

Neutrinos

Oscillations, violation de CP, hiérarchie (ordre) des masses

Prospectives scientifiques du DPhP
Ferme du Manet, le 16 octobre 2017

Groupe neutrinos accélérateurs :

- Permanents : Sara Bolognesi, Sandrine Emery-Schrenk (rapporteur), Edoardo Mazzucato, Georges Vasseur, Marco Zito (chef de groupe).
- Doctorants : Philippe Cotte, Mathieu Lamoureux. Soutenance de Francesco Gizzarelli le 27/09/2017
- Nouveaux arrivants : Stephen Dolan (postdoc P2IO), Serguei Suvorov (thèse cotutelle)

Upgrade du détecteur proche de T2K pour la phase II (2021-2026): Paul Colas

L'étude des oscillations de neutrinos : une fenêtre sur la physique au-delà du modèle standard :

- La découverte des oscillations de neutrinos, il y a une vingtaine d'années, a permis de montrer que les neutrinos étaient massifs, et que modèle standard était incomplet. La très faible valeur de ces masses (< 1 eV) révèle une nouvelle échelle de masse par rapport aux valeurs des masses des autres fermions chargés. Cette nouvelle échelle pourrait être reliée à une nouvelle physique à très haute échelle de masse, de l'ordre de M_{GUT} .
- Les valeurs des éléments de la matrice de mélange PMNS, pour le secteur des leptons, sont très différentes de celles de la matrice CKM du secteur des quarks, proche d'une matrice diagonale. La matrice PMNS pourrait refléter une symétrie de saveur encore inconnue.
- L'étude de la violation de CP dans le secteur des leptons nous donne des indices pour mieux comprendre l'asymétrie matière-antimatière observée dans l'univers. Le but principal des expériences en cours et à venir est d'observer et de mesurer cette violation de CP.

Paramètres d'oscillation du modèle standard à 3 neutrinos :

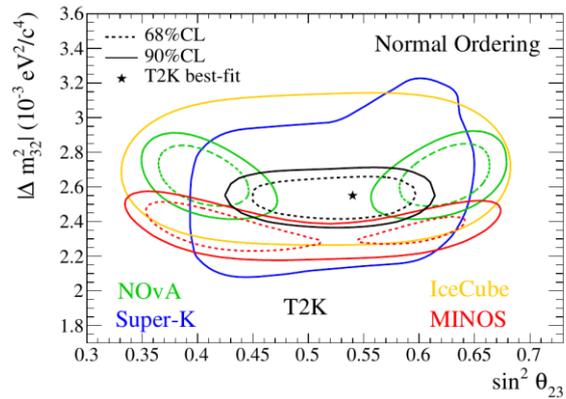
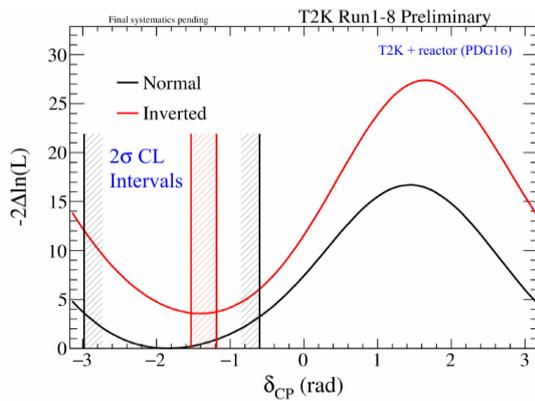
Les paramètres gouvernant les oscillations des neutrinos sont les paramètres de la matrice de PMNS (trois angles de mélange et la phase de violation de CP δ_{CP}) ainsi que deux différences de masses au carré Δm^2 . Le signe de Δm^2_{23} est inconnu (hiérarchie ou ordre des masses). Les précisions des mesures actuelles sur les paramètres connus sont résumées dans la table ci-dessous :

Parameter	Value	Precision (%)	
Δm^2_{21}	$7.37 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$	2.3	Capozzi et al. PRD 95, 096014 (2017)
θ_{12}	34°	5.8	
Δm^2_{32}	$2.52 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$	1.6	
θ_{23}	42°	~ 9	
θ_{13}	8.4°	4	

La valeur relativement élevée de l'angle θ_{13} a permis une exploration plus précoce qu'attendue

de la violation de CP dans le secteur des leptons, par l'expérience de longue ligne de base T2K. Cet angle est mesuré par les expériences auprès de réacteurs (Daya Bay, RENO, Double Chooz où l'IRFU est participe). Double Chooz arrête la prise de données à la fin de cette année, tandis que Daya Bay et RENO pourront améliorer encore la précision de la mesure, mais la contribution des erreurs systématiques devient importante. Daya Bay permettra aussi de bien mesurer le spectre des neutrinos des réacteurs pour aider la future mesure de JUNO de la hiérarchie de masse, basée sur une fine étude de ce spectre.

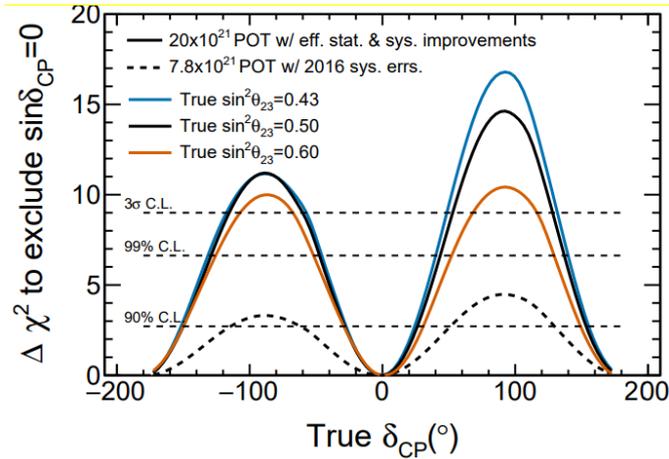
Certains paramètres restent inconnus : valeur de la phase δ_{CP} de violation de CP, hiérarchie de masse, octant de l'angle θ_{23} (inférieur ou supérieur à 45°). Les expériences y accèdent notamment par les mesures dites d'apparition de neutrinos électroniques à partir de neutrinos muoniques (θ_{13} , δ_{CP}) et celles de disparition des neutrinos muoniques (θ_{23} , $|\Delta m_{23}^2|$); ces mesures sont combinées entre les données avec faisceau de neutrinos et d'anti-neutrinos. L'analyse récente des données de T2K présentée durant l'été 2017 permet d'exclure à 2σ la conservation de CP. Pour cette analyse le résultat de la mesure de l'angle θ_{13} par les expériences auprès de réacteurs est important.



Futurs projets :

T2K phase 2

Une seconde phase de l'expérience T2K permettra, avec un faisceau plus puissant, d'accumuler, entre 2021 et 2026, 10 fois plus que la statistique actuelle, dans le but d'exclure la conservation de CP à 3σ , pour 36% (49% si la hiérarchie est connue) des valeurs de la phase δ_{CP} . La figure ci-dessous ([arXiv:1710.00715](https://arxiv.org/abs/1710.00715)) donne la sensibilité attendue pour la seconde phase de T2K (si la hiérarchie de masse est connue), comparée à la sensibilité prévue pour l'ensemble des données de la première phase de T2K.



En effet 2026 représente la date de démarrage prévue de la seconde génération d'expériences de longue ligne de base (DUNE et Hyper-Kamiokande), qui seront encore plus précises. Pour cela, les effets nucléaires intervenant lors de l'interaction des neutrinos avec les noyaux doivent être mieux maîtrisés, car ils représentent une des principales sources d'incertitude systématique. Les prédictions des modèles théoriques souffrent encore de grandes incertitudes. Le groupe du DPhP est responsable dans T2K des analyses de mesures de sections efficaces et des modèles théoriques utilisés dans la simulation. Le groupe participe activement à certaines de ces analyses.

Afin de mieux contraindre ces incertitudes systématiques, une nouvelle version du détecteur proche de T2K est en cours d'étude: une nouvelle cible d'interaction des neutrinos et deux nouvelles TPCs seront construites et installées.

Une collaboration a également démarré entre T2K et l'expérience NOVA aux Etats-Unis afin de combiner les résultats des deux expériences.

Future génération d'expériences sur longue ligne de base

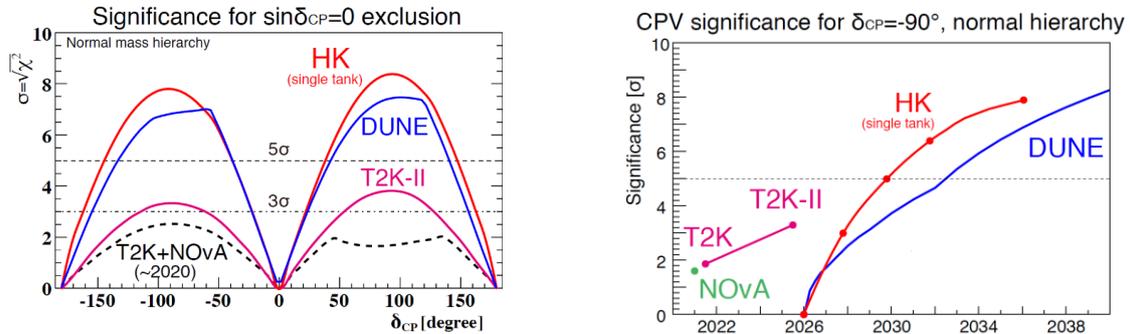
Deux futures expériences de précision de neutrinos produits par des accélérateurs, sur longue ligne de base sont les projets DUNE aux Etats-Unis et HyperKamiokande au Japon. Les prises de données devraient démarrer autour de 2026, avec pour objectifs principaux la détermination des paramètres d'oscillation encore inconnus (δ_{CP} , hiérarchie de masses), la mesure précise d'autres paramètres de la matrice PMNS, ou encore l'astrophysique des neutrinos.

Le projet T2HK (Tokai to HyperK) est le prolongement de T2K: la détection repose sur le même principe (rayonnement Cherenkov dans l'eau) avec un volume fiduciel pour HyperK 10 fois plus important; la ligne de base de l'ordre de 300 km est similaire à celle de T2K. Les données de HyperK avec faisceau sont peu sensibles à la hiérarchie de masse, mais HyperK permettra de la contraindre à 3σ par l'étude des neutrinos atmosphériques. Comme pour T2K le détecteur est placé légèrement hors axe du faisceau de neutrinos, ce qui permet d'obtenir un spectre en énergie piqué et avec une dominante d'interactions quasi-élastique des neutrinos. Il est possible qu'un second détecteur soit installé en Corée, avec une ligne de base beaucoup plus grande. Le projet HyperK n'est pas encore approuvé mais a été classé à l'été 2017, au Japon, dans la liste MEXT des 7 grands projets scientifiques prioritaires.

Le projet DUNE aux Etats-Unis utilise un faisceau intense produit à Fermilab, sur une ligne de base de 1300 km. Avec des effets de matière plus importants, l'expérience est sensible à la hiérarchie de masses. La gamme d'énergie du faisceau est large pour couvrir le premier et le second pic d'oscillation, et mesurer la phase de violation de CP et la hiérarchie de masses. D'autres interactions de neutrinos que celles du type quasi-élastiques sont nombreuses, et plus complexes à reconstruire. Une technologie de détection de type TPC à Argon Liquide est

donc mieux adaptée.

Le but de ces expériences complémentaires est de déterminer la hiérarchie des masses ainsi que la phase de violation de CP à au moins 5 sigmas, pour une fraction importante (~ 60%) des valeurs de δ_{CP} , incluant la valeur favorisée ($\sim -\pi/2$) actuellement par T2K.



Grâce à sa grande ligne de base une ligne de base, DUNE est plus sensible que HyperK à la hiérarchie des masses. Par contre, à hiérarchie de masses connue, T2HK est plus sensible que DUNE à la phase δ_{CP} : en effet la masse de HyperK en eau est plus importante que celle des détecteurs à Argon liquide de DUNE.

WA105

La technologie des TPC à Argon liquide avec simple phase est déjà utilisée par de précédentes expériences (ICARUS, MiniBooNE,...).

Une nouvelle technologie en cours de développement et d'étude pour les détecteurs de l'expérience DUNE est celle des TPCs à Argon liquide double phase (liquide/gazeuse). Elle utilise notamment la technologie LEM (Large Electron Multiplier) pour la détection de l'ionisation produite dans l'argon liquide avec multiplication des électrons dans l'argon en phase gazeuse. Cette approche permet d'obtenir un meilleur rapport signal sur bruit.

WA105 a pour objectif de démontrer la faisabilité de la technologie TPC à argon liquide en mode diphasique (DLAr), applicable à des détecteurs de neutrinos de très grande masse, de l'ordre de 10kt. Depuis 2015, le projet WA105 fait partie intégrante du programme expérimental DUNE.

La collaboration WA105 réalise un démonstrateur d'une masse utile de 300t d'argon liquide correspondant à un volume de $6 \times 6 \times 6 \text{m}^3$, qui sera testé en faisceau au CERN. Une phase intermédiaire du projet a consisté en un prototype de TPC DLAr d'un volume utile de $3 \times 1 \times 1 \text{m}^3$. Dès l'été 2017, ce prototype a observé les premières traces cosmiques, validant ainsi le principe d'une TPC DLAr pour de grandes surfaces de détection.

Autres expériences et mesures

En plus des expériences basées sur les accélérateurs, de futures expériences de neutrinos, dont le démarrage est prévu autour de 2020, permettront également de déterminer l'ordre (hiérarchie) des masses et de mesurer d'autres paramètres d'oscillations. Soit auprès de réacteurs comme JUNO par une étude fine du spectre en énergie des neutrinos, ou en utilisant les neutrinos atmosphériques les expériences Km3net/ORCA et Icecube/Pingu, c'est-à-dire les effets de matière dans la planète terre. JUNO permettra également de mesurer précisément les paramètres d'oscillation du secteur dit « solaire » (θ_{12} et Δm_{21}^2).

Le but ultime de toutes les expériences serait de surcontraindre dans le secteur des leptons l'équivalent du triangle d'unitarité pour le secteur des quarks, et de tester le paradigme de PMNS.

Les futurs grands détecteurs des expériences de longue ligne de base (DUNE, HyperK) ouvrent également de nouveaux horizons d'études de physique comme l'astrophysique des neutrinos (supernovae, etc.), ou la recherche de désintégration du proton et de matière noire.

Participation du groupe « neutrinos accélérateurs » du DPhP :

Expérience T2K

Le groupe a joué un rôle clef dans l'expérience T2K dès le début, comme acteur crucial de la conception et de la construction des TPCs du détecteur proche ND280, en collaboration avec le DEDIP. Nous restons aujourd'hui responsables du bon fonctionnement des TPCs.

Le groupe du DPhP est également responsable des mesures de sections efficaces d'interaction dans le détecteur proche et de l'estimation de l'incertitude systématique associée pour les mesures d'oscillation. Le groupe T2K se place sur une nouvelle ligne de front, puisque responsable de la conception de la nouvelle version du détecteur proche ND280 pour la seconde phase de l'expérience T2K (2021-2026). Le groupe du DPhP contribue au développement des nouvelles TPCs, sur leur lecture par des micromegas résistifs (ILC-TPC R&D) et l'électronique associée. Le groupe est également actif dans les simulations et analyses de physique pour cette nouvelle version du détecteur ND280.

WA105

Depuis 2014, l'IRFU participe au projet. En 2015 et 2016, l'Irfu a participé à la conception finale des détecteurs LEM ainsi qu'à l'étude de leur tenue sous haute tension. Le laboratoire est responsable de la fourniture et la caractérisation de la moitié des 144 modules de détection qui instrumenteront le démonstrateur. Les équipes de l'Irfu ont notamment conçu une enceinte haute pression permettant de tester les LEM dans des conditions de densité d'argon gazeux identiques à celles qui seront rencontrées dans une TPC DLA_r. La production de la totalité des modules de détection (LEM et anodes) de WA105 a démarré à l'été 2017. Elle sera suivie par la phase d'intégration des détecteurs en 2017-2018 au CERN.

Activités futures du groupe « neutrinos accélérateurs » du DPhP :

En plus du prolongement dans les années à venir des activités dans lesquelles le groupe s'est engagé, une participation aux expériences sur longue ligne de base de future génération est envisagée.

Une participation du groupe au projet HyperK constituerait le prolongement de son expérience sur l'expérience T2K. Mais le groupe participe aussi à l'expérience DUNE par le projet WA105.

Le groupe devrait décider en 2018 ou 2019 dans laquelle des deux futures expériences de longue ligne de base (HyperK ou DUNE) il va s'impliquer pour optimiser son impact sur cette physique et l'importance de son rôle dans la collaboration.