Search for neutrinoless double- β decay with the complete exo-200 dataset. *Phys. Rev. Lett.*, 123:161802, Oct 2019.
- [15] J.J. et al Gomez-Cadenas. The next experiment. *Phys. Rev. Lett.*, pages 1732–1739, Apr-Jun 2016.
- [16] A. Gando et al. Search for majorana neutrinos near the inverted mass hierarchy region with kamland-zen. *Phys. Rev. Lett.*, 117:082503, Aug 2016.
- [17] M. Agostini et al. Probing majorana neutrinos with double- β decay. *Science* 365, 1445, 2019.
- [18] O. Azzolini et al. First result on the neutrinoless double- β decay of ^{82}Se with cupid-0. *Phys. Rev. Lett.*, 120:232502, Jun 2018.
- [19] C. Alduino et al. First results from cuore: A search for lepton number violation via $0\nu\beta\beta$ decay of ^{130}Te . *Phys. Rev. Lett.*, 120:132501, Mar 2018.
- [20] J. B. Albert et al. Search for neutrinoless double-beta decay with the upgraded exo-200 detector. *Phys. Rev. Lett.*, 120:072701, Feb 2018.
- [21] Chopra A. C0 commissioning results. Internal presentation, 2015.
- [22] Cerna C. Tracker review conclusions. Internal presentation, 2014.
- [23] Estar database (nist). <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>.
- [24] A. Huber. *Recherche de la nature du neutrino avec le détecteur SuperNEMO : Simulations optiques pour l’optimisation du calorimètre et performances attendues pour le ^{82}Se* . PhD thesis, Université Bordeaux, 2017.
- [25] Xcom database (nist). <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.
- [26] S. Clavez. *Development of reconstruction tools and sensitivity of the SuperNEMO demonstrator*. PhD thesis, Université Paris Sud, 2017.
- [27] Garrido X. Bongrand M. Hamamatsu 8” pmt test in magnetic shield. Internal presentation, 2014.
- [28] Loaiza P. Source foils measurement with bipo. Internal presentation, 2017.
- [29] Perrot F. Radiopurity measurements for 8” pmts and preliminary budget for the sn demonstrator. Internal presentation, 2017.
- [30] Arnold R. et al. Technical design and performance of the nemo3 detector. *Nucl. Instrum. Meth. A*, pages 79–122, 2005.
- [31] R. Arnold et al. Results of the search for neutrinoless double- β decay in ^{100}mo with the nemo-3 experiment. *Phys. Rev. D*, 2015.

-
- [32] Xin Ran Liu. Radon mitigation strategy and results for the supernemo experiment. IoP APP / HEPP Conference, 2018.
- [33] R. Arnold et al. Probing new physics models of neutrinoless double beta decay with supernemo. *Eur. Phys. J. C*, 2010.
- [34] R. Arnold et al. Final results on ^{82}se double beta decay to the ground state of ^{82}kr from the nemo-3 experiment. *Eur. Phys. J. C*, 2018.
- [35] Cousins D. Feldman G. A unified approach to the classical statistical analysis of small signals. *Phys.Rev.*, pages 3873–3889, 1999.
- [36] J. Kotila and F. Iachello. Phase-space factors for double- β decay. *Phys. Rev. C*, 85:034316, Mar 2012.
- [37] Dong-Liang Fang, Amand Faessler, Vadim Rodin, and Fedor Šimkovic. Neutrinoless double- β decay of deformed nuclei within quasiparticle random-phase approximation with a realistic interaction. *Phys. Rev. C*, 83:034320, Mar 2011.
- [38] A. Chapon. *Mesure des processus de double désintégration bêta du Mo vers l'état excité 0_1^+ du Ru dans l'expérience Nemo3, Programme de R&D SuperNEMO : mise au point d'un détecteur BiPo pour la mesure de très faibles contaminations de feuilles sources*. PhD thesis, Université Caen Basse-Normandie, 2011.
- [39] Snow S. A magnetic field map for the tracker. Internal presentation, 2015.
- [40] A. Pin. *Recherche de la nature du neutrino via la décroissance double bêta sans émission de neutrinos. Caractérisation et optimisation du calorimètre SuperNEMO et impact sur la recherche de la décroissance du ^{82}Se Développement du premier prototype LiquidO*. PhD thesis, Université Bordeaux-Gradignan, 2020.
- [41] A. H. Wapstra G. Audi. The 1995 update to the atomic mass evaluation. *Nucl. Phys. A*, 595:409–480, feb 1995.
- [42] R. Arnold et al. Measurement of the $2\nu\beta\beta$ decay half-life of ^{150}nd and a search for $0\nu\beta\beta$ decay processes with the full exposure from the nemo-3 detector. *Phys. Rev. D*, 94, oct 2016.
- [43] Nucleid database.
- [44] My github page. <https://github.com/girardcarillo>.

Titre: Étude de l'influence de la réjection du bruit de fond ^{208}Tl sur la sensibilité à la décroissance double-bêta sans émission de neutrino, caractérisation des performances en temps du calorimètre du démonstrateur SuperNEMO.

Mots clés: Neutrino, Double désintégration bêta, SuperNEMO, Simulation Monte-Carlo, programmation et développement, mise en route du détecteur, réjection de bruit de fond, performances temporelles.

Résumé: La physique du neutrino est une des portes possibles pour aller au-delà du Modèle Standard (MS). En particulier, cette particule est décrite avec une masse nulle par le Lagrangien du MS. L'étude du mécanisme qui est à l'origine de la génération de leur masse n'est pas connu et dépend de leur nature, que le neutrino soit de Dirac (particule et antiparticule sont différentes) ou de Majorana (le neutrino est son propre antineutrino).

Les expériences NEMO font partie des expériences actuelles qui cherchent à mettre en évidence cette nature, avec une technologie unique alliant reconstruction de trace dans un trajectographe et mesure des énergies et temps de vol dans un calorimètre. La dernière génération de ce projet est le détecteur SuperNEMO, dont le premier des 20 modules, faisant office de démonstrateur, est en cours d'assemblage au Laboratoire Souterrain de Modane.

Le présent manuscrit décrit le travail de thèse effectué dans cette expérience. Après avoir rappelé certaines notions liées à la physique du Modèle Standard et au-delà, notamment concernant la physique des neutrinos, le manuscrit présente le démonstrateur SuperNEMO en détail. Le travail de cette thèse est ensuite décrit dans 4 chapitres d'analyse.

La sensibilité du démonstrateur à la décroissance $0\nu\beta\beta$ est étudiée dans différentes conditions de champ magnétique, qui est délivré dans le trajectographe au moyen d'une bobine. L'influence de la contamination des sources en isotopes naturels est également étudiée. Il est montré que des coupures sur les données, en particulier dans le canal de détection deux électrons, peuvent améliorer le résultat final de la sensibilité. Pour les sources ^{82}Se , la sensibilité du détecteur final est trouvée à $T_{1/2}^{0\nu} > 5,4 \times 10^{25}$ années, correspondant à

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < [0,079 - 0,15] \text{ eV}$. Pour des source ^{150}Nd $T_{1/2}^{0\nu} > 2.4 \times 10^{25}$ années serait atteint. Cela correspond à $\langle m_{\beta\beta} \rangle < [0.046 - 0.15] \text{ eV}$, ce qui est meilleur que pour les sources ^{82}Se , grâce au meilleur facteur de phase.

Le bruit de fond interne le plus dangereux reste le ^{208}Tl , dont l'activité est mesurée comme étant supérieure aux spécifications. Deux techniques améliorées de réjection de ce fond sont développées, en utilisant notamment le temps de vol mesuré par le calorimètre, et son impact sur la sensibilité de l'expérience est discuté. Une amélioration de la sensibilité de 6% est obtenue en tenant compte des performances raisonnables du calorimètre en matière de temps de vol.

Une description détaillée de la mise en service du calorimètre est donnée, auquel j'ai activement participé pendant mon doctorat. En particulier, le travail effectué pour vérifier le fonctionnement du calorimètre et de ses câbles de signal est décrit. La longueur de chaque câble a été mesurée avec précision à l'aide d'une méthode de réflectométrie. Cela permet d'estimer les retards des signaux, qui ont un impact sur la résolution temporelle évoquée ci-dessus.

Une étude finale visant à déterminer la résolution en temps des modules optiques du calorimètre a été menée, ce qui est crucial pour comprendre et rejeter le bruit de fond de l'expérience. L'utilisation d'une source ^{60}Co pour caractériser le calorimètre complet est une idée originale développée dans le cadre de cette thèse, avec la prise en charge à la fois du dispositif expérimental et du développement de l'analyse. Une caractérisation d'une grande partie du calorimètre a été réalisée, ce qui ouvre la voie à l'étalonnage complet du détecteur avec cette méthode. En moyenne, la résolution en temps des modules optiques est $570 \pm 130 \text{ ps}$.

Title: Study of ^{208}Tl background rejection influence on the neutrinoless double beta decay sensitivity, characterisation of SuperNEMO demonstrator calorimeter timing performance.

Keywords: Neutrino, Double beta decay, SuperNEMO, Monte-Carlo simulation, software development, commissioning, background rejection, timing performances.

Abstract: The physics of the neutrino is one of the possible doors to go beyond the Standard Model (SM). In particular, they are described with zero mass by the Lagrangian of the SM. The study of the mechanism which is at the origin of the generation of their mass is not known and depends on their nature, whether the neutrino is of Dirac (particle and antiparticle are different) or Majorana (the neutrino is its own antineutrino).

The NEMO experiments are part of the current experiments that seek to highlight this nature, with a unique technology combining trace reconstruction in a tracking detector and measurement of energies and times of flight in a calorimeter. The latest generation of this project is the SuperNEMO detector, of which the first of 20 modules, acting as a demonstrator, is currently being assembled at the Modane Underground Laboratory.

This manuscript describes the PhD work carried out in this experiment. After recalling certain notions related to the physics of the Standard Model and beyond, notably concerning neutrino physics, the manuscript presents the SuperNEMO demonstrator in detail. The work of this PhD is then described in 4 analysis chapters.

The sensitivity of the demonstrator to $0\nu\beta\beta$ decay is studied under different magnetic field conditions, which is delivered into the tracker by means of a coil. The influence of the contamination of sources by natural isotopes is also studied. It is shown that cuts in the data, especially in the two electron detection channel, can improve the final sensitivity result. For ^{82}Se sources, the final sensitivity is $T_{1/2}^{0\nu} > 5.4 \times 10^{25}$ years cor-

responding to $\langle m_{\beta\beta} \rangle < [0.079 - 0.15]$ eV. For ^{150}Nd sources $T_{1/2}^{0\nu} > 2.4 \times 10^{25}$ years would be reached. This corresponds to $\langle m_{\beta\beta} \rangle < [0.046 - 0.15]$ eV, better than for ^{82}Se sources, thanks to its higher phase-space factor.

The most dangerous internal background remains ^{208}Tl , whose activity is measured to be higher than the specifications. Two improved rejection techniques of this background is developed, using in particular the time-of-flight measured with the calorimeter, and its impact on the experiment's sensitivity is discussed. An improvement of the sensitivity of 6% is obtained considering reasonable calorimeter timing performance.

A detailed description of the commissioning of the calorimeter is given, in which I had an important role during my PhD. In particular, the work done to verify the operation of the calorimeter and its signal cables is described. The length of each cable has been accurately measured with a reflectometry method. This allows to estimate the signal delays, which have an impact on the time resolution discussed above.

A final study to determine the time resolution of the optical modules of the calorimeter was conducted, which is crucial for understanding and rejecting the background of the experiment. The use of a ^{60}Co source to characterise the full calorimeter is an original idea developed in the context of this thesis, with the handling of both the experiment setup and the analysis framework. A characterisation of a large part of the calorimeter has been performed, which paves the way for the full detector calibration with this method. On average, the time uncertainty stands at 570 ± 130 ps.