

Titre de la thèse	Conception et preuve de principe d'une nouvelle méthode expérimentale pour la mesure des propriétés quantiques des neutrinos
Ecole Doctorale	ED548
Laboratoire(s)	IM2NP- UMR-CNRS 7334
Discipline	CNU 61
Directeur(s) de thèse Encadrant(s)	Directeur de thèse : Antoine ROUEFF (IM2NP) Co-encadrant : Mathieu Perrin-Terrin (CPPM)

Description du sujet de recherche (3 pages max)

Contexte scientifique

Sujet d'études passionnantes, la mer se révèle également être un instrument de mesure unique comme l'ont démontré les détecteurs ANTARES et ORCA qui, depuis plus d'une décennie, utilisent l'eau des abysses de la baie de Toulon pour détecter les neutrinos (<https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/premieres-lumieres-du-detecteur-neutrino-km3netorca>). Ces dernières décennies, les études conduites sur ces particules ont été jalonnées de découvertes retentissantes donnant lieu à l'attribution de trois prix Nobel. Il est aujourd'hui établi que les propriétés quantiques de ces particules pourraient détenir la clef d'un des plus profonds mystères de la physique fondamentale : l'origine de la matière dans l'Univers. A présent, il reste à relever le défi expérimental que la mesure de ces propriétés quantiques représente. De récentes études ont montré qu'une nouvelle méthode expérimentale – la *tagging* – pourrait permettre d'effectuer ces mesures avec une précision record en s'appuyant sur la technologie de détection sous-marine des neutrinos [Perrin-Terrin, M. (2022)].

Dispositif expérimental conventionnel

Les neutrinos (ν) existent selon trois espèces, appelées saveurs : électronique (ν_e), muonique (ν_μ) et tauique (ν_τ). Les expériences de physique des neutrinos visent à mesurer, en fonction de l'énergie des neutrinos, la probabilité qu'ils ont de changer de saveurs durant leur propagation. Ces expériences consistent donc à comparer les caractéristiques des neutrinos avant et après propagation. Le dispositif expérimental conventionnellement employé par ces expériences est représenté schématiquement sur la partie gauche de la Figure 1.

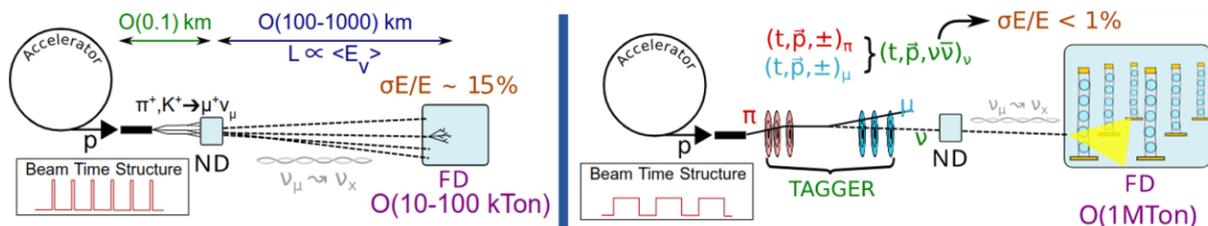


Figure 1 : Dispositif expérimentaux conventionnel (gauche) et utilisant la méthode du tagging (droite). Les neutrinos sont produits à l'aide de faisceaux de protons de haute énergie qui sont collisionnés sur une cible fixe. Ces collisions produisent un faisceau secondaire de particules, des pions (π^+ 's) et des kaon (K^+ 's), qui, en se désintégrant en muon (μ^+) et neutrino (ν_μ), $\pi^+, K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, produisent le faisceau de neutrinos. Ces neutrinos sont dirigés vers une cible instrumentée où une faible fraction d'entre eux interagissent

Ces études expérimentales sont rendues difficiles par la très faible probabilité qu'ont les neutrinos d'interagir dans le détecteur. En effet, la majorité d'entre eux le traversent sans laisser de traces. Ainsi pour collecter des échantillons de neutrinos suffisamment grands, les expériences requièrent des faisceaux de protons intenses, $O(1)$ MW, et des cibles instrumentées de très grandes taille, $O(10)$ kton. D'autre part, les mécanismes physiques qui décrivent les interactions des neutrinos sont mal connues et très variées. Inférer les propriétés des neutrinos à partir de ces interactions est donc très difficile et peu précis.

Méthode du Tagging

La méthode du *tagging* contourne ces difficultés en proposant de déterminer les caractéristiques des neutrinos à partir des désintégrations, $\pi^+, K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ les générant. En s'appuyant sur les lois de conservation de l'énergie et de l'impulsion (\mathbf{p} sur la Figure 1 à droite), les caractéristiques de chaque ν_μ sont obtenues à partir de celles du π^+ et μ^+ ou du K^+ et μ^+ qui sont facilement mesurables pour des particules chargées en utilisant des plans consécutifs de pixels en silicium (**TAGGER** sur la Figure 1).

Cette méthode permet d'estimer l'énergie des neutrinos avec une précision 10 fois supérieure à celle des méthodes basées sur leurs interactions. L'énergie de chaque neutrino étant ainsi connue, il ne reste plus qu'à déterminer sa saveur après propagation. Une cible instrumentée moins finement que dans les dispositifs conventionnels est alors suffisante pour cette tâche de classification. Il est donc possible d'utiliser de grands volumes naturels d'eau de mer instrumentés avec des capteurs de lumières tels qu'ANTARES et ORCA représentés sur la Figure 2. Les masses d'eau ainsi instrumentées atteignent plusieurs méga-tonnes ce qui est 100 fois supérieur aux cibles conventionnellement utilisées.

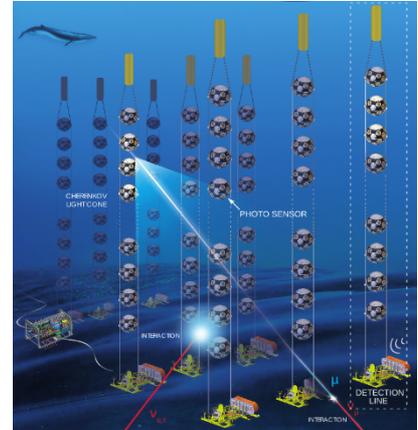


Figure 2 : Représentation schématique du détecteur ORCA. L'interaction d'un ν_μ produit un muon (μ) qui, en se propageant, laisse derrière lui un long sillage de lumière. Au contraire, l'interaction d'un ν_e produit un électron (e) qui, ne se propageant presque pas, apparaît comme une source de lumière quasi-ponctuelle.

Technologiquement, le *tagging* repose sur deux développements innovants : celui de pixels en silicium capables de détecter des taux élevés de particules ($10^{10}/s/cm^2$) et celui de lignes de faisceaux de neutrinos non-pulsées dans le temps. Ces dernières permettent d'abaisser significativement le taux de particules des faisceaux de neutrinos, qui est normalement très haut ($10^{18}/s/cm^2$), et donc d'instrumenter celles-ci avec des pixels pour détecter les π^+ 's et μ^+ 's. Une preuve de principe est en cours en utilisant les données recueillies par l'expérience NA62 au CERN qui a développé, pour d'autres applications, les premières versions de ces technologies. L'échantillon nécessaire à cette étude est en train d'être collecté depuis 2022. Les premières données ont permis de mettre en place les outils d'analyse et indiquent qu'un échantillon significatif ($O(10)$) de neutrino *tagués* seront collectés jusqu'à la fin de la prise de données en 2025.

Le but de cette thèse est la conception et la preuve de principe d'un système dédié à la détection de neutrinos sur la technique du *tagging*. La conception de ce système sera fondée sur l'optimisation des performances en estimation et en détection, c'est-à-dire en prenant en compte notamment les incertitudes sur la ligne de faisceau et sur les capacités du détecteur à pixel. Ce travail de « co-conception » consistera à développer des études statistiques sur la performance du système en amont de sa construction. Pour réaliser cette tâche, l'étudiant(e) bénéficiera : d'une part du savoir-faire de l'équipe Signal et Tracking basée à l'université de Toulon et spécialiste des traitements statistiques du signal, et d'autre part des connaissances en physique des particules de l'équipe Neutrino du Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM). De plus, ce travail sera aussi réalisé en collaboration avec les ingénieurs faisceau du CERN. En pratique, l'étudiant(e) sera basé à l'IM2NP sur le site de Toulon. Son premier travail sera de mettre en place un simulateur de la ligne instrumentée en identifiant les incertitudes du système. Le deuxième travail sera de choisir la configuration expérimentale qui permet d'aboutir à des bornes de performances (e.g. borne de Cramer-Rao pour l'estimation de l'énergie) optimale. Le recours à une borne de performance permet de réaliser une étude indépendante de la technique d'estimation (ou de détection). Celle-ci ne dépend que de la modélisation du système, et en particulier à ses incertitudes. Ce n'est qu'une fois que la configuration a été choisie, si les performances sont satisfaisantes, que l'on abordera le troisième travail qui consiste à construire les algorithmes d'estimation et de détection.

Enfin, l'étudiant(e) pourra tester ces algorithmes sur le dispositif expérimental NA62 au CERN. En effet, bien qu'étant dédié à d'autres études, ce dispositif est accessoirement une expérience de physique des neutrinos à échelle réduite qui peut être utilisé pour établir la première preuve de concept expérimentale du *tagging* [Martino, B 202]. Ainsi, l'étudiant(e) participera aux prises de données au CERN et analysera les données collectées.

Objectifs :

- Mise en place d'un simulateur de la ligne de faisceau instrumentée
- Optimisation de la configuration de la ligne de faisceau instrumentée
- Développement des algorithmes d'estimation et de détection
- Preuve de principe de la méthode expérimentale avec NA62 au CERN (prise de données et analyses)

Mots clé :

Détecteur à Neutrinos Sous-Marin, Physique des Neutrinos, Co-conception d'expériences, Science des Données

Contexte de la collaboration entre l'université de Toulon et le CPPM.

L'université de Toulon et le CPPM sont partenaires dans le cadre du contrat de site AMPM (Aix-Marseille Provence Méditerranée). Le projet KM3NeT/ORCA est financé par l'opération NEUMED qui fait partie du CPER (2021-2027) de l'université de Toulon.

Références :

- [1] Abe, K., & others. (2018, May). Hyper-Kamiokande Design Report. Hyper-Kamiokande Design Report.
- [2] Acciarri, R., & others. (2015). Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE).
- [3] Adrian-Martinez, S., & others. (2016). Letter of intent for KM3NeT 2.0. *J. Phys.*, G43, 084001. doi:10.1088/0954-3899/43/8/084001
- [4] Branca, A., Brunetti, G., Longhin, A., Martini, M., Pupilli, F., & Terranova, F. (2021). A New Generation of Neutrino Cross Section Experiments: Challenges and Opportunities. *Symmetry*, 13, 1625. doi:10.3390/sym13091625
- [5] Cortina Gil, E., & others. (2017). The Beam and detector of the NA62 experiment at CERN. *JINST*, 12, P05025. doi:10.1088/1748-0221/12/05/P05025
- [6] Lai, A. (2018). A System Approach towards Future Trackers at High Luminosity Colliders: the TIMESLOT Project. (pp. 1–3). Sydney: IEEE. doi:10.1109/NSSMIC.2018.8824310
- [7] Martino, B. D. (2022, July). Tagged Neutrino Beams. *Tagged Neutrino Beams*. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.6785370
- [8] Perrin-Terrin, M. (2022). Neutrino tagging: a new tool for accelerator based neutrino experiments. *Eur. Phys. J. C*, 82, 465. doi:10.1140/epjc/s10052-022-10397-8
- [9] Roueff, A., Arnaubec, A., Dubois-Fernandez, P. C., & Réfrégier, P. (2011). Cramer–Rao Lower Bound Analysis of Vegetation Height Estimation With Random Volume Over Ground Model and Polarimetric SAR Interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(6), 1115–1119. doi:10.1109/LGRS.2011.2157891
- [10] Roueff, A et al. (2020, May). C18O, 13CO, and 12CO abundances and excitation temperatures in the Orion B molecular cloud: An analysis of the precision achievable when modeling spectral line within the Local Thermodynamic Equilibrium approximation. *A&A* 645, A26 (2021). doi:10.1051/0004-6361/202037776
- [11] Roueff, A., Roux, P., & Réfrégier, P. (2009, April). Wave separation in ambient seismic noise using intrinsic coherence and polarization filtering. *Signal Processing*, 89, 410–421. doi:10.1016/j.sigpro.2008.09.008.

Compétences attendues et personnes à contacter

Compétences/connaissances pré-requises pour le sujet :

- Connaissances en physique des particules,
- Connaissances en traitement statistique,
- Compétences en programmation (C++, Python, Matlab)
- Expression écrite et orale en Français et Anglais.

Contact : antoine.roueff@im2np.fr et mathieu.perrin-terrinn@cppm.in2p3.fr