

Proposition de sujet de thèse

Titre : Étude métrologique de la forme des spectres bêta et validation expérimentale des modèles théoriques

Laboratoire d'accueil : CEA Saclay – Laboratoire National Henri Becquerel

Adresse : CEA Saclay - DRT / LIST / LNHB / CDF - bât. 602 – 91191 Gif-sur-Yvette

Responsable du projet (encadrant CEA) : Xavier Mougeot

Téléphone : 01 69 08 23 32

Email : xavier.mougeot@cea.fr

Directeur de thèse : Professeur Abdel-Mjid Nourreddine (IPHC, RaMsEs, Strasbourg)

Téléphone : 03 68 85 06 72

Email : abdelmjid.nourreddine@iphc.cnrs.fr

Financement : CFR, sujet phare DRT

Mots-clés : spectres bêta, facteurs de forme, semi-conducteurs, mesures en coïncidence, sources minces, simulations Monte-Carlo, fonction réponse, déconvolution spectrale.

Résumé français

Une demande croissante et forte existe depuis plusieurs années pour une connaissance précise des spectres en énergie des émissions bêta, assortie d'incertitudes bien établies. Ces données sont en effet indispensables pour la métrologie des rayonnements ionisants, la radiothérapie et la micro-dosimétrie, ainsi que pour les calculs de puissance résiduelle dans les réacteurs nucléaires. Elles sont également essentielles en astrophysique nucléaire et le deviennent dans la recherche d'une éventuelle physique au-delà du modèle standard ou pour les contrôles de non-prolifération nucléaire par l'analyse des spectres antineutrinos issus des réacteurs. Une étude théorique a été entreprise en collaboration étroite avec les théoriciens de l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien de Strasbourg en vue de calculer précisément les spectres bêta, mais la validation de ces calculs ne peut se faire que par la comparaison avec de nouvelles mesures de spectres bêta. Un prototype dédié a donc été développé autour d'un détecteur silicium PIPS et testé avec succès lors d'une thèse précédente. Toutefois, de nombreux développements sont encore nécessaires pour parvenir aux résultats escomptés.

L'objectif principal de la thèse proposée ici est de pouvoir mesurer des spectres bêta avec une très grande précision et d'en extraire des facteurs de forme expérimentaux de qualité métrologique. Les moyens envisagés pour cela comprennent l'évolution du dispositif expérimental actuel, le traitement des données, les simulations Monte Carlo et l'analyse des spectres mesurés. En particulier, l'utilisation d'un détecteur Si(Li) plus épais permettra de mesurer des transitions de plus haute énergie, et l'implémentation d'une géométrie de détection 4π limitera au maximum l'influence de la rétrodiffusion. Il sera nécessaire d'étudier finement toutes les sources de déformation du spectre liées à la détection et autres phénomènes physiques, puis de déconvoluer le spectre mesuré de ces effets afin d'extraire le facteur de forme expérimental. La déconvolution de la contribution photonique, notamment du bremsstrahlung, sera un enjeu majeur. La mesure d'émetteurs bêta purs permettra une comparaison directe entre l'expérience et la théorie.

Le candidat devra être motivé par le travail expérimental et posséder des connaissances en détection des rayonnements ionisants, en programmation et en simulation Monte-Carlo. Le sujet pourra également inclure une partie théorique sur le calcul des spectres.

Résumé anglais

There has been an increasing demand over the past few years for an ever more precise knowledge of beta spectra, coupled with well-established uncertainties. These data are essential for ionizing radiation metrology, radiotherapy and micro-dosimetry, as well as for the calculation of reactor decay heat following shutdown. They are also required in nuclear astrophysics and become necessary in the search for physics beyond the standard model or for the control of nuclear non-proliferation by the analysis of antineutrino spectra emitted by a reactor. Recently, a theoretical study has been started, in close collaboration with nuclear theorists from the Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien at Strasbourg, in order to precisely calculate beta spectra. These theoretical predictions can only be validated by a systematic comparison with new measurements. A prototype has already been developed during a previous PhD thesis using a silicon PIPS detector, and was tested with success. However, many developments are still needed to achieve the desired results.

The main objective of the current thesis is to measure beta spectra with high accuracy and to extract experimental shape factors of a metrological quality. The means considered to achieve this goal include the evolution of the current experimental setup, the data processing, the Monte Carlo simulations and the analysis of the measured spectra. In particular, the use of a thicker Si(Li) detector will allow transitions of higher energy to be measured, and the implementation of a 4π detection geometry will aim to limit the influence of backscattering. It will be necessary to precisely examine all the sources of spectrum distortion due to detection, and other physical, phenomena, and the unfolding of these effects from the measured spectrum to extract the experimental form factor. Unfolding the photonic contribution, including bremsstrahlung, will be a major issue. The measurement of pure beta emitters will allow a direct comparison between experiment and theory.

The applicant must be motivated by the experimental work, and must possess some knowledge in ionizing radiation detection, in programming and in Monte Carlo simulations. The subject may also include a theoretical part on the calculation of beta spectrum shapes.

Description du sujet

Contexte

Le Laboratoire National Henri Becquerel (LNE-LNHB) est le laboratoire national de référence pour la métrologie des rayonnements ionisants. Depuis quelques années, nos utilisateurs formulent une demande croissante pour une connaissance précise de la forme des spectres en énergie des émissions bêta des radionucléides obéissant à ce mode de désintégration, assortie d'incertitudes bien établies. Ces spectres sont nécessaires en métrologie des rayonnements ionisants, dans le milieu médical pour la radiothérapie et la dosimétrie, ainsi que pour les industriels du nucléaire pour les calculs de puissance résiduelle ou la gestion du combustible après irradiation. La mesure des spectres d'antineutrinos issus des réacteurs en fonctionnement, directement corrélés aux spectres bêta, se développe actuellement comme moyen de surveillance des installations nucléaires, mais aussi en recherche fondamentale pour mettre en évidence une éventuelle physique au-delà du modèle standard.

Lors de la désintégration bêta d'un radionucléide, l'énergie disponible se répartit entre l'électron, l'antineutrino et le noyau fils. Cette désintégration à trois corps conduit à un spectre en énergie continu pour les électrons. La forme de ce spectre est notamment influencée par la nature de la transition, qui peut être « permise » ou « interdite » selon la structure des noyaux en jeu. L'énergie des électrons présente donc un spectre continu ayant des formes variées.

Peu de travaux expérimentaux ont été menés sur la mesure des spectres bêta depuis les années 1970. Les études se sont concentrées principalement sur les transitions permises et premières interdites non-unicques [1]. La très grande majorité des facteurs de forme expérimentaux publiés a été établie à partir de mesures sur spectromètre magnétique. Ces mesures n'apportaient aucune

information sous 50 keV et les effets de distorsion dus à l'instrumentation n'étaient pas parfaitement corrigés. Les spectres étaient alors considérés suffisamment bien connus pour les applications de l'époque. Mais les utilisateurs actuels souhaitent des incertitudes plus faibles et sont aussi demandeurs des spectres des transitions interdites uniques et non-uniques d'ordres supérieurs.

Le LNE-LNHB s'est engagé depuis quelques années dans l'étude des spectres bêta avec l'objectif d'établir un code de calcul pour tous les types de transitions, validé par une comparaison systématique avec des spectres expérimentaux. L'évaluation des différents programmes de calcul de spectres bêta disponibles a démontré la nécessité de développer un nouveau code. En effet, ces programmes se limitent en général au calcul des transitions permises et incluent la possibilité d'ajouter un facteur de forme expérimental. Les codes de calcul les plus élaborés peuvent calculer les transitions permises et interdites uniques, mais au prix d'approximations trop fortes pour permettre un calcul précis [2]. Ces codes analytiques ne calculent aucune fonction d'onde leptonique ou nucléaire, considèrent un électron plongé dans le potentiel coulombien d'un noyau ponctuel, et appliquent une série de termes correctifs parfois grossièrement estimés : écrantage, magnétisme faible, facteurs de forme des transitions interdites uniques [3].

Cette approche largement répandue a été récemment mise en défaut expérimentalement. Le LNE-LNHB a mesuré les spectres bêta du ^{63}Ni ($E_{\text{max}} = 66,98$ keV) et du ^{241}Pu ($E_{\text{max}} = 20,8$ keV) à l'aide de microcalorimètres métalliques magnétiques. Ces faibles énergies de transition en font des candidats idéaux pour tester les prédictions théoriques, et cette technique expérimentale est idéale de par son faible seuil de détection, inférieur à 300 eV, et son excellente résolution, 30 eV à 6 keV. De nouveaux calculs plus complets ont été nécessaires afin de tenir compte précisément des effets atomiques d'écrantage et d'échange [4,5]. Le mécanisme physique de ce dernier effet est le suivant : l'électron issu de la désintégration bêta est émis directement dans une orbitale atomique, éjectant l'électron du cortège électronique avec une énergie qui correspond au transfert d'impulsion. Des travaux théoriques ont montré que cet effet peut augmenter la probabilité d'occurrence à basse énergie d'environ 10% dans certains cas [6]. L'étude expérimentale et théorique des spectres du ^{63}Ni et du ^{241}Pu a parfaitement confirmé cette prédiction [4,5]. Cependant, ces calculs ne sont valables que dans le cas des transitions permises.

Le calcul des transitions interdites uniques est possible sans faire intervenir la structure des noyaux en jeu [7]. Il faut malgré tout faire une approximation contraignante : l'intégration des fonctions d'ondes leptoniques dans tout l'espace est remplacée par leurs valeurs évaluées à la surface du noyau. Si cela permet de découpler les éléments de matrices nucléaires et leptoniques, cela ne permet pas de tenir compte correctement de l'influence de la structure atomique sur les spectres bêta (écrantage, effet d'échange). Le spectre du ^{138}La , transition bêta moins deuxième interdite unique ($E_{\text{max}} = 255$ keV) récemment mesurée, en constitue un très bon exemple [8].

Le calcul des spectres bêta pour les transitions interdites non-uniques est beaucoup plus difficile que dans le cas des transitions interdites uniques. L'approximation décrite au paragraphe précédent n'est plus possible, et il est nécessaire de tenir compte de la structure des états nucléaires initial et final de la transition. L'approximation traditionnelle, appelée approximation ζ , consiste à traiter les transitions non-uniques comme des transitions uniques de même variation de moment angulaire total [9]. Cette approximation a été introduite dans le cas des transitions premières interdites non-uniques. Le ^{241}Pu est un cas typique de transition première interdite non-unique qui peut être traitée comme une transition permise [4]. Cependant, faute d'une meilleure approximation, on retrouve souvent dans les codes de calcul de spectre bêta la généralisation de cette approximation à toutes les transitions interdites non-uniques. Or, le LNE-LNHB a récemment entrepris une comparaison systématique entre des spectres calculés et des facteurs de forme expérimentaux pour 130 transitions bêta permises, interdites uniques et non-uniques [10]. Il en résulte que l'approximation ζ est clairement fautive pour la moitié des transitions premières interdites non-uniques, et pour toutes les transitions interdites non-uniques d'ordres supérieurs.

Si les microcalorimètres métalliques magnétiques constituent une technique expérimentale très prometteuse et permettent de tester les prédictions théoriques à basse énergie avec une précision jusqu'ici inégalée, ils sont difficiles à mettre en œuvre et ne sont pas encore adaptés à des énergies

au-delà de 1 MeV. C'est pourquoi le LNE-LNHB s'est également engagé dans le développement d'un système de détection utilisant des détecteurs semi-conducteurs.

Études expérimentales antérieures

Un prototype a été spécifiquement développé autour d'un détecteur silicium de type PIPS par C. Bisch dans le cadre de sa thèse de doctorat au LNE-LNHB entre octobre 2011 et septembre 2014 [11]. Ce dispositif a été conçu afin de limiter au maximum l'influence des phénomènes physiques et de la détection à l'origine de déformations dans le spectre mesuré. Le détecteur est refroidi à la température de l'azote liquide et maintenu sous un vide secondaire. Des simulations Monte-Carlo de la chambre de détection ont permis de déterminer la géométrie et les matériaux à utiliser.

La qualité des sources radioactives est déterminante car le phénomène d'auto-absorption dégrade fortement le spectre en énergie des électrons émis. Une technique de préparation usuelle au LNE-LNHB a été adaptée afin d'obtenir des sources spécifiques à l'étude des spectres bêta. Des sources minces ont été fabriquées par lyophilisation d'un dépôt radioactif sur un film de Vyns de 500 nm d'épaisseur. L'étalonnage en énergie a été réalisé à l'aide d'une source de ^{133}Ba écrantée. Une résolution de 4.4 keV est obtenue pour le pic à 62.520 keV d'une source de ^{109}Cd . Différents types de spectres bêta ont été mesurés avec un détecteur PIPS de 500 μm d'épaisseur de volume actif et 450 mm^2 de surface : ^{14}C , ^{60}Co , ^{151}Sm et ^{99}Tc . Le seuil en énergie est d'environ 15 keV. Les simulations Monte Carlo précises du dispositif, effectuées à l'aide de Geant4, produisent des spectres en énergie en excellent accord avec les spectres mesurés.

Cependant, les spectres mesurés restent fortement déformés, en particulier à basse énergie, à cause de la rétrodiffusion des électrons sur le cristal de silicium. Un processus de déconvolution spectrale, s'appuyant sur des réponses impulsionnelles du dispositif simulées avec Geant4, a été développé afin de déterminer le spectre bêta émis initialement, avant toute perte d'énergie par un processus secondaire. Les premiers résultats pour le ^{14}C permettent d'obtenir la forme réelle du spectre bêta avec une précision compatible avec les mesures disponibles dans la littérature. Néanmoins, l'incertitude introduite par le processus de déconvolution devient une composante majeure de l'incertitude finale et ne permet pas d'obtenir une mesure du spectre bêta de qualité métrologique.

Programme d'études

Cette thèse se place dans la continuité de celle de C. Bisch. L'objectif principal est de pouvoir mesurer des spectres bêta et d'en extraire des facteurs de forme expérimentaux avec une qualité métrologique. Cela se fera à travers l'adaptation du dispositif expérimental actuel, du traitement des données, des simulations Monte Carlo et de l'analyse des spectres mesurés. Les pistes envisagées actuellement sont listées ci-dessous, mais n'ont pas vocation à être toutes explorées lors de cette thèse. Dans un premier temps, elles permettront au doctorant de se familiariser avec la thématique et le dispositif expérimental existant. Le doctorant pourra ensuite devenir force de proposition dans l'évolution du dispositif, en accordant à chacune de ces pistes l'importance qui lui revient par rapport à l'objectif de la thèse.

- Dispositif : utilisation de détecteurs Si(Li) plus épais pour mesurer des spectres bêta d'énergies maximales plus élevées ; montage 4π pour réduire l'influence de la diffusion et de la rétrodiffusion ; couplage avec un détecteur gamma pour les schémas de désintégration complexes ; montage télescope de plusieurs semi-conducteurs pour les transitions de haute énergie (> 3 MeV).
- Chaîne d'acquisition : stabilité de l'ensemble de la chaîne d'électronique ; résolution en énergie ; seuil de détection ; montage de l'électronique pour des mesures en coïncidences.

- Sources radioactives : étude des différents processus de fabrication en lien avec les radiochimistes du LNE-LNHB ; exploration de nouvelles techniques (Langmuir-Blodgett, par exemple).
- Simulations Monte Carlo : évolution du code Geant4 issu de la thèse précédente selon les modifications du dispositif expérimental ; mise en place d'une simulation Penelope équivalente ; comparaison des résultats Geant4 et Penelope ; validation des simulations par comparaison avec les spectres mesurés ; analyse quantitative et validation de la contribution photonique, notamment du bremsstrahlung.
- Analyse : reconstruction des spectres lors de mesures en coïncidences ; étude de la fonction réponse du système de détection ; déconvolution spectrale ; extraction des facteurs de forme expérimentaux ; caractérisation de la qualité des spectres bêta (incertitudes, désaccord théorie – expérience).

En parallèle de ce travail de thèse, les prédictions théoriques seront améliorées au sein du LNE-LNHB en collaboration étroite avec les théoriciens de l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC, Strasbourg). La mesure d'émetteurs bêta purs permettra une comparaison directe entre l'expérience et la théorie. Les radionucléides mesurés seront sélectionnés selon leur intérêt théorique (nature de la transition, effet particulier de structure nucléaire) et selon les besoins des utilisateurs finaux. Le but est d'aboutir à un code de calcul des spectres bêta validé et contraint par la mesure, associant pour la première fois une incertitude à la forme du spectre. Une connaissance générale des calculs théoriques de spectre bêta devra être acquise par le doctorant au cours de sa thèse. Selon sa motivation et l'avancement de la partie expérimentale, une implication plus ou moins importante est envisageable dans la partie théorique.

Le candidat devra être motivé par le travail expérimental, et posséder de solides connaissances en détection des rayonnements ionisants ainsi qu'en programmation (C/C++, Fortran). Une expérience des simulations Monte-Carlo serait un plus appréciable. En cas d'implication sur la partie théorique, un niveau minimal de connaissances en physique fondamentale sera nécessaire.

Une collaboration approfondie

Cette étude des spectres bêta a permis au LNE-LNHB de développer un lien privilégié avec l'IPHC. Le Professeur Nourreddine a été le directeur de thèse de C. Bisch et souhaite renouveler cet engagement fort pour la thèse proposée ici. Il a grandement facilité les interactions du LNE-LNHB avec les théoriciens de physique atomique et de structure nucléaire de l'IPHC. Nous avons ainsi pu établir un dialogue intéressant avec ces derniers, qui devrait être très fructueux à l'avenir concernant la thématique des spectres bêta.

Cette thèse, co-encadrée par le CEA et l'IPHC, sera une occasion de plus d'approfondir le lien entre le LNE-LNHB et l'IPHC. La similarité et la complémentarité des études et des compétences des deux côtés permettent d'envisager des collaborations encore plus étroites et aux retombées plus importantes à l'avenir sur diverses thématiques.

Transferts aux utilisateurs et retombées

Le Laboratoire National Henri Becquerel travaille sur ce sujet depuis quelques années, tant d'un point de vue théorique qu'expérimental. Son expertise en évaluation de données atomiques et nucléaires ainsi qu'en mesures de qualité métrologique en font un acteur privilégié pour la vérification et la validation des calculs théoriques par l'expérience. Ses liens étroits avec les utilisateurs finaux permettront de choisir les radionucléides d'intérêt à fort impact immédiat, et assure un transfert rapide des résultats de ce projet.

Les retombées certaines, identifiées par les demandes des utilisateurs, se regroupent selon trois thématiques détaillées ci-dessous.

➤ *Métrologie des rayonnements ionisants*

Le LNE-LNHB est le laboratoire national de référence dans le domaine de la métrologie des rayonnements ionisants. L'une de ses principales missions est de fournir aux utilisateurs (industriels, hôpitaux, etc.) des étalons d'activité avec la meilleure incertitude possible. Certaines techniques de mesure d'activité ont besoin de connaître la forme des spectres bêta : compteurs proportionnels à gaz, chambres d'ionisation, scintillation liquide. Les utilisateurs se raccorderaient à des étalons primaires de meilleure qualité, ce qui leur permettrait eux aussi de réduire leurs incertitudes.

Une liste non exhaustive des radionucléides d'intérêt pour la métrologie des rayonnements ionisants est : ^3H , ^{14}C , ^{63}Ni , ^{64}Cu , ^{68}Ga , ^{90}Y , ^{186}Re , ^{204}Tl , ^{241}Pu .

➤ *Médical : imagerie, radiothérapie, dosimétrie interne, radioprotection*

Une forte demande vient également du domaine médical, où les radionucléides émetteurs bêta sont couramment utilisés en imagerie, radio-immunothérapie ou en radiothérapie vectorisée. Seul ce type de radionucléides est adapté à la médecine nucléaire car ils présentent une large gamme de demi-vies et d'énergies possibles.

Les particules bêta ont un fort pouvoir ionisant et sont à l'origine de la majeure partie de la dose déposée dans les cellules du patient. En effet, les éléments cellulaires sensibles à la dose déposée (ADN, ARN, protéines) sont des polymères dont les structures spatiales sont typiquement inférieures à 130 nm. Or le transfert d'énergie linéaire, quantité décrivant l'énergie transférée au milieu lors du passage d'une particule ionisante, augmente drastiquement à basse énergie pour les électrons [12]. Que la dose déposée soit recherchée (radiothérapie vectorisée) ou non (imagerie), son calcul précis dans les volumes d'intérêt selon la quantité de radionucléides qui y est présente est nécessaire pour assurer l'efficacité et la sécurité du traitement. Une meilleure connaissance de la forme des spectres bêta à basse énergie permettrait de contribuer à atteindre cet objectif.

Les radionucléides déjà couramment utilisés ou potentiellement utilisables dans le domaine médical sont [13] (liste non exhaustive) :

β^+ : ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F , ^{52}Fe , ^{64}Cu , ^{68}Ga , ^{72}As , ^{76}Br , ^{82}Rb , ^{86}Y , ^{89}Zr , ^{124}I .

β^- : ^{32}P , ^{33}P , ^{44}Sc , ^{47}Sc , ^{67}Cu , ^{90}Y , ^{131}I , ^{153}Sm , ^{166}Ho , ^{177}Lu .

➤ *Réacteurs nucléaires : puissance résiduelle, déchets, recherche fondamentale, surveillance et prolifération*

La quantification précise de la chaleur induite par la fission nucléaire est un facteur majeur pour la conception des installations nucléaires de production d'électricité, ainsi que pour la gestion du combustible après irradiation. La chaleur résiduelle totale, incluant la composante de désintégration bêta, en fonction du temps de refroidissement d'un réacteur à l'arrêt à un impact significatif sur la sûreté des opérations, sur les diverses contraintes législatives et sur les aspects économiques de la production d'énergie nucléaire. Un programme de calcul systématique, dûment validé par un ensemble complet de données nucléaires, des estimations fiables et des incertitudes bien établies, permettrait de réduire les incertitudes sur la puissance générée en phase de production, tant pour les réacteurs actuels utilisant le cycle $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ [14] que pour les futurs réacteurs de génération IV utilisant le cycle $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ [15].

Depuis plusieurs années, la mesure des neutrinos produits au cœur des réacteurs fait l'objet d'intenses recherches. Elle permettrait une surveillance infalsifiable et en temps réel des installations nucléaires de par le monde, tout en donnant un accès direct à la quantité produite de matériaux fissiles à usages militaires [16]. Dans ce contexte, notons la publication récente de

la première carte mondiale des flux d'antineutrinos mesurés [17]. Le spectre en énergie des neutrinos d'un réacteur dépend de la contribution de chaque désintégration bêta, et est donc directement lié aux intensités et aux spectres en énergie des particules bêta.

Une quinzaine d'expériences mondiales de physique fondamentale sont actuellement en concurrence pour mettre en évidence l'existence d'un quatrième type de neutrino, qui ne se couplerait qu'avec le champ de gravité. L'un d'entre eux est le projet Ce-LAND, qui se propose de mesurer le spectre d'antineutrinos émis par une source de ^{144}Ce de 100 kCu [18]. Une connaissance très précise de la forme des spectres bêta issus des désintégrations successives du ^{144}Ce et du ^{144}Pr est nécessaire pour déterminer au mieux l'activité de la source, mais aussi pour servir de référence lors de la mise en évidence possible d'une physique au-delà du modèle standard.

Références

- [1] – V. Gorozhankin *et al.*, Proceedings of the International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry (LSC2010), edited by P. Cassette, Radiocarbon (University of Arizona, Tucson) pp. 259-266.
- [2] – P. Huber, Phys. Rev. C 84, 024617 (2011); Erratum Phys. Rev. C 85, 029901 (E) (2012).
- [3] – X. Mougeot *et al.*, Proceedings of the International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry (LSC2010), edited by P. Cassette, Radiocarbon (University of Arizona, Tucson) pp. 249-257.
- [4] – X. Mougeot *et al.*, Phys. Rev. A 86, 042506 (2012).
- [5] – X. Mougeot *et al.*, Phys. Rev. A 90, 012501 (2014).
- [6] – M.R. Harston, N.C. Pyper, Phys. Rev. A 45, 6282 (1992).
- [7] – H. Behrens, W. Bühring, *Electron radial wave functions and nuclear beta-decay*, Oxford Science Publications (1982).
- [8] – F.G.A. Quarati *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 683 (2012) 46.
- [9] – H.F. Schopper, *Weak interactions and nuclear beta decay*, North-Holland publishing company, Amsterdam (1966).
- [10] – X. Mougeot, Phys. Rev. C 91, 055504 (2015).
- [11] – C. Bisch, *Étude de la forme des spectres bêta*, CEA-R-6393, thèse de Doctorat, Université de Strasbourg (2014).
- [12] – A.I. Kassis, Int. J. Radiat. Biol. 80, 789 (2004).
- [13] – C.Andrew Boswell, M.W. Brechbiel, Nuclear Med. And Biology 34, 757- 778 (2007).
- [14] – A.L. Nichols, *Beta-decay and decay heat*, IAEA - Nuclear Data Section, INDC(NDS)-0483 (2005).
- [15] – M. Gupta, M.A. Kellett, A.L. Nichols, O. Bersillon, *Decay heat calculations: Assessment of fission product decay data requirements for Th/U fuel*, IAEA - Nuclear Data Section, INDC(NDS)-0577 (2010).
- [16] – International Atomic Energy Agency (IAEA), *Final report: Focused workshop on antineutrino detection for safeguards applications*, IAEA Headquarters, Vienna, 28-30 October 2008.
- [17] – S.M. Usman *et al.*, *AGM2015: Antineutrino Global Map 2015*, Sci. Rep. 5, 13945 (2015).
- [18] – M. Cribier *et al.*, Phys. Rev. Lett. 107, 201801 (2011).