

## DIFFUSION COHERENTE DES NEUTRINOS SUR NOYAUX ET RECHERCHE DE NOUVELLE PHYSIQUE AVEC L'EXPERIENCE NUCLEUS

### DESCRIPTION (FR)

Ce sujet de thèse s'inscrit dans le cadre de l'expérience NUCLEUS [1], qui a pour but de mesurer précisément le processus de diffusion cohérente des neutrinos sur noyaux (DCNN) sur la centrale nucléaire de Chooz dans les Ardennes. Bien qu'aux énergies du  $\sim$ MeV, la DCNN soit le mode prépondérant d'interaction des neutrinos avec la matière, elle est restée très longtemps inobservée à cause de la difficulté à mesurer les faibles reculs nucléaires qu'elle produit. Ce n'est que 40 ans après sa première prédiction que ce processus a été observé pour la première fois en 2017 avec des neutrinos de quelques dizaines de MeV au laboratoire d'Oak Ridge, Tennessee [2]. La première détection du processus sur un réacteur nucléaire reste à faire, notamment parce que les reculs nucléaires correspondants se situent dans une gamme en énergie ( $\sim$ 100 eV) difficilement mesurable avec des technologies de détection conventionnelles, mais aussi à cause des conditions de bruit de fond généralement défavorables qu'offre l'environnement d'une centrale nucléaire. La collaboration NUCLEUS travaille ainsi à la conception d'un système de détection utilisant deux réseaux de calorimètres cryogéniques capables d'atteindre des seuils de l'ordre de 10 eV, et entourés par un double système de blindages cryogéniques instrumentés. Cet ensemble de détecteurs cryogéniques sera lui-même protégé par un blindage radiologique externe et par un véto muon pour améliorer l'identification et la discrimination des bruits de fond typiquement présents sur un site expérimental en surface tel que celui identifié à Chooz. Avec ce système, NUCLEUS a pour objectif une mesure précise de la DCNN afin de pousser l'étude des propriétés fondamentales du neutrino ainsi que la recherche de nouvelle physique vers les basses énergies, domaine qui reste aujourd'hui largement inexploré. D'autre part, la DCNN se distingue des canaux usuels de détection des neutrinos du MeV (désintégration beta inverse, diffusion neutrino-électron), par une section efficace 10 à 1000 fois supérieure, permettant d'entrevoir une miniaturisation des détecteurs de neutrinos à longue portée. La première phase de l'expérience NUCLEUS déploiera ainsi réseau de calorimètres cryogéniques composé de cristaux de saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et de tungstate de calcium ( $\text{CaWO}_4$ ) totalisant 10 g de détecteur. Plusieurs applications

intéressantes pourraient découler de cette percée technologique, comme la détection et l'étude des neutrinos solaires et de supernovæ, ou encore la surveillance à distance des réacteurs nucléaires.

Outre la caractérisation et l'aménagement du site expérimental à Chooz, notre équipe à l'Irfu travaille au cœur des problématiques de bruit de fond à travers plusieurs développements instrumentaux. Le DPhP est notamment fortement impliqué dans la réalisation de l'un des blindages cryogéniques instrumentés de l'expérience, appelé ici véto cryogénique externe. Ce dernier consiste en un arrangement de cristaux de Germanium haute pureté, érigé hermétiquement tout autour des deux réseaux de calorimètres cryogéniques, et opérés en mode ionisation. Ce système de détection jouera un rôle central pour l'identification et la discrimination des bruits de fond venants de l'extérieur, tels que la radioactivité ambiante ou les muons atmosphériques issus de l'interaction du rayonnement cosmique primaire dans l'atmosphère. L'exploitation des données délivrées par ce détecteur est une entrée naturelle dans l'effort d'analyse des premières données de l'expérience, qui arriveront en 2021/2022 lors de la phase d'assemblage à blanc dans les locaux de l'université technique de Munich, et lors du premier run de physique prévu en 2023 à Chooz.

Le travail proposé dans cette thèse s'articulera donc autour du véto cryogénique externe de l'expérience, avec l'objectif ultime de comprendre et de caractériser finement les bruits de fond dans la région d'intérêt du signal DCNN, entre 0.01 et 1 keV. Ce travail mènera naturellement à la première détection d'un signal DCNN à Chooz, avec en ligne de mire des premières contraintes sur l'existence de nouvelle physique dans cette gamme en énergie (mesure de l'angle de Weinberg, recherche de nouveaux couplages des neutrinos à la matière, études des propriétés électromagnétiques du neutrino, etc.).

Un facteur limitant le potentiel de l'expérience pour la recherche de nouvelle physique sera à terme la robustesse et la précision des modèles de spectres antineutrinos émis par un réacteur nucléaire. En parallèle de ses activités instrumentales dans NUCLEUS, le DPhP a donc commencé un travail de réévaluation de ces modèles, avec une attention particulière portée à la partie basse énergie du spectre ( $E \leq 1.8$  MeV) à laquelle la DCNN serait sensible. Une partie du travail de thèse pourrait ainsi être orientée vers l'élaboration d'une prédiction robuste du signal

DCNN attendu dans NUCLEUS, s'appuyant à la fois sur des données expérimentales de référence provenant d'expériences utilisant la réaction de désintégration beta inverse (Double Chooz [3], Daya Bay [4], STEREO [5]) et des calculs fins de physique nucléaire pour pallier aux hypothèses souvent simplistes actuellement utilisées pour la modélisation des branches bêta composant un spectre antineutrino de réacteur.

### ÉTAPES DU TRAVAIL

La priorité en début de thèse sera mise sur la réalisation et la mise en service du véto cryogénique externe lors de la phase d'assemblage à blanc à Munich. Ce travail comprend l'assemblage des différents éléments du détecteur (cristaux, mécanique de support, électronique de lecture, etc.) dans le cryostat de l'expérience, et inclut l'ensemble des tests à mener pour valider le fonctionnement et qualifier les performances de ce détecteur. Ces travaux feront l'objet de publications techniques et de physique.

Dans un second temps, l'étudiant(e) montera en puissance sur l'effort d'analyse des données de l'expérience en contribuant au développement d'outils d'analyse et de simulation pour exploiter les mesures de bruit de fond et les données d'étalonnage des détecteurs acquises lors de la phase d'assemblage à blanc et lors du premier run de physique. L'expertise acquise sur le véto cryogénique externe lui permettra de jouer un rôle central dans cette tâche. Il (elle) pourra se concentrer sur l'étude d'une source spécifique de bruit de fond externe, et quantifier son impact sur le potentiel de physique de l'expérience. Ce travail nécessitera non seulement une bonne compréhension des processus gouvernant les interactions rayonnement-matière, mais aussi une bonne maîtrise de la physique du solide sous-jacente au fonctionnement des détecteurs cryogéniques (par exemple, propagation des phonons).

Pour terminer, l'étudiant(e) utilisera les premières données issues du run de physique à Chooz pour mener une étude originale sur la recherche de nouvelle physique avec la DCNN, portant sur l'un de sujets précédemment mentionnés. Ce travail nécessitera de mettre en place des outils fins de traitement statistique des données, afin d'une part de comprendre l'impact des différentes sources d'incertitudes sur les contraintes obtenues, et d'autre part de garantir la fiabilité des résultats.

A travers ce travail l'étudiant(e) aura ainsi acquis une formation complète de physicien expérimentateur avec des aspects d'analyse de données, de simulation, d'instrumentation et de

mise au point des détecteurs. La thématique de la diffusion cohérente des neutrinos sur noyaux est très active dans la communauté, et lui offrira une grande visibilité ainsi que de nombreuses perspectives de recherche à l'issue de la thèse.

### ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

L'étudiant(e) évoluera au sein du groupe « neutrinos de basse énergie » qui se partage entre le département de physique des particules (DPhP) et le département de physique nucléaire (DPhN) de l'Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers (Irfu) au CEA Paris-Saclay. L'équipe possède une expertise internationale reconnue en physique des antineutrinos de réacteur (expériences Double Chooz, Nucifer et STEREO) et en physique des neutrinos de basse énergie (expériences CUORE, CUPID et KATRIN). L'étudiant(e) bénéficiera également du caractère « transverse » du neutrino, et sera en interaction régulière avec les communautés de physique nucléaire, de physique des particules et de physique des réacteurs. Dans son travail quotidien, il (elle) interagira avec aussi avec les départements d'ingénierie de l'Irfu en charge de la conception et de la coordination technique de l'expérience.

A l'extérieur du CEA, l'étudiant(e) évoluera dans la collaboration internationale NUCLEUS, regroupant des partenaires en Allemagne, Italie et en Autriche. Il (elle) sera amené(e) à travailler en proche collaboration avec ces derniers.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. Angloher et al., EPJ **C** 79 (2019) 12, 1018.
- [2] D. Akimov et al., Science 03 (2017)
- [3] F. Ardellier et al., arXiv :0606025 (2006)
- [4] F. An et al., Chin. Phys. C, 41 (2017) 013002
- [5] H. Almazan et al. PRL 121 (2018) 161801

### FINANCEMENT DU PROJET DOCTORAL

Financements envisagés : Contrat de Formation par la Recherche du CEA, bourse de l'école doctorale.

### PROFIL ET COMPETENCES RECHERCHEES

Formation en physique expérimentale, avec spécialisation en physique des particules ou physique nucléaire.

Compétences en programmation orientée objet

### CONTACTS

Mathieu VIVIER – IRFU/DPhP  
[mathieu.vivier@cea.fr](mailto:mathieu.vivier@cea.fr) - 01 69 08 66 26