

Data analysis and development of bolometric detectors for neutrinoless double beta decay searches

*Analyse des données et développement de détecteurs
bolométriques pour la recherche de la double
désintégration bêta sans émission de neutrinos*

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n° 576 : particules hadrons énergie et noyau : instrumentation,
imagerie, cosmos et simulation (PHENIICS)

Spécialité de doctorat: Physique des particules

Graduate School : Physique. Référent : Faculté des sciences d'Orsay

Thèse préparée dans l'unité de recherche **IJCLab (Université Paris-Saclay, CNRS)**, sous la
direction de **Pía LOAIZA**, Ingénieur de recherche et la co-direction d'**Andrea GIULIANI**,
Directeur de recherche

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 29 septembre 2026, par

Mariia BUCHYNSKA

Composition du jury

Membres du jury avec voix délibérative

Alessandro MONFARDINI

Institut Néel MCBT, CNRS

Rapporteur & Examineur

Alessandra TONAZZO

Professeure des Universités, Université de Paris 7

Rapporteur & Examinatrice

Martin LOIDL

Directeur de Recherche, Laboratoire National Henri Becquerel (CEA, LIST)

Examineur

Lindley WINSLOW

Professeure de Physique, Max Planck Institute for Physics

Examinatrice

Stefano PIRRO

Directeur de Recherche, Laboratori Nazionali del Gran Sasso (INFN)

Examineur

Titre : Analyse des données et développement de détecteurs bolométriques pour la recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrinos

Mots clés : Désintégration double bêta sans émission de neutrinos, neutrinos, bolomètres scintillants, rejet du bruit de fond

Résumé: La désintégration double bêta sans émission de neutrinos ($0\nu\beta\beta$) est un processus hypothétique dont la découverte démontrerait que les neutrinos sont des particules de Majorana. Au-delà de ses implications pour la physique des neutrinos, la désintégration $0\nu\beta\beta$ constituerait le premier processus observé dans lequel des particules de matière sont produites sans leurs partenaires d'antimatière correspondants, ce qui pourrait contribuer à résoudre le problème de l'asymétrie baryonique de l'Univers. La technique des bolomètres scintillants est une méthode prometteuse pour la recherche de la désintégration $0\nu\beta\beta$. La capacité à l'échelle de la tonne de la technologie bolométrique a été démontrée par l'expérience CUORE, tandis que la technique des bolomètres scintillants pour la réjection des fonds α a été validée avec succès dans les expériences CUPID-0 et CUPID-Mo.

Dans ce travail, la préparation des détecteurs du démonstrateur final CROSS est présentée, ainsi que les premiers résultats sur leurs performances techniques. CROSS est une expérience recherchant la désintégration double bêta sans émission de neutrinos ($0\nu\beta\beta$) du ^{100}Mo , située au Laboratoire Souterrain de Canfranc, LSC (Espagne). Avec 4.9 kg de ^{100}Mo , CROSS est une expérience compétitive dans la recherche de la désintégration $0\nu\beta\beta$ du ^{100}Mo , avec le potentiel d'établir une limite inférieure plus contraignante sur la demi-vie du ^{100}Mo après un an de prise de données. Les détecteurs CROSS ont été refroidis avec succès en octobre 2025, et la prise de données est actuellement en cours. Au-delà de sa portée physique, CROSS développe et optimise des techniques bolométriques, qui sont d'une grande importance pour les futures expériences de désintégration $0\nu\beta\beta$. L'étude d'un nombre des détecteurs de lumière Neganov-Trofimov-Luke (NTL) statistiquement significatif et la comparaison de leurs performances avec différents substrats (Si et Ge) fourniront des informations importantes pour les futures expériences bolométriques, en particulier l'expérience CUPID.

Sur la base des mesures précédentes de CROSS, la capacité de réjection des coïncidences aléatoires d'événements $2\nu\beta\beta$ a été estimée. Huit détecteurs de lumière Neganov-Trofimov-Luke polarisés jusqu'à 80 V, avec des temps de montée relativement courts d'environ 0.5 ms, ont été utilisés pour l'analyse. Les facteurs influençant la simulation et l'analyse ont été étudiés, et la procédure a été optimisée afin de les faire coïncider au mieux avec les données réelles. L'évaluation obtenue de la contribution à l'indice de bruit (BI), en supposant différentes géométries de détecteurs de lumière, est importante pour l'expérience CUPID, où ces coïncidences constituent l'une des contributions dominantes au bruit de fond.

L'expérience CUPID est une expérience de nouvelle génération de désintégration double bêta sans émission de neutrinos ($0\nu\beta\beta$), qui sera installée au Laboratori Nazionali del Gran Sasso, LNGS (Italie) et contiendra 240 kg de ^{100}Mo . Avec un indice de bruit de fond (BI) cible de 10^{-4} coups/keV/kg/an, elle vise une sensibilité de découverte à 3σ de 10^{27} ans sur la demi-vie du $0\nu\beta\beta$ du ^{100}Mo , explorant entièrement le régime de hiérarchie inversée ainsi qu'une partie du régime de hiérarchie normale pour des masses de neutrinos supérieures à 10 meV. Un objectif aussi ambitieux pour l'indice de bruit de fond impose des exigences strictes en matière de performances du détecteur et de radiopureté des composants proches du détecteur ainsi que des cristaux eux-mêmes. Par conséquent, des tests de performance et de radiopureté des cristaux sont en cours, et les résultats de l'analyse de deux cristaux enrichis sont présentés dans ce travail.

Le candidat le plus probable pour la production des cristaux est SICCAS (Chine). Les cristaux doivent ensuite être transportés en Italie, et différentes modalités de transport sont envisagées. L'évaluation de l'activation cosmogénique des cristaux due à l'exposition en surface aux flux de neutrons et de protons cosmiques, ainsi que sa contribution à l'indice de bruit, est présentée dans le dernier chapitre de cette thèse.

Title: Data analysis and development of bolometric detectors for neutrinoless double beta decay searches

Keywords: Neutrinoless double beta decay, neutrinos, scintillating bolometers, background rejection

Abstract: Neutrinoless double beta decay ($0\nu\beta\beta$) is a hypothetical process, the discovery of which would prove that neutrinos are Majorana particles. Beyond its implications for neutrino physics, $0\nu\beta\beta$ decay would be the first observed process in which matter particles are produced without corresponding antimatter partners, which could help to solve the puzzle of the baryon asymmetry in the Universe. The scintillating bolometer technique is a promising method for the search for $0\nu\beta\beta$ decay. The ton-scale capability of the bolometric technology was demonstrated in the CUORE experiment, while the scintillating bolometer technique for α background rejection was successfully validated in the CUPID-0 and CUPID-Mo experiments.

In this work, the preparation of the detectors for the final CROSS demonstrator is presented, together with first results on their technical performance. CROSS is an experiment searching for $0\nu\beta\beta$ decay in ^{100}Mo , located at Laboratorio Subterráneo de Canfranc, LSC (Spain). With 4.9 kg of ^{100}Mo , CROSS is a competitive experiment in the search for $0\nu\beta\beta$ decay in ^{100}Mo , with the potential to set a more stringent worldwide limit on the half-life of ^{100}Mo in 1 year of data taking. The CROSS detectors were successfully cooled down in October 2025, and data taking is currently ongoing. The first results focusing on the detectors technical performance are presented. Apart from its physics reach, CROSS is developing and optimizing bolometric techniques, which are of great importance for future $0\nu\beta\beta$ decay experiments. For the first time, we have tested a number of Neganov-Trofimov-Luke (NTL) light detectors statistically significant and compared their performances with different substrates (Si and Ge). This will provide significant input for the future bolometric experiments, in particular, the CUPID experiment.

Based on previous CROSS measurements, the

rejection capability of the random coincidences of $2\nu\beta\beta$ events was estimated. Eight Neganov-Trofimov-Luke light detectors biased up to 80 V with comparatively short rise times of ~ 0.5 ms were used for analysis. The factors affecting the simulation and analysis were studied, and the procedure was optimized to make them match the real data as closely as possible. The obtained evaluation of the contribution to the background index (BI), assuming different light detector geometries, is important for the CUPID experiment, where such coincidences constitute one of the dominant contributions to the background.

The CUPID experiment is a next-generation $0\nu\beta\beta$ decay experiment that will be located at Laboratori Nazionali del Gran Sasso, LNGS (Italy), and will contain 240 kg of ^{100}Mo . With a target BI of 10^{-4} counts/keV/kg/year, it aims to achieve 3σ discovery sensitivity of 10^{27} years on the $0\nu\beta\beta$ half-life of ^{100}Mo , fully exploring the inverted ordering region and the normal ordering region for a neutrino mass larger than 10 meV. Such an ambitious goal for the background index imposes strict requirements on detector performance and the radiopurity of the close to the detector components and the crystals themselves. Therefore, tests on crystal performance and radiopurity are ongoing, and the analysis results of two enriched crystals are presented in this work.

The most probable candidate for crystal production is SICCAS (China). The crystals should then be transported to Italy, and different ways of transportation are being considered. The evaluation of the cosmogenic activation in the crystals due to the aboveground exposure to cosmic neutron and proton fluxes, along with its contribution to the background index, is presented in the final chapter of this thesis.