

Prospectives du département de physique des particules : la physique des neutrinos au-delà de PMNS

Matthieu Vivier*

Octobre 2017

Table des matières

1	Recherches de neutrinos stériles	2
1.1	Test de l'anomalie des $\bar{\nu}_e$ de réacteurs et recherche de stériles légers	2
1.1.1	Flux de $\bar{\nu}_e$ de réacteurs	2
1.1.2	Recherches d'oscillations à courtes distances	2
1.2	Neutrinos stériles au keV	4
1.2.1	Recherches en laboratoire	4
1.2.2	Recherches indirectes	5
1.3	Neutrinos stériles au GeV	5
2	Vers la conquête des basses énergies	6
2.1	Diffusion cohérente des neutrinos sur noyaux : un portail vers de la nouvelle physique ?	6
2.2	Mesure directe de l'échelle de masse des neutrinos	7
2.3	Détecter les neutrinos du Big Bang	7
2.4	Voie technologique envisagée	8
3	Synthèse	8

*matthieu.vivier@cea.fr

1 Recherches de neutrinos stériles

1.1 Test de l'anomalie des $\bar{\nu}_e$ de réacteurs et recherche de stériles légers

Les anomalies à courtes distances observées dans les expériences d'oscillation de neutrinos stimulent actuellement de nombreux efforts expérimentaux pour la recherche de neutrinos stériles. En particulier, l'anomalie des $\bar{\nu}_e$ de réacteur (RAA) publiée en 2011 par le groupe Double Chooz de l'Irfu [1], est parmi celles qui suscitent le plus de débats. Cette anomalie est notamment la conséquence d'une ré-évaluation à la hausse des flux de $\bar{\nu}_e$ émis par un réacteur nucléaire [2, 3]. Elle consiste en un déficit systématique des taux de $\bar{\nu}_e$ observés comparés aux taux attendus par une vingtaine d'expériences situées à moins de 100 m d'un réacteur. Si cette anomalie n'est pas la conséquence d'un biais systématique commun ou bien d'une prédiction erronée des flux de $\bar{\nu}_e$ émis par un réacteur, alors celle-ci pourrait s'interpréter comme un nouveau mode d'oscillation vers un quatrième neutrino, dit stérile, dont la masse serait de l'ordre de l'eV [1].

1.1.1 Flux de $\bar{\nu}_e$ de réacteurs

Depuis 2011, de nouveaux résultats expérimentaux et théoriques ont été publiés sur les flux de $\bar{\nu}_e$ de réacteurs, sans pour autant éclaircir la situation sur la RAA. Les plus importants sont certainement les résultats de la collaboration Daya Bay [4, 5], qui mettent en doute les calculs des flux de $\bar{\nu}_e$ de réacteur, et ceci notamment au regard de deux points : l'observation d'écart significatifs en forme dans le spectre $\bar{\nu}_e$ mesuré mettant en avant une "distorsion" dans la région de 4 à 6 MeV¹ et une mesure du flux de $\bar{\nu}_e$ émis par fission de l'²³⁵U indiquant que ce dernier serait surestimé par les prédictions actuelles. L'ensemble de ces résultats motivent régulièrement de nouveaux travaux théoriques sur la prédiction des spectres $\bar{\nu}_e$ de réacteurs (voir [9] pour une revue de l'état de l'art des calculs), la plupart mettant en avant des faiblesses dans les prédictions actuelles et des budgets d'incertitudes sous-estimés. Comme souligné récemment dans plusieurs publications [10, 11, 12], ces résultats ne permettent cependant pas d'affirmer avec certitude que la RAA est la conséquence d'une prédiction erronée des flux. D'autre part, il vient récemment d'être démontré que les distorsions observées dans les spectres pouvaient résulter de biais résiduels dans l'étalonnage de la réponse en énergie des détecteurs [13].

Pour éclaircir la situation sur le calcul des flux de $\bar{\nu}_e$ de réacteurs, le groupe « Neutrinos de basses énergies » du DPhP s'est proposé de revisiter et d'affiner les calculs au sein du projet NENUFAR (New Evaluation of Neutrino Fluxes At Reactors), qu'il mène en partenariat avec le DPhN et le SERMA à la DEN. Le projet NENUFAR a été financé une première année par le PTC « Simulation numérique », et devrait démarrer très prochainement, avec pour ambition de s'étendre à d'autres partenaires (DRT et DAM au CEA).

1.1.2 Recherches d'oscillations à courtes distances

Le tableau 1 donne un aperçu des programmes expérimentaux actuellement engagés pour rechercher des oscillations à courtes distances et tester la RAA. Il est important de mentionner que ces derniers cherchent non seulement à mesurer un déficit, mais aussi à observer une modulation du taux de neutrinos détectés en fonction de l'énergie et/ou de la distance, signature incontestable

1. De telles distorsions ont aussi été observées par les expériences Double Chooz [6], RENO [7] et NEOS [8].

de l'existence d'un quatrième type de neutrino. Il est dans un premier temps intéressant de mentionner les expériences NEOS [8] et DANSS² [14], qui ont délivré leurs premiers résultats cette année. Elles n'ont pas observé de modulation significative du taux de $\bar{\nu}_e$ détectés en fonction de l'énergie ou de la distance, réduisant l'espace des paramètres possibles (voir figure 1 à gauche) dans le plan $(\sin^2 2\theta_{ee}, \Delta m_{41}^2)$. Les résultats des dernières analyses combinées sont cependant unanimes : ces nouvelles données ne permettent pas de fermement conclure que la RAA est due à une prédiction erronée des flux, et d'exclure l'existence d'oscillations à courtes distances (voir par exemple [12]). Les programmes expérimentaux mis en oeuvre pour tester la RAA restent donc à l'heure actuelle plus que nécessaires.

L'expérience CeSOX [19], dans laquelle le DPhP est fortement impliqué, a l'unique opportunité d'éclaircir définitivement la situation sur la RAA et l'existence d'oscillations à courtes distances. Elle consiste à déployer une source intense de ^{144}Ce à 8.5 m du détecteur Borexino au Gran Sasso. Les résultats de CeSOX ne dépendront donc pas de la modélisation des spectres $\bar{\nu}_e$ de réacteurs. D'autre part, CeSOX a l'avantage d'être sans bruits de fond. La fabrication de 150 kCi de ^{144}Ce est en passe d'être finalisée dans les installations de l'usine de recyclage de PA Mayak en Russie, avec un déploiement en Avril 2018 pour enchaîner ensuite une année et demie de prise de données. Les premiers résultats de l'expérience sont attendus pour 2019 : ils seront dans tous les cas décisifs pour confirmer ou infirmer la RAA (voir figure 1 à droite). A noter qu'au sein de l'Irfu, l'expérience STEREO [16] proposée par le DPhN va aussi tester la RAA, d'une manière complémentaire à CeSOX. Le détecteur STEREO est installé sur le réacteur de l'Institut Laue Langevin (ILL) à Grenoble depuis la fin de l'année 2016, et devrait bientôt fournir ses premiers résultats. Il va notamment comparer les variations relatives des spectres $\bar{\nu}_e$ entre ses 6 cellules identiques pour aller chercher une modulation du taux de $\bar{\nu}_e$ avec la distance, chose que ne peut par exemple pas faire un détecteur comme NEOS. STEREO a aussi pour objectif d'établir une mesure précise des spectres $\bar{\nu}_e$ émis par le réacteur de l'ILL afin de tester les prédictions actuelles.

Nom	Source	Distance	Technologie	Status	Réf
NEOS	Réacteur $\bar{\nu}_e$	24 m	LS	Terminé	[8]
DANSS	Réacteur $\bar{\nu}_e$	10-12 m	PS, segmenté	En prise de données	[14]
PROSPECT	Réacteur $\bar{\nu}_e$	7-12 m	LS, segmenté	En développement	[15]
STEREO	Réacteur $\bar{\nu}_e$	9-12 m	LS, segmenté	En prise de données	[16]
SoLid	Réacteur $\bar{\nu}_e$	5.5-10 m	PS, segmenté	En développement	[17]
Neutrino-4	Réacteur $\bar{\nu}_e$	6-12 m	LS	En prise de données	[18]
CeSOX	^{144}Ce $\bar{\nu}_e$	4-16 m	LS	Données en 2018	[19]
BEST	^{51}Cr ν_e	O(1 m)	Gallium	En développement	[20]

TABLE 1 – Aperçu des principaux programmes expérimentaux engagés pour la recherche d'oscillations de neutrinos à courtes distances. Les mentions « LS » et « PS » signifient liquide scintillant et plastique scintillant, respectivement. Sont indiqués en gras les programmes expérimentaux dans lesquels l'Irfu est engagé.

2. L'expérience DANSS a aussi fourni une mesure du spectre $\bar{\nu}_e$ du réacteur sur lequel elle opère. Contrairement aux autres expériences, aucune distorsion en forme n'a été mesurée.

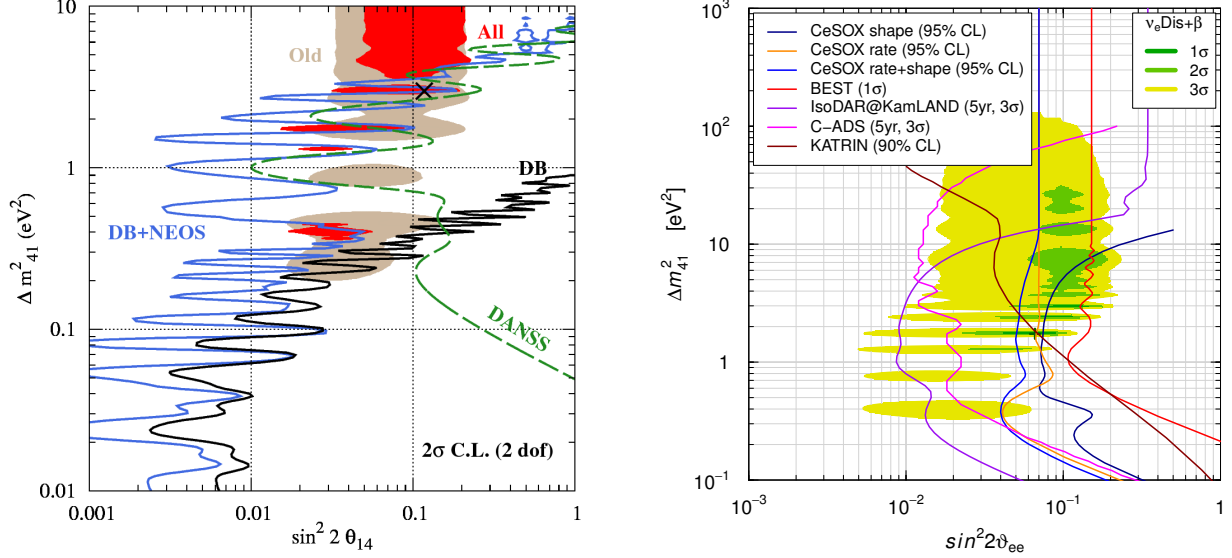


FIGURE 1 – Situation actuelle sur la RAA et la recherche de neutrinos stériles dans les canaux de disparition $\nu_e \rightarrow \nu_e$ et $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$. Gauche : comparaison des courbes d’exclusions obtenues par les expériences Daya Bay, NEOS et DANSS aux anciens et nouveaux contours de la RAA obtenus respectivement avec les anciennes expériences réacteur et ces dernières combinées aux nouvelles. Figure tirée de [12]. Droite : comparaison de la sensibilité de diverses expériences, dont CeSOX, pour aller tester les nouveaux contours de la RAA. Figure tirée de [11].

1.2 Neutrinos stériles au keV

Les neutrinos stériles dont la masse est à l’échelle du keV apparaissent dans les extensions minimales du modèle standard ν MSM [21, 22] et sont des candidats intéressants pour l’explication de la matière noire [23].

1.2.1 Recherches en laboratoire

Les recherches « en laboratoire » de neutrinos stériles au keV se font principalement par la spectroscopie de radionucléides émetteurs β , notamment le tritium ^3H . L’existence d’un neutrino stérile au keV se manifesterait par une rupture de pente dans le spectre β mesuré, dont l’emplacement et l’amplitude dépendent de sa masse m_4 et de son mélange avec la saveur électronique U_{e4} . A l’heure actuelle, les limites les plus contraignantes sont placées par les expériences Mainz [24] et Troitsk [25], dont le but est initialement de mesurer la masse effective du neutrino m_{ν_e} . Elles atteignent difficilement $|U_{e4}|^2 \lesssim 0.01$ pour $0.1 \leq m_4 \leq 10$ keV.

L’expérience KATRIN [26], conçue pour mesurer la masse effective du neutrino m_{ν_e} avec une sensibilité de 0.2 eV (90% CL), pourrait contraindre de la même manière l’existence de neutrinos stériles au keV. Cependant, la conception actuelle du spectromètre ne permet pas de mesurer l’intégralité du spectre β de la source moléculaire de ^3H haute activité utilisée, mais seulement la partie haute énergie. Le projet TRISTAN amorcerait donc une deuxième phase de l’expérience KATRIN, dans laquelle les senseurs en sortie du spectromètre seraient remplacés par des détecteurs pixelisés au silicium notamment conçus pour supporter de plus larges taux de comptage. Une série de plusieurs

prototypes a été caractérisée avec succès l’année dernière avec une électronique de lecture à bas bruit développée au DaP et au DEDIP, puis testée lors d’un voyage en ballon dans la stratosphère [27]. La gamme de sensibilité que pourrait atteindre TRISTAN serait de $|U_{e4}|^2 \lesssim 10^{-7}$ pour $1 \leq m_4 \leq 10$ keV, venant améliorer les limites actuelles de plusieurs ordres de grandeur [28]. Il est à noter que des expériences comme PTOLEMY [46] ou Project 8 [30], toutes les deux utilisant du tritium mais dont les objectifs de physiques sont différents, pourraient aussi contraindre l’existence de neutrinos stériles à l’échelle du keV [23].

Pour terminer, le groupe « neutrinos de basses énergies » a proposé l’année dernière un concept d’expérience original tirant profit de la possibilité de pouvoir capturer des ν_e « piégés » dans notre galaxie sur du ^{163}Dy , réaction qui présente un seuil de 2,8 keV, mais qui serait possible via le mélange U_{e4} d’un éventuel état de masse à l’échelle du keV [31]. Le principe de l’expérience consisterait à compter les atomes d’ ^{163}Ho produits lors de cette réaction de capture dans un minerais soigneusement sélectionné. La méthode de comptage des atomes d’ ^{163}Ho est cependant difficile à mettre en œuvre, et combinerait plusieurs techniques allant de l’extraction chimique en passant par de la spectrométrie de masse et l’utilisation de pièges magnéto-optiques. Les principaux autres modes de production d’ ^{163}Ho , sources de bruits de fond pour signer la capture de ν_e sur dysprosium, viennent de la capture de ν_e solaires et de la radioactivité naturelle (par exemple, réactions (n,γ) sur de ^{162}Er). Après estimation de ces bruits de fond, les sensibilités qu’une telle expérience pourrait atteindre sont de l’ordre de $|U_{e4}|^2 \lesssim 10^{-5}$ pour quelques kg de minerais traité.

1.2.2 Recherches indirectes

La recherche de neutrinos stérile au keV peut aussi se faire indirectement par des observations astrophysiques ou cosmologiques. Citons en particulier les observations X d’objets denses en matière noire comme les galaxies naines ou les amas de galaxie, ou bien les l’observation des forêts Lyman- α (voir [23] pour une revue). Les limites atteintes sont meilleures que celles obtenues en laboratoire : $|U_{e4}|^2 \lesssim 10^{-7} - 10^{-13}$ pour $1 \leq m_4 \leq 50$ keV, mais certainement moins robustes dans le sens où elles peuvent dépendre davantage de modèles et d’hypothèses.

1.3 Neutrinos stériles au GeV

Pour expliquer la faible masse des neutrinos (mécanisme de seesaw) et l’asymétrie matière-antimatière de l’Univers, les extensions minimales du modèle standard proposent aussi l’ajout de plusieurs neutrinos lourds d’hélicité droite dont la masse est à l’échelle du GeV, voire au-delà. Le DPhP mène quelques travaux de recherche sur les neutrinos lourds au travers des expériences T2K et celles installées sur le LHC (ATLAS et CMS). En particulier, T2K recherche des neutrinos lourds dans son détecteur proche ND280 via les canaux de désintégration $N \rightarrow \mu^\pm \pi^\mp$ et $N \rightarrow e^\pm \pi^\mp$ [32]. L’expérience T2K est typiquement sensible à des gammes de masses allant de 100 à 500 MeV. Avec la totalité de la statistique prévue, cette dernière sera sensible à des mélanges de l’ordre de $U_{e1}^2, U_{\mu 1}^2 \sim 10^{-9} - 10^{-10}$, venant améliorer d’au moins un facteur 10 les limites actuelles et flirter avec les contraintes théoriques imposées par exemple par la nucléosynthèse et l’asymétrie baryonique de l’Univers primordial [33]. Les recherches dans CMS et ATLAS concernent des gammes de masses supérieures, allant d’environ quelques dizaines de GeV à plusieurs centaines de GeV. Les sensibilités des expériences ATLAS et CMS correspondent à des mélanges de l’ordre de $U_{e1}^2, U_{\mu 1}^2, U_{\tau 1}^2 \sim 10^{-4} - 10^{-5}$ [33]. À signaler que le futur projet SHiP [34], dont les détecteurs seront installés sur le SPS au CERN et qui a pour but d’aller sonder la physique du « secteur caché » (photons cachés, leptons

neutres lourds, etc...), viendra compléter et améliorer significativement les limites pour la recherche de neutrinos stériles de masses $\gtrsim 500$ MeV.

2 Vers la conquête des basses énergies

Atteindre et explorer le domaine des « basses » énergies est un moyen prometteur pour répondre à plusieurs questions touchant la physique fondamentale du neutrino. Ce paragraphe traite de manière non-exhaustive les sujets de physique suivants : diffusion cohérente des neutrinos sur noyaux (DCNN), mesure de l'échelle de masse absolue des neutrinos et la détection des neutrinos reliques du Big Bang. Une voie technologique prometteuse pour contribuer à chacun de ces sujets est la bolométrie basse température.

2.1 Diffusion cohérente des neutrinos sur noyaux : un portail vers de la nouvelle physique ?

La DCNN est un processus prédit en 1974 par D. Z. Freedman [35] et observé pour la première fois plus de 40 années après par la collaboration américaine COHERENT [36]. Ce processus de diffusion élastique sur un noyau dans son ensemble et non plus uniquement sur un nucléon, n'est possible que si les impulsions échangées correspondent à des longueurs d'ondes équivalentes à la taille de ce dernier ($qR \lesssim 1$, i.e. 30 MeV pour un noyau lourd comme le plomb). La section efficace de ce processus peut ainsi atteindre des valeurs 10 à 1 000 fois plus grandes que celles des canaux d'interactions actuellement utilisés pour la physique du neutrino. Le principal obstacle à l'observation et la mesure de la DCNN est la détection des faibles énergies de reculs nucléaires, qui sont de l'ordre de 0.01-1 keV et dépendent de l'énergie du neutrino incident ainsi que de la masse du noyau cible. Développer une technologie permettant la mesure des plus faibles énergies de recul permettrait via ce processus de nouvelles mesures des propriétés fondamentales du neutrino (mesure du moment magnétique, recherche de stériles) ainsi que de réaliser des tests fins du modèle standard aux basses énergies pour aller chercher de la nouvelle physique (mesure de l'angle de Weinberg, recherches de bosons vecteurs Z légers, recherches d'interactions non-standards, etc...). À plus long terme, ce processus d'interaction pourrait aussi permettre de développer des détecteurs de neutrinos compacts utiles pour la non-prolifération et la surveillance à distance des centrales nucléaires, une application sociétale dans laquelle le CEA est naturellement engagé avec par exemple le projet Nucifer [37]. Une perspective très intéressante concerne d'ailleurs la mesure des flux $\bar{\nu}_e$ de réacteur sous le seuil « usuel » de la désintégration bêta inverse (1,8 MeV), car la DCNN est une réaction sans seuil. En particulier, la DCNN offrirait la possibilité d'observer en temps réel la formation de ^{239}Pu dans un cœur en début de cycle³.

À l'heure actuelle, plusieurs groupes sont à pied d'œuvre pour mesurer le processus de DCNN. En particulier, la collaboration COHERENT est la première et unique expérience à avoir observé ce processus, et ceci en utilisant des neutrinos de quelques dizaines de MeV produits au « Spallation Neutron Source » (SNS) du laboratoire national d'Oakridge (Tennessee). Ce processus reste cependant à observer via les neutrinos de réacteurs. Ces derniers offrent d'ailleurs des perspectives plus intéressantes pour les tests de physique fondamentale cités juste avant, car ils sont de plus basses

3. Le ^{239}Pu est produit par deux désintégrations β^- successives de l' ^{239}U (dont les énergies de décroissance Q_β sont inférieures au seuil de la désintégration bêta inverse), lui-même produit par capture neutronique sur l' ^{238}U .

énergies ($E \sim 3 \text{ MeV}$). En ce qui concerne le DPhP, des discussions sont en cours avec deux partenaires potentiels (le groupe franco-américain du projet Ricochet au MIT/IPNL [38] et le groupe allemand du projet ν -CLEUS au MPI de Munich [39]) pour construire un détecteur à moins de 100 m des cœurs de la centrale de Chooz. Deux autres projets expérimentaux essaient aussi d’observer ce processus via les $\bar{\nu}_e$ de réacteurs : la collaboration MINER [40] qui compte installer des détecteurs cryogénique au germanium à 2 m d’un réacteur de recherche à l’université du Texas, et la collaboration CONNIE [41] qui utilise des senseurs CCDs à 30 m du réacteur Angra-II sur la centrale d’Angra dos Reis au Brésil.

2.2 Mesure directe de l’échelle de masse des neutrinos

Développer des détecteurs capables de mesurer les plus basses énergies est aussi d’un grand intérêt pour une mesure directe et précise de l’échelle de masse des neutrinos. En particulier, les mesures calorimétriques de radionucléides se désexcitant par désintégration β ou par capture électronique avec de faibles énergies de décroissance Q_β (« endpoint energy » en anglais) sont des alternatives intéressantes à la spectroscopie du tritium proposé par des expériences comme KATRIN [26] ou plus récemment Project 8 [30].

Plusieurs efforts collaboratifs sont en cours dans ce domaine. Les expériences HOLMES [42] et ECHO [43] cherchent à mesurer le spectre des radiations émises suite au processus de capture électronique dans l’ ^{163}Ho (rayons X, électrons Auger et recul du noyau), pour lequel $Q_\beta \sim 2,5 \text{ keV}$. De manière similaire, l’expérience MARE [44] a dans un premier temps cherché à mesurer le spectre beta du ^{187}Re , dont l’énergie de décroissance est voisine de celle du ^{163}Ho . Mais face aux difficultés techniques rencontrées pour atteindre les spécifications requises vis à vis de la technologie choisie, cette dernière s’est progressivement tournée vers l’utilisation de l’ ^{163}Ho . Le principe expérimental vers lequel se sont tournés chacun de ces groupes est basé sur l’utilisation d’un réseau d’un millier de micro-calorimètres dans lesquels sont implantés au total quelques μg d’ ^{163}Ho . Dans ce type d’expérience, le principal défi à relever pour pouvoir être sensible à des masses $m_{\nu_e} \lesssim 0,1 \text{ eV}$ est de développer des détecteurs affichant une résolution en énergie inférieure à l’eV et un temps de réponse de l’ordre de la μs . Ces trois projets ont donc tous adoptés la technologie des bolomètres basse température (avec cependant des choix technologiques sensiblement différents en ce qui concerne les senseurs de température) pour construire des expériences pilotes chargées de démontrer le potentiel de cette technique. Ces démonstrateurs affichent une sensibilité sur la mesure de la masse effective du neutrino de l’ordre de $m_{\nu_e} \lesssim 0,5 \text{ eV}$. Dans leur configuration finale, chacune de ces expériences affirme pouvoir atteindre une sensibilité de l’ordre de $0,1 \text{ eV}$.

2.3 Détecter les neutrinos du Big Bang

Le fond cosmologique de neutrinos ($C\nu\text{B}$) est une prédiction du modèle standard de la cosmologie. A l’instar du CMB, le $C\nu\text{B}$ est une population relique du Big Bang mais dont le découplage du bain thermique de l’Univers primordial a eu lieu environ une seconde après ce dernier (contrairement au CMB dont la surface de dernière diffusion remonte à près de 400 000 ans après). Détecter et mesurer le $C\nu\text{B}$ permettrait donc d’ouvrir une fenêtre d’observation de l’Univers primordial à des temps bien plus reculés que ce permettent à l’heure actuelle les observations cosmologiques. La détection du $C\nu\text{B}$ est un des défis majeurs de la physique moderne.

Le principal obstacle à la détection du $C\nu\text{B}$ réside dans le fait que ses neutrinos sont de très faible énergie (de l’ordre de $0,5 \text{ meV}$, donc non relativistes). A ces énergies, la plupart des processus

d'interaction connus sont donc inefficaces voire inopérants. Une des rares solutions proposées est la capture de neutrinos sur un noyau instable $\nu_e + A_Z \rightarrow e^- + A_{Z+1}^*$, qui présente l'avantage de ne pas avoir de seuil en énergie et de fournir une signature « facile » à détecter (ici un électron d'énergie $E_{e^-} = Q_\beta + m_{\nu_e}$) [45]. L'expérience américaine PTOLEMY [46] développe actuellement un démonstrateur donc le principe de détection est basé sur la capture de neutrinos du $C\nu B$ sur du tritium. Le tritium présente l'avantage d'avoir une durée de vie suffisamment longue pour pouvoir conduire une première expérience de détection sur plusieurs années. Le principe de l'expérience est extrêmement difficile à mettre en oeuvre. Il découle de plusieurs objectifs à atteindre pour pouvoir espérer détecter quelques événements au cours d'une année d'observation : implantation de 100 g de tritium (1 MCi) sur un disque de graphène de 12 m de diamètre, sélection de la partie haute du spectre beta du ^3H pour la mesure des électrons (filtre MAC-E à la KATRIN), suppression des bruits de fond à un niveau inférieur au μHz (cyclotron radiation emission spectroscopy à la Project 8 + mesures de temps de vol) et résolution en énergie de 0,1 eV (réseau de détecteurs cryogéniques ultra-performants). Ici encore, l'un des verrous technologiques à faire sauter pour pouvoir observer et étudier le $C\nu B$ concerne le développement de détecteurs cryogéniques pouvant atteindre des résolutions de l'ordre de 0,1 eV.

2.4 Voie technologique envisagée

Les défis techniques qu'imposent de relever les cas de physique présentés ci-dessus sont de plusieurs ordres : pouvoir déceler des dépôts d'énergie extrêmement faibles $\lesssim 10 - 100 \text{ eV}$ (DCNN), disposer de détecteurs dont la résolution en énergie est inférieure au pour mille et dont la résolution en temps est de l'ordre de la μs (mesure de la masse du neutrino, détection du $C\nu B$, DCNN).

Une voie technologique prometteuse et incontournable pour atteindre l'ensemble de ces objectifs est la bolométrie très basse température. Ce principe de détection est en développement et progression constante depuis les premières expériences de détection directe de matière noire, et pour lequel le DPhP possède un savoir-faire et une certaine expérience acquis dans le cadre de l'expérience EDELWEISS. Poursuivre le développement de détecteurs bolométriques de hautes performances est très certainement une voie prometteuse pour les années à venir. C'est dans cet esprit que le projet BASKET (Bolometers At Sub-KeV Thresholds) a été soumis et financé par le PTC « Instrumentation » pour deux ans. Pour tendre vers ces objectifs, le projet BASKET compte aussi bénéficier du savoir faire existant dans les autres directions et instituts du CEA (DRT/LIST & DRT/LETI). À noter que cet axe de recherche en R&D détecteur bénéficierait également aux activités du département concernant la recherche du processus de double désintégration β sans émission de neutrinos.

3 Synthèse

Prospectives à 5-10 ans :

- nouveaux calculs flux $\bar{\nu}_e$ de réacteur avec le projet NENUFAR
- recherches de neutrinos stériles légers avec CeSOX
- recherches de neutrinos stériles au keV avec TRISTAN
- activités R&D sur détecteurs cryogéniques ultra performants avec le projet BASKET
- étude la diffusion cohérente des neutrinos sur noyaux : tests du modèle standard aux basses énergies, et application à la non-prolifération

Références

- [1] G. Mention *et al.*, Phys. Rev. D **83** (2011) 073006
- [2] T. A. Mueller *et al.*, Phys. Rev. C **83** (2011) 054615
- [3] P. Huber, Phys. Rev. C **84** (2011) 024617, Erratum : [Phys. Rev. C **85** (2012) 029901]
- [4] F. P. An *et al.* [Daya Bay Collaboration], Chin. Phys. C **41** (2017) no.1, 013002
- [5] F. P. An *et al.* [Daya Bay Collaboration], Phys. Rev. Lett. **118** (2017) no.25, 251801
- [6] Y. Abe *et al.* [Double Chooz Collaboration], JHEP **1410** (2014) 086, Erratum : [JHEP **1502** (2015) 074]
- [7] S. H. Seo *et al.* [RENO Collaboration], arXiv :1610.04326 [hep-ex]
- [8] Y. J. Ko *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118** (2017) 121802
- [9] A. C. Hayes and P. Vogel, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **66** (2016) 219
- [10] C. Giunti *et al.*, arXiv :1708.01133 [hep-ph]
- [11] S. Gariazzo, *et al.* JHEP **1706** (2017) 135
- [12] M. Dentler *et al.*, arXiv :1709.04294 [hep-ph]
- [13] G. Mention *et al.*, Phys. Lett. B **773** (2017) 307
- [14] I. Alekseev *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **798** (2017) 012152.
- [15] J. Ashenfelter *et al.* [PROSPECT Collaboration], J. Phys. G **43** (2016) no.11, 113001
- [16] L. Manzanillas [STEREO Collaboration], PoS NOW **2016** (2017) 033
- [17] L. N. Kalousis [SoLid Collaboration], J. Phys. Conf. Ser. **888** (2017) 012181
- [18] A. P. Serebrov *et al.*, arXiv :1708.00421 [physics.ins-det]
- [19] B. Neumair [Borexino/SOX Collaboration], PoS ICHEP **2016** (2016) 475
- [20] V. Barinov *et al.*, Phys. Rev. D **93** (2016), 073002
- [21] T. Asaka and M. Shaposhnikov, Phys. Lett. B **620** (2005) 17
- [22] T. Asaka, S. Blanchet and M. Shaposhnikov, Phys. Lett. B **631** (2005) 151
- [23] M. Drewes *et al.*, JCAP **1701** (2017) 025
- [24] C. Kraus *et al.*, Eur. Phys. J. C **73** (2013), 2323
- [25] J. N. Abdurashitov *et al.*, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **105** (2017), 723 [JETP Lett. **105** (2017), 753]
- [26] A. Osipowicz *et al.* [KATRIN Collaboration], hep-ex/0109033.
- [27] Fait marquant IRFU : http://irfu-i.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=3816
- [28] S. Mertens *et al.*, JCAP **1502** (2015), 020
- [29] S. Betts *et al.*, arXiv :1307.4738 [astro-ph.IM]
- [30] D. M. Asner *et al.* [Project 8 Collaboration], Phys. Rev. Lett. **114** (2015), 162501
- [31] T. Lasserre *et al.*, arXiv :1609.04671 [hep-ex]
- [32] M. Lamoureux, « Heavy neutrinos at GeV scale », Neutrino club du DPhP (2016)

- [33] M. Drewes and B. Garbrecht, Nucl. Phys. B **921** (2017) 250
- [34] M. Anelli *et al.* [SHiP Collaboration], arXiv :1504.04956 [physics.ins-det]
- [35] D. Z. Freedman, Phys. Rev. D **9** (1974) 1389
- [36] D. Akimov *et al.* [COHERENT Collaboration], Science (2017) [arXiv :1708.01294 [nucl-ex]].
- [37] G. Boireau *et al.* [NUCIFER Collaboration], Phys. Rev. D **93** (2016), 112006
- [38] A. Leder *et al.*, arXiv :1710.00802 [physics.ins-det].
- [39] R. Strauss *et al.*, Eur. Phys. J. C **77** (2017) 506
- [40] G. Agnolet *et al.* [MINER Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **853** (2017) 53
- [41] A. Aguilar-Arevalo *et al.* [CONNIE Collaboration], J. Phys. Conf. Ser. **761** (2016), 012057
- [42] B. Alpert *et al.* Eur. Phys. J. C **75** (2015), 112
- [43] L. Gastaldo *et al.*, Eur. Phys. J. ST **226** (2017), 1623
- [44] E. Ferri *et al.*, Phys. Procedia **61** (2015) 227
- [45] S. Weinberg, Phys. Rev. **128** (1962) 1457
- [46] S. Betts *et al.*, arXiv :1307.4738 [astro-ph.IM]