



Physique des neutrinos avec Super-Kamiokande et Hyper-Kamiokande

En août 2020, la collaboration Super-Kamiokande (SK, expérience ayant reçue deux prix nobel de physique) a fini d'ajouter du Gadolinium (Gd) aux 50 kilotonnes d'eau contenues dans la cuve de l'expérience [1]. Nous sommes, sans aucun doute possible, définitivement entrés dans une nouvelle ère de recherche avec la nouvelle génération de ce détecteur dont le programme phare est la recherche du fond diffus de neutrinos qui ont été émis par toutes les supernovas au cours de l'histoire de l'univers (DNSB). Sa découverte ouvrirait un nouveau champ de recherche à la fois en physique des hautes énergies et en cosmologie : formation des étoiles, nucléosynthèse, évolution stellaire, etc.

En effet, de nombreuses analyses à Super-K sont affectées par la capacité limitée à différencier neutrinos et antineutrinos. Lorsque ceux-ci interagissent dans la cuve par courant chargé, ils produisent tous les deux une composante hadronique associée à un lepton chargé. Puisque SK n'est pas un détecteur magnétisé, il n'y a pas de moyen simple de mesurer la charge du lepton et l'expérience ne se base que sur la partie hadronique pour différencier neutrino et antineutrino. En dessous du GeV, cette composante hadronique est un proton (neutron) dans le cas de l'interaction d'un neutrino (antineutrino). Malheureusement aucune de ces particules ne peut être détectée dans Super-K. En conséquence, la plupart des analyses à Super-K ne pouvaient pas séparer neutrinos et antineutrinos, ce qui limitait la sensibilité, par ailleurs excellente, de l'expérience. L'adjonction de Gd permet désormais de supprimer ces limitations, de distinguer les neutrons des protons et par conséquent de séparer neutrinos et antineutrinos. En effet, le Gd est l'un des atomes qui a une des plus grandes sections efficaces de capture de neutrons et une signature expérimentale claire par une cascade de rayons γ d'énergie totale de 8 MeV.

Avant d'ajouter le Gd à l'eau ultrapure, la collaboration SK a validé le concept à l'aide d'un démonstrateur appelé EGADS, cuve de 200 tonnes semblable en tout point au détecteur SK. En 2020, 13 tonnes de Gadolinium ont été dissoutes dans le tank de SK soit une concentration de 0.02% pour une efficacité de détection des neutrons de 50%. Les premières captures neutroniques sur Gd ont été enregistrées en septembre 2020 ouvrant la porte à une nouvelle ère de découverte. En mai 2022, la concentration en Gd a été multipliée par trois pour une efficacité de détection de 75%.

Les supernovas sont les sources cosmiques les plus puissantes de neutrinos d'énergie autour du MeV puisque ceux-ci emportent avec eux 99% de l'énergie gravitationnelle lors de l'effondrement de l'étoile. Environ 88% des "neutrinos" de supernovas détectables sont en réalité des antineutrinos électroniques qui interagissent par désintégration beta inverse (IBD) : $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. Même si dans notre galaxie les supernovas sont des événements assez rares (le taux estimé actuellement est d'environ 3 par siècle), on estime le nombre de supernovas total à 10^{17} au cours de l'histoire de l'univers. Les neutrinos de basse énergie (en dessous de 50 MeV) émis par ces événements ont dû se diffuser dans l'univers mais, pour l'instant, ce fond diffus n'a jamais été observé. La détection du DNSB serait un événement sans précédent et une découverte majeure du 21^{ème} siècle. Elle fournira d'importantes informations sur l'histoire de la formation des étoiles, sur la nucléosynthèse et sur l'évolution stellaire. Le flux DNSB est proportionnel au taux de supernovas, incluant les supernovas "ratées" qui finissent en trou noir, phénomène qui n'a pas encore été observé. Le spectre en énergie du DNSB porte en lui des informations cruciales pour l'étalonnage des modèles numériques d'effondrement des étoiles. SK a déjà publié des résultats de recherche du DNSB sans imposer la détection d'un neutron (ou alors avec une efficacité de détection très limitée par capture sur l'hydrogène) [2]. Le signal DNSB est attendu dans une gamme en énergie située 10 et 30 MeV, région dans laquelle les bruits de fond dominants proviennent de la désintégration de muons "invisibles" ou de phénomènes de spallation. Le dopage en Gd réduit significativement ces bruits de fond en réclamant la détection en coïncidence du positron et du neutron. Il est important de noter que les limites actuelles obtenues par SK

dans la recherche du DSNB sont du même ordre de grandeur que les modèles théoriques les plus optimistes laissant suggérer une détection dans les prochaines années.

Le détecteur Hyper-Kamiokande (HK) sera le successeur SK. Avec un volume fiduciel 8 fois supérieur et une expérience accumulée de plus de 25 ans, cette nouvelle expérience extrêmement versatile explorera avec une sensibilité sans précédent toute une gamme de processus physiques dans une gamme d'énergie allant du MeV au GeV. Ceci incluant entre autre les neutrinos solaires et atmosphériques, les neutrinos de supernovas et du DSNB, les neutrinos de faisceau et la découverte de la violation CP, l'astrophysique des neutrinos, l'étude de la matière noire et de la désintégration du proton [3]. Le site accueillant ce nouveau détecteur est actuellement en cours d'excavation pour un début de prise de données en 2027.

L'équipe neutrino du Laboratoire Leprince-Ringuet situé à l'Ecole polytechnique (<https://11r.in2p3.fr/>) a été créé en 2006 par Michel Gonin. Elle est actuellement composé de 5 chercheurs permanents et de 3 étudiants en thèse avec une expertise à la fois sur les neutrinos de hautes (violation CP, hiérarchie de masse, ...) et de basses énergies (de supernovas, de réacteurs ou neutrinos solaires). Nous sommes impliqués dans trois expériences au Japon. Nous avons contribué à la découverte du phénomène d'apparition des neutrinos dans l'expérience T2K et fournit les première indications de violation CP dans le secteur leptonique [4]. Nous avons rejoint l'expérience SK en 2016 dans laquelle notre groupe s'est spécialisé dans la partie basse énergie de l'expérience via la recherche du signal DSNB (boosting d'arbre de décision, réseau de neurones) et la simulation, l'évaluation et la compréhension des bruits de fond de spallation [5]. Nous travaillons actuellement au développement de la future expérience HK avec un projet de digitisation de tous les photo-multiplicateurs (PMTs) de l'expérience. Cette électronique est basée sur la numérisation de la forme d'onde (waveform digitisation) qui ouvre des possibilités nouvelles pour la physique de HK. Une première version du système de lecture (basée sur le chip HKROC) est actuellement en cours de test avec comme caractéristiques principales une grande gamme dynamique permettant la physique du MeV jusqu'à la centaine de GeV, une excellente résolution en charge et en temps ainsi qu'un temps mort négligeable (< 100 ns).

Le candidat sélectionné participera aux analyses de SK ainsi qu'au développement et aux tests de l'électronique de lecture des PMTs de HK. En ce qui concerne les analyses SK, le candidat sélectionné pourra, selon son appétance, apporter une contribution majeure aux activités centrales du groupe dans la recherche du DSNB à la fois en terme de signal et de réjection des bruits de fond ou dans l'étude des oscillation de neutrinos solaires (effet MSW) et de neutrinos atmosphériques (hiérarchie de masse). Il pourra également poursuivre un travail phénoménologique de développement de nouveaux outils permettant l'interprétation d'une découverte potentielle du DSNB et en particulier son impact sur les modèles de supernovas et formation de trous noirs sans émission de lumière. Il manque à l'heure actuelle des outils phénoménologiques qui pourront être exploités afin de créer un pont entre théoriciens et expérimentateurs. Ce travail bénéficiera de nos excellentes relation avec des théoriciens des neutrinos et des supernovas. La construction en cours de HK offre un potentiel de recherche exceptionnel pour le candidat et extrêmement complémentaire à celui de SK. En plus du développement de l'électronique, le candidat pourra poursuivre ou commencer le développement d'algorithmes de reconstruction novateurs qui seront utilisés demain sur HK.

Références

- [1] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande], "First gadolinium loading to Super-Kamiokande," Nucl. Instrum. Meth. A **1027** (2022), 166248 <https://arxiv.org/pdf/2109.00360.pdf>
- [2] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande], "Diffuse supernova neutrino background search at Super-Kamiokande," Phys. Rev. D **104** (2021) no.12, 122002 <https://arxiv.org/pdf/2109.11174.pdf>
- [3] K. Abe *et al.* [Hyper-Kamiokande], "Hyper-Kamiokande Design Report," <https://arxiv.org/pdf/1805.04163.pdf>
- [4] K. Abe *et al.* [T2K], "Constraint on the matter–antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations," Nature **580** (2020) no.7803, 339-344 [erratum : Nature **583** (2020) no.7814, E16] <https://arxiv.org/pdf/1910.03887.pdf>
- [5] S. Locke *et al.* [Super-Kamiokande], "New Methods and Simulations for Cosmogenic Induced Spallation Removal in Super-Kamiokande-IV," <https://arxiv.org/pdf/2112.00092.pdf>