

1 Des particules aux noyaux

Mieux cerner la structure fondamentale des constituants les plus petits de l'univers est l'un des axes principaux de recherche du LPSC, des particules élémentaires aux noyaux atomiques.

Le LPSC est ainsi impliqué dans les expériences ATLAS et ALICE, deux des quatre principales expériences installées auprès du LHC, le grand collisionneur de protons et d'ions du CERN. La découverte du boson de Higgs en 2012 par CMS et ATLAS a posé la dernière brique dans l'élaboration du Modèle Standard, modèle qui décrit les particules élémentaires et leurs interactions. Bien que validé jusqu'à présent, certains paramètres importants liés au boson de Higgs restent à mesurer. De plus, ce modèle ne peut être considéré comme la théorie ultime des interactions fondamentales car d'une part il n'inclut pas la gravitation et d'autre part il est incapable d'apporter des réponses à de nombreuses questions qui restent ainsi ouvertes. Durant sa deuxième période de prise de données, le Run II, le LHC a permis d'explorer cet « Au-delà du modèle standard » en recherchant la signature de nouvelles particules qui pourraient être produites dans les collisions proton-proton. Ces recherches continueront avec le future Run III, puis plus tard avec le programme de haute luminosité qui permettra la mesure des paramètres manquants.

L'équipe ATLAS du LPSC a ainsi contribué à plusieurs recherches de nouvelle physique, notamment celles dont les états finals comportent des quarks top ou des photons, bénéficiant de l'expertise du groupe sur les aspects expérimentaux liés à la calorimétrie. Le groupe théorique du LPSC est également impliqué dans ces recherches par la construction d'extensions du Modèle Standard et la prédiction précise de leur signature attendue au LHC, ainsi que par la production d'outils permettant la réinterprétation des résultats du LHC en termes de modèles de nouvelle physique. Par ailleurs, il est impératif de planifier le futur de la recherche dans ce domaine : le LPSC est donc impliqué dans des activités couvrant les développements nécessaires à court, moyen et long terme. Ainsi, l'équipe ATLAS s'est engagée d'une part dans la conception et la construction du nouveau trajectomètre qui remplacera celui existant pour la phase à haute luminosité du LHC. Et d'autre part, elle participe au développement des recherches impliquant des paires de boson de Higgs qui permettront à terme de mesurer les paramètres du potentiel de Higgs.

En parallèle, l'équipe des futurs collisionneurs contribue au développement de détecteur de prochaine génération : elle se concentre sur la conception, au niveau mécanique, de calorimètres électromagnétiques destinés à être utilisés auprès du futur International Linear Collider, un collisionneur linéaire électron-positron actuellement en projet.

L'expérience ALICE explore quant à elle un nouvel état de la matière nucléaire, le plasma de quarks et de gluons, où ces derniers ne sont plus confinés au sein des nucléons. Cet état est produit dans les collisions d'ions de plomb ultra-relativistes au LHC. Fortement impliquée dans la construction de calorimètres électromagnétiques et dans le développement du système de déclenchement associé, l'équipe du LPSC bénéficie de son expertise pour exploiter ces systèmes dans les analyses. Le groupe participe ainsi à l'analyse des corrélations photon-hadron et des jets inclusifs, qui permettent d'étudier à la fois les processus d'hadronisation des partons et leur interaction avec le plasma de quarks et de gluons. Le LPSC participe aussi à l'amélioration du système de détection pour le run 3 du LHC. Le groupe théorique du LPSC est également impliqué dans l'étude de la structure des nucléons et des noyaux en termes de quarks et de gluons, notamment à haute énergie où cette connaissance est primordiale pour décrire les collisions au LHC et prédire les observables dans ATLAS ou ALICE. C'est également une voie intéressante en soi pour l'étude d'une partie du Modèle Standard, la chromodynamique quantique, qui régit non seulement les interactions entre les quarks et gluons à l'intérieur des nucléons, mais également entre les nucléons eux-mêmes.

La recherche de nouvelle physique ne se limite pas aux collisionneurs : si la grande énergie des collisions du LHC fournit une voie d'exploration, les mesures de précision permettent également de rechercher des déviations qui pourraient indiquer de la nouvelle physique. Le groupe de neutrons ultra froids (UCN) du LPSC exploite cette possibilité dans diverses expériences. D'une part, la mesure du moment dipolaire électrique du neutron afin de sonder les différences entre matière et antimatière : analyses avancées de l'expérience nEDM, construction d'un nouveau spectromètre n2EDM et mesures de magnétométrie du ^{199}Hg . D'autre part, l'expérience GRANIT permet,

entre autres, d'étudier la gravité newtonienne dans le contexte de la mécanique quantique et de tester d'hypothétiques interactions à courte portée au-delà du Modèle Standard.

Enfin, les interactions entre les nucléons, formant la structure des noyaux, sont étudiées par un groupe dédié de structure nucléaire au LPSC. Le groupe se spécialise dans la structure de noyaux exotiques très riches en neutrons, notamment à l'aide de spectroscopie gamma ou d'électrons de conversion. Pour ces noyaux situés dans des régions très éloignées de la stabilité, le groupe a développé et testé différents modèles théoriques afin de mieux en comprendre la structure, avant de cesser ses activités instrumentales en 2018, suite au départ d'un agent du CNRS et à une réorientation des membres de l'équipe vers des activités plus applicatives, au sein de l'équipe physique des réacteurs et physique des applications médicales.

1.1 Équipe ATLAS

Équipe de recherche : membres permanents

J. Collot, S. Crépe-Renaudin, P.-A. Delsart, M.-H. Genest, J.Y. Hostachy, M. Kuna, F. Ledroit-Guillon, A. Lleres, A. Lucotte, F. Malek, E. Petit, J. Stark, B. Trocmé

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

S. Berlendis, C. Camincher, J. Gradin, R. Hulsken, T. Meideck, N. Readioff (CDD), X. Yang

Personnels des services techniques

P. Boge, D. Bondoux, D. Fombaron, D. Grondin, N. Emeriaud, C. Le Tulle, D. Morotti, S. Roni, S. Roudier, L. Vivargent (*Service Études et Réalisations Mécaniques*)

C. Biscarat, C. Gondrand, J. Fulachier, F. Lambert, J. Odier (*Service Informatique*)

J.L. Bouly, J. Bouvier, D. Dzahini, L. Eraud, L. Gallin-Martel, N. Ponchant, F. Rarbi, J.P. Scordilis, M. Zeloufi (*Service Électronique*)

J.-F. Muraz, A. Richard (*Service Détecteurs et Instrumentation*)

ATLAS is one of the four main experiments at the Large Hadron Collider (LHC) located at CERN. Its physics purpose is the study of the elementary constituents of matter, and their interactions. The first data taking between 2009 and 2012 allowed to discover the Higgs Boson in 2012. After this tremendous achievement, the data taking resumed in 2015 at an unprecedented centre-of-mass energy of 13 TeV. The LPSC group analyses these data in three main directions: top quark physics, study of the Higgs sector and direct searches for new particles beyond the Standard Model. In parallel, the group is also committed to the upgrades of the detector in view of future data taking conditions with higher luminosities.

1.1.1 Introduction

L'expérience ATLAS est l'une des quatre principales expériences de physique des particules auprès du grand collisionneur de protons et d'ions du CERN : le LHC. Situé à la frontière franco-suisse, le LHC a été conçu pour produire des collisions entre protons à une énergie dans le centre de masse jamais atteinte de 14 TeV. La première prise de données s'est déroulée à une énergie de 7-8 TeV et s'est étendue de 2009 à 2012, aboutissant à la découverte du boson de Higgs. Après cette découverte majeure, la deuxième période de prise de données entre 2015 et 2018 ("Run 2") à une énergie de collision de 13 TeV a permis de mesurer avec une très grande précision les caractéristiques de ce boson. Conjointement à cela, les mesures d'autres caractéristiques du « Modèle Standard » de la physique des particules ont égalé ou amélioré la précision obtenue avec les collisionneurs précédents. Dans le même temps, de très nombreuses recherches de nouvelle physique ont été menées. L'absence de preuve probante à ce jour a permis d'invalider de nombreuses extensions du Modèle Standard, mettant ainsi au défi la communauté des théoriciens pour résoudre les limitations connues du Modèle Standard (origine de la matière sombre, asymétrie matière-antimatière, justification de la faible masse du boson de Higgs...)

Cette capacité à réaliser des mesures de grande précision couplée avec le potentiel incomparable de découverte de nouvelle physique fait du LHC l'instrument incontournable de la recherche en physique des particules pour les vingt ans à venir : ainsi, à partir de 2021, la prise de données reprendra à l'énergie nominale de 14 TeV ; puis à partir de 2026, de nouvelles évolutions du collisionneur devraient permettre de décupler le nombre de collisions (projet "HL-LHC" pour High Luminosity LHC).

Le LPSC appartient depuis 1991 à la collaboration ATLAS, aujourd'hui forte de plusieurs milliers de physiciens venant d'une quarantaine de pays. Le groupe s'est historiquement consacré à la calorimétrie à argon liquide, contribuant depuis la conception et la construction du détecteur jusqu'à la certification de la qualité des données. Cette contribution s'est achevée en 2018, alors que le groupe s'implique de manière croissante depuis 2014 dans la trajectométrie à pixels de silicium. Cette activité prend notamment la forme d'un engagement conséquent dans la conception et la construction du futur détecteur de pixels qui sera installé en 2024.

Les activités du groupe du LPSC se poursuivent également dans le développement d'applications dédiées à la gestion des logiciels et des données d'ATLAS, et dans la gestion de la grille de calcul tant au niveau local (Tier-2) qu'au niveau national (LCG-France) ou au sein de l'expérience ATLAS. Le groupe est également fortement impliqué dans le logiciel de reconstruction des objets (jets hadroniques et photons).

Enfin, le groupe du LPSC s'investit dans les analyses de physique proprement dites. Trois axes de recherche sont ainsi menés :

- La physique du quark top au sens large, autour d'un programme alliant des mesures de précision (production célibataire de quark top) et des recherches de nouvelle physique dans des états finals comprenant des quarks top.
- L'étude du secteur de Higgs avec la mise en évidence de la production associée avec des quarks top et des études prospectives de production de paires de bosons de Higgs.
- La recherche directe de nouvelle physique (graviton de Kaluza Klein, supersymétrie...) avec des photons dans l'état final.
- Au-delà des différentes analyses détaillées plus loin, il convient de souligner qu'un membre du groupe a pris en charge la coordination au niveau de la collaboration ATLAS pour les recherches directes de nouvelle physique - hors supersymétrie. Cela représente la coordination d'environ 60 analyses réalisées par 550 personnes.

1.1.2 Activités instrumentales

Calorimétrie à argon liquide

Après une contribution significative dans la construction du calorimètre à argon liquide, le groupe s'est impliqué depuis 2009 dans la validation de la qualité des données calorimétriques, avec notamment la responsabilité de sa coordination. Cette implication s'est achevée en 2018 avec la meilleure efficacité de validation jamais atteinte : ainsi 99.74% des données enregistrées par ATLAS ont été considérées comme de qualité optimale pour être analysées (voir Figure 1).

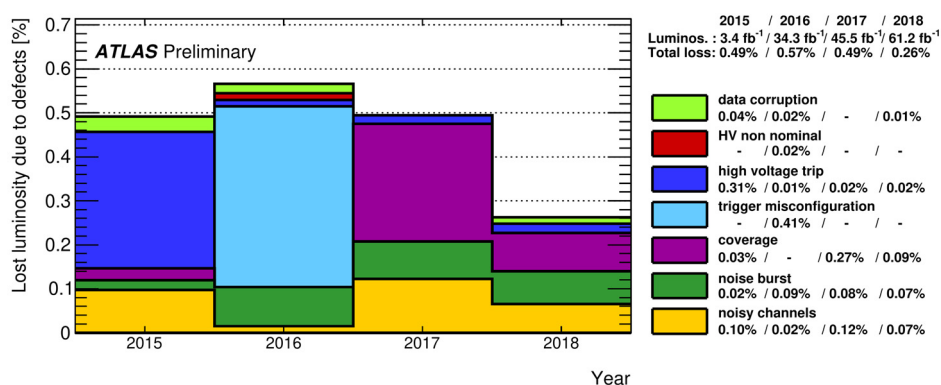


Fig. 1 : sources de rejet des données de la calorimétrie à argon liquide au cours du Run2

Trajectomètre interne

L'équipe ATLAS du LPSC est engagée dans le projet ITk (Inner Tracker) depuis 2015. Il s'agit de remplacer entièrement le trajectographe actuel, qui ne pourra pas soutenir l'accroissement des doses de rayonnement, par un nouveau détecteur entièrement constitué de capteurs en silicium. Celui-ci devra être installé et testé à temps pour le démarrage du HL-LHC, prévu en 2026.

En 2015 s'est mis en place l'engagement du groupe dans la partie la plus interne de l'ITk, c'est à dire dans le détecteur à pixels, dans les études de faisabilité et de performance d'une géométrie avec capteurs inclinés. Ce concept a finalement été retenu par la collaboration ATLAS en vertu de l'amélioration de la performance de reconstruction des traces qu'il permet. L'équipe du LPSC, en collaboration avec le LAPP via le Labex Enigmass,

a été un acteur majeur du développement de la simulation du détecteur à pixels dans le logiciel Geant4. Cette simulation détaillée a été utilisée pour déterminer les performances de reconstruction des traces qui figurent dans le *Technical Design Report* du sous-détecteur. Une activité de simulation, conduite au laboratoire, a permis de valider le choix des matériaux utilisés pour la construction du détecteur dans la simulation des interactions particules-matière. L'option de la géométrie inclinée des supports des senseurs a également été validée par les résultats obtenus en tests thermiques avec les prototypes fabriqués au LPSC et testés au LAPP.

Après le choix de la géométrie, la priorité de la communauté s'est portée sur le développement d'un démonstrateur destiné à tester la procédure et la mise en œuvre des solutions techniques permettant de construire la structure du détecteur. Dans ce cadre, en collaboration avec le CPPM et le LAPP, l'équipe du LPSC se concentre sur la partie intégration des cellules, ou « loading ». Avant d'être vissée sur le support, une cellule de senseurs devra être construite en collant la partie appelée module sur un support permettant d'assurer la connexion thermique avec les tubes de refroidissement. Chaque cellule carrée d'environ 5 cm de côté sera composée de 4 modules. Le choix de la colle est capital puisqu'elle doit à la fois être un excellent conducteur thermique et résister aux radiations. Le LPSC étudie la méthode d'application, qui doit permettre un dépôt uniforme de 75 μm d'épaisseur de colle sur toute la surface concernée.

Ces opérations devront être reproduites plusieurs milliers de fois et aboutir à un placement des détecteurs extrêmement précis. La procédure doit donc être conçue et testée à l'aide d'une machine de mesures tridimensionnelles d'une précision de quelques microns. Le groupe s'est doté d'une telle machine, qui a été installée en 2018 dans une salle blanche construite pour l'accueillir, et qui permettra de manipuler les composants électroniques. L'ambition est de qualifier le laboratoire comme site officiel de chargement et montage des détecteurs à pixels ITk en 2020, pour une période de construction et d'assemblage se déroulant de 2021 à 2024.

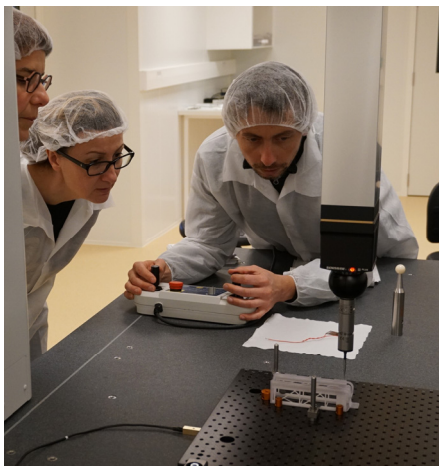


Fig. 2 : formation de membres du groupe au maniement de la machine de métrologie.

En parallèle, le service mécanique du LPSC a pris la responsabilité de la conception et de la fabrication des brides qui permettront d'assembler les supports du détecteur en trois couches cylindriques concentriques. Ces brides doivent assurer la stabilité mécanique de l'ensemble, tout en introduisant le moins de matériel possible et permettre l'acheminement des services (câblage, etc..). La conception de ces brides nécessite également une attention particulière pour ne pas compromettre la stratégie de blindage électrique et de mise à la terre de la structure porteuse du détecteur interne. Le dessin des brides est validé par des calculs en éléments finis qui permettent de vérifier les déformations (thermiques, mécaniques) et de rechercher les modes de résonance. Il doit également être optimisé en vue de l'intégration. Les possibilités de fabrication et de construction sont testées à l'aide de prototypes. Les matériaux composites envisagés sont mis en forme au moyen de moules, qui nécessitent des développements spécifiques.

1.1.3 Traitement des données

AMI, un environnement logiciel pour les méta-données

Depuis plusieurs années une équipe de trois ingénieurs du service informatique du LPSC développe un environnement logiciel de base de données sur lequel se basent des applications essentielles pour l'ensemble de la collaboration ATLAS.

ATLAS Metadata Interface (AMI) désigne ces applications ainsi que cet environnement dédié à la gestion des méta-données de la totalité des volumes de données. Il inclut les interactions avec les systèmes de bases de données (Oracle, Postgresql, etc.) jusqu'aux interfaces internet pour les utilisateurs ou l'automatisation de la collecte des méta-données. AMI est utilisé par la collaboration pour collecter et maintenir accessible l'ensemble des méta-données des événements réels et simulés enregistrés par l'expérience ATLAS, mais aussi pour gérer les paramètres de configuration de l'ensemble des systèmes logiciels de la collaboration.

Outre la maintenance des logiciels et de l'intégrité des données, l'équipe a effectué d'importants travaux de développements. Ceux-ci concernent la nécessaire rénovation du cœur logiciel afin d'obtenir un système plus robuste, flexible et facile à maintenir, un nouveau système d'application web pour interagir avec le cœur et le développement d'un service de « dataset whiteboard » permettant à n'importe quel utilisateur d'annoter n'importe quel dataset.

Traitement distribué des données

Avec plus de 400-Po de données enregistrées sur disque ou sur bande et une capacité de calcul permettant de traiter entre 300 000 tâches en continu et en parallèle, la grille de calcul a permis de stocker, reconstruire et analyser les données du Run 2 du LHC.

Le LPSC participe à cet effort d'une part en mettant à disposition son site de grille WLCG de niveau Tier 2 (voir la partie "Plateformes technologiques"). Partagé principalement avec l'expérience ALICE, cet équipement est sous la responsabilité du groupe ATLAS.

D'autre part, le groupe est investi dans la gestion et la coordination des activités de traitement distribué des données tant au niveau français qu'au niveau de la collaboration ATLAS. Il s'est particulièrement impliqué dans le suivi quotidien des activités de traitement des données de l'expérience en lien avec les différentes équipes d'experts (« Computing Run Coordination »).

1.1.4 Activités de reconstruction des objets

Reconstruction des jets hadroniques

Les jets hadroniques sont abondamment produits dans les collisions de protons. Ils sont souvent présents dans l'état final d'un processus étudié et quand ils ne le sont pas, contribuent souvent de façon importante aux bruits de fond. Leur reconstruction et identification expérimentale sont donc primordiales et le groupe du LPSC est fortement impliqué sur ces sujets.

L'équipe maintient une activité dans le support et la maintenance des logiciels de reconstruction et d'analyse liés aux jets hadroniques. Elle contribue à l'important sujet des jets dans les régimes de hautes impulsions, avec notamment la codirection du sous-groupe dédié à l'étude de ces jets particuliers (reconstruits différemment des jets usuels) : étalonnage dans la simulation et les données, identification des particules massives (W, Z, quark top) se désintégrant hadroniquement. Finalement une activité portant sur une étape de l'étalonnage de l'énergie et de la masse des jets est aussi en cours. L'équipe contribue à l'écriture des logiciels dédiés à ces tâches et développe des solutions au problème numérique non-trivial lié à la correction de la réponse en énergie et masse. Le résultat de ces travaux a été adopté par la collaboration comme la méthode d'étalonnage officielle.

Reconstruction et identification des photons

Le bruit des canaux électroniques dans le calorimètre peut s'apparenter à un signal dû à des photons, qu'il convient d'éliminer dans les analyses. Le LPSC est responsable d'une procédure de nettoyage de ces faux photons.

Les photons sont identifiés et distingués des jets hadroniques à partir des formes de gerbes électromagnétiques reconstruites grâce à la fine segmentation du calorimètre. L'efficacité d'identification des photons est mesurée avec trois méthodes différentes sur les données : à basse et moyenne énergie pour les mesures de précision, à haute énergie pour la recherche de nouvelle physique. Le LPSC est responsable de la combinaison de ces méthodes, dont les résultats sont illustrés sur la Figure 3, qui montre l'accord entre données mesurées et les simulations.

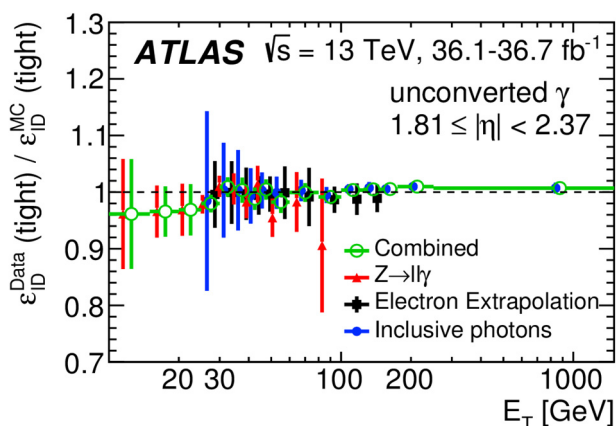


Fig. 3 : rapport entre les efficacités d'identification des photons mesurées et prédites par la simulation, en fonction de l'énergie transverse.

1.1.5 Physique avec le quark top

Recherche de production résonante de nouvelles particules se désintégrant en paires de top

Le quark top est la particule du modèle standard la plus massive. Avec une masse de l'ordre de l'échelle de la brisure de la symétrie électro-faible et son fort impact sur les corrections à la masse du boson de Higgs, le quark top a une place particulière dans de nombreux modèles de physique au-delà du Modèle Standard. Il est donc une sonde privilégiée dans la recherche de nouveaux phénomènes.

L'équipe a participé à la recherche d'une particule se désintégrant de façon résonante en une paire de quarks top. Aucune différence statistiquement significative n'a été mise en évidence dans les lots de données de 2015 et 2016 par rapport aux prédictions du Modèle Standard. Ces résultats ont ainsi été interprétés en terme de limite sur la masse de particules issues de différents types de modèles au-delà du Modèle Standard : technicouleur assistée par top-couleur, boson Z' , excitation de Kaluza-Klein de gluon ou de graviton.

Par ailleurs le groupe a réinterprété ces résultats dans le cadre de la recherche de matière noire. Si la matière noire, qui constitue 85% de la matière de l'univers, est formée de particules pouvant être produites au LHC, alors il est attendu que sa production mette en jeu une nouvelle particule qui se couple aux quarks ou aux gluons. Les contraintes obtenues sont complémentaires de celles des recherches de matière noire, via la recherche d'événements caractérisés par la présence significative d'énergie manquante (voir section 1.1.5.2), ainsi que des recherches directes de détection de matière (hors collisionneurs).

Recherche de production de paires de quarks top de même charge

Dans les collisionneurs hadroniques, les quarks top sont principalement produits, via l'interaction forte, sous forme de paires ayant des charges de signes opposés. Dans le cadre du Modèle Standard, la production de paires de quarks top de même charge est négligeable. Cependant, de nombreux modèles théoriques au-delà du Modèle Standard en prévoient une production non négligeable aux énergies fournies par le LHC. En particulier, cette production non-standard est possible dans le cadre de la supersymétrie. La recherche d'une telle production a

fait l'objet d'une thèse de doctorat menée en collaboration avec l'équipe de physique théorique. Dans le cadre de cette thèse, un générateur Monte Carlo basé sur le modèle de supersymétrie avec R-parité violée a été développé et validé pour une production officielle d'échantillons d'événements Monte Carlo. Des études ont également été effectuées afin de caractériser dans les données expérimentales les contributions venant des différentes sources de bruit de fond. Les résultats obtenus ont été publiés dans deux articles ; ils présentent les limites extraites sur les contributions pouvant venir du type de nouvelle physique étudiée et sur les paramètres des modèles associés.

Étude de la production de quark top célibataire

Dans les collisionneurs hadroniques, les quarks top célibataires sont produits par interaction électrofaible, cette production impliquant un vertex Wtb . Le principal mode de production est la voie t impliquant l'échange d'un boson W virtuel, le quark top célibataire produit décroissant ensuite par interaction électrofaible en un boson W et un quark b . Le boson W peut décroître par la suite soit leptoniquement en un lepton chargé et un neutrino, soit hadroniquement en deux quarks légers. Les quarks top ainsi produits sont très fortement polarisés; des mesures de précision sur les différentes observables de polarisation permettent de contraindre fortement de potentiels couplages Wtb anormaux. L'activité du groupe du LPSC a, ces trois dernières années, porté sur les mesures de ces observables de polarisation dans le canal de décroissance leptonique. Un travail important a été mené afin de développer et valider les méthodes d'analyse, à savoir les procédures de convolution des différentes distributions angulaires à partir desquelles les observables de polarisation sont mesurées. L'analyse menée sur les données collectées en 2012 montre un bon accord avec les prédictions du Modèle Standard de l'ensemble des observables de polarisation étudiées, comme résumé sur la Figure 4.

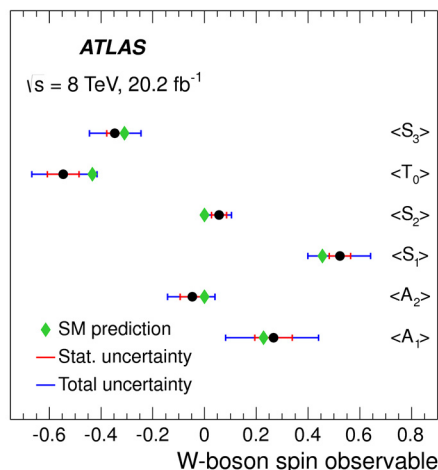


Fig. 4 : observables de polarisation mesurées dans la production électrofaible de quarks top et comparaison avec les prédictions du Modèle Standard.

Recherche de boson de Higgs chargé se désintégrant en un quark top

De nombreuses extensions du Modèle Standard prévoient l'existence de nouveaux bosons de Higgs de grande masse. Depuis 2012, le groupe participe à la recherche d'un boson de Higgs chargé. La montée en énergie à 13 TeV du LHC a permis de pousser cette recherche dans la région de masse au-delà de 180 GeV. Le canal de décroissance exploité a été $H^+ \rightarrow tb$, qui est prépondérant dans cette région. L'analyse a été conduite en deux modes, lepton + jet et dilepton, selon qu'un ou deux électrons/muons étaient exigés dans la signature. L'équipe a mis l'accent sur le canal dilepton. L'analyse la plus aboutie a été publiée en 2018. Elle exploite les 36.1 fb⁻¹ enregistrés en 2015 et 2016 à 13 TeV. Elle exclut, avec un niveau de confiance de 95%, toute existence d'un boson de Higgs chargé dont le produit section efficace par rapport de branchement serait supérieur à 2,9 (0,07) pb pour une masse du boson H^+ de 200 (2000) GeV.

1.1.6 Étude du secteur de Higgs

Mesure du couplage de Yukawa du boson de Higgs au quark top

La mesure directe du couplage de Yukawa entre le boson de Higgs et le quark top est possible via la production du boson de Higgs en association avec une paire de quarks top, notée ttH. Selon le mode de désintégration du boson de Higgs, il existe trois états finals dans lesquels le processus ttH peut être recherché : deux photons ($H \rightarrow \gamma\gamma$), deux quarks beaux ($H \rightarrow bb$) et enfin un état final dit multileptons via la désintégration du boson de Higgs en paire de Z ou W ou leptons tau ($H \rightarrow WW, ZZ, \tau\tau$), ces particules se désintégrant à leur tour en leptons. Le canal multileptons, sur lequel le groupe du LPSC est impliqué, est le canal dominant qui a permis de mettre en évidence dès l'été 2017 ce processus avec une signification de 4.2σ .

En juin 2018, la collaboration ATLAS a rendu publique une analyse dans laquelle les états finals de plus petit rapport d'embranchement, ttH, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ leptons et ttH, $H \rightarrow \gamma\gamma$, ont été mis à jour. Grâce à une statistique accrue et à la combinaison de ces analyses améliorées avec les autres états finals, ATLAS a annoncé l'observation à 6.3σ de la production du boson de Higgs en association avec une paire de quarks top. L'intensité du signal mesuré pour tous les canaux multileptons est représenté sur la figure 5 pour différents canaux avec un résultat combiné en accord avec la prédiction du Modèle Standard.

L'avenir de l'étude du processus ttH passe désormais par la prise en compte de l'intégralité de la statistique du Run 2 ainsi que par l'étude des distributions différentielles. L'équipe s'est particulièrement investie dans l'optimisation de la stratégie d'analyse, la compréhension des bruits de fond irréductibles ttW et ttZ, la réduction et l'estimation "data-driven" des leptons non-prompts et l'interprétation statistique des résultats. Dans ce cadre, un membre de l'équipe a également endossé la responsabilité globale de l'analyse $2\ell SS + \tau had$ avec deux électrons ou muons de même signe et un lepton tau décroissant hadroniquement.

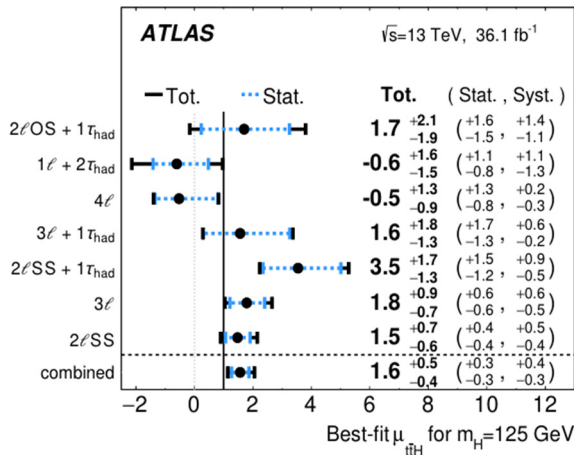


Fig. 5 : intensité du signal mesurée dans tous les canaux multileptons.

Étude prospective de la production de paires de Higgs

Dans le Modèle Standard, le potentiel de Higgs est postulé de façon ad hoc. Aucune explication plausible de son origine n'est donnée. La mesure de l'auto-couplage du boson de Higgs, c'est à dire la constante de couplage λ associée à un vertex de trois bosons de Higgs, permet de reconstruire expérimentalement le potentiel de Higgs et ainsi de vérifier le mécanisme de Higgs.

La façon la plus directe de mesurer λ consiste à étudier la production de paires de bosons de Higgs (HH). Dans le cadre du Modèle Standard, le taux de production de HH est 500 fois plus faible que celui des bosons de Higgs simples et une mesure précise nécessite les données du HL-LHC. Suite au travail de prospectives du LPSC en 2015, l'équipe ATLAS du LPSC a décidé de concentrer - après les analyses des données du Run 2 en cours - ses efforts d'analyse sur ce sujet.

Le travail de l'équipe sur la mesure de λ a commencé fin 2017 avec la conclusion de deux des analyses des données du Run 2. L'équipe a élaboré une étude qui quantifie la précision attendue dans le canal $H(\rightarrow bb)H(\rightarrow \gamma\gamma)$ avec les données du HL-LHC. Cette étude a été publiée dans le CERN Yellow Report sur la physique au HL-LHC. Ces résultats sont mis en avant dans le résumé de dix pages du Yellow Report que le CERN a soumis comme contribution à la mise à jour de la European Strategy for Particle Physics (ESPP) appelée à paraître en 2020. Ces nouveaux résultats constituent une contribution majeure à cette étude stratégique en cours sur le futur de la discipline : alors que les études précédentes ne permettaient pas d'affirmer que le HL-LHC observera la production de HH, les nouveaux résultats démontrent que la découverte de HH est possible et que la mesure de λ avec une précision de 50 % ou mieux est atteignable.

Si les méthodes pour la sélection et l'isolation du signal HH du bruit de fond sont performantes, les méthodes d'extraction de λ restent encore simples. De grandes améliorations de la précision sont attendues avec l'utilisation future de la *méthode de la matrice*. Elle fait un usage optimal de la cinématique des événements pour l'extraction du signal. Un premier travail a permis une première implémentation de cette méthode pour $H(\rightarrow bb)H(\rightarrow \gamma\gamma)$.

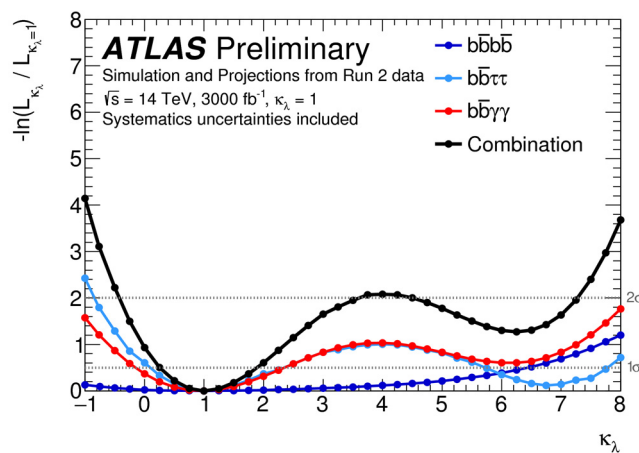


Fig. 6 : précision expérimentale attendue (expérience ATLAS seule ; l'expérience CMS prévoit une précision comparable) sur le paramètre κ_λ qui représente la constante de couplage κ_λ mesurée divisée par la valeur de κ_λ prédite dans le cadre du MS.

1.1.7 Recherche de nouvelle physique avec des photons

Recherche de matière noire dans un état final avec un seul photon

Une piste envisagée pour expliquer la nature de la matière noire est de postuler l'existence d'une nouvelle particule massive interagissant faiblement (WIMP). Un mode de recherche de ces particules au LHC est la présence d'un photon énergétique issu de la radiation initiale et d'une grande impulsion transverse manquante due aux WIMPs. Le LPSC a participé à l'édition de la publication sur les données à 13 TeV de 2015 et 2016. Ce canal est l'un des nombreux canaux possibles et la publication de la combinaison de tous ces canaux, incluant la résonance de paires de quark top a été coordonnée par une membre de l'équipe. Un exemple en est donné sur la figure 7.

Recherche de nouvelle physique avec deux photons dans l'état final

L'équipe du LPSC est impliquée depuis 2010 dans la recherche de physique au-delà du Modèle Standard dans un état final avec deux photons. Il existe par exemple des théories de dimensions supplémentaires (modèles de Randall - Sundrum ou de Arkani-Hamed-Dimopoulos- Dvali) qui prédisent l'existence d'excitations d'un graviton de spin 2 pouvant se désintégrer en deux photons.

Cette recherche s'appuie sur la très bonne résolution en énergie du calorimètre, qui permet d'identifier un pic ou une queue de distribution se manifestant au-dessus du bruit de fond irréductible du Modèle Standard.

En 2015, un excès avait été observé à une masse invariante autour de 750 GeV. L'analyse de l'ensemble des données du Run 2 n'a pas permis de confirmer cet excès. Des limites inférieures sur les masses des gravitons ont pu être

dérivées à 4.1 TeV pour le modèle résonant (modèle de Arkani-Hamed-Dimopoulos- Dvali) et 7.2 TeV pour le modèle non résonant (modèle de Randall - Sundrum).

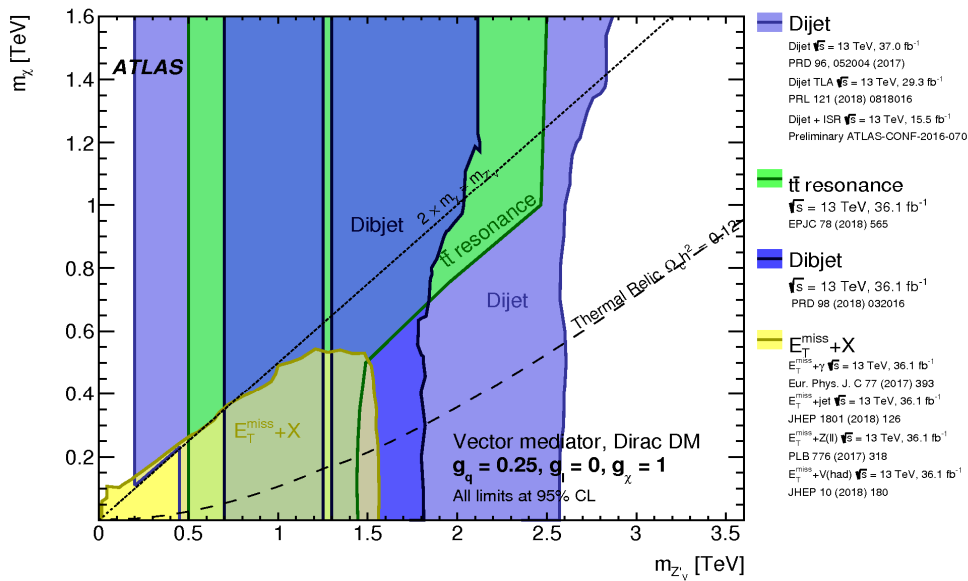


Fig. 7 : exemple de complémentarité des différents canaux de recherche dans un modèle où des WIMPs sont produits via un boson vecteur. La complémentarité dépend des couplages aux quarks et aux WIMPs qui sont indiqués sur le graphique.

Recherche de nouvelles physiques avec des photons collimés dans l'état final

La production de photons collimés, issus d'une particule X se désintégrant en deux particules a qui se désintègrent chacune en plusieurs photons, a été prédite comme une interprétation possible de l'excès observé à 750 GeV dans l'analyse di-photons. Ces photons collimés sont reconstruits comme un seul photon lorsque $m_a < 0.01 m_\chi$. Cette recherche est similaire à la recherche de résonances di-photons avec des critères additionnels de sélection utilisant les formes de gerbe. Le spectre de masse observé est compatible avec le bruit de fond. Les résultats sont interprétés selon des scénarios avec 4 à 12 photons dans l'état final.

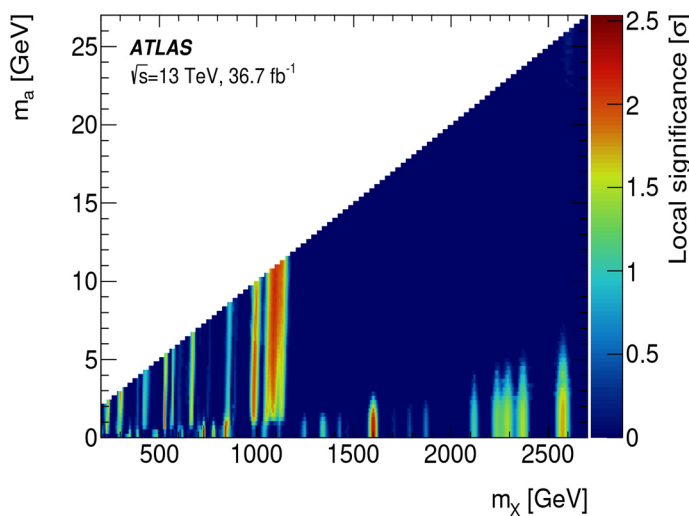


Fig. 8 : signficance en fonction de la masse m_a de la particule intermédiaire et de la masse m_χ de la particule résonante.

1.1.8 Futur collisionneur : R&D pour l'ILC

L'ILC (International Linear Collider) est un projet de collisionneur d'électrons et de positrons à une énergie totale comprise entre 90 GeV et peut-être à long terme de 1 TeV. L'équipe ATLAS, via J.Y. Hostachy, s'est

historiquement préparé depuis les années 2010 en vue d'un tel projet en orientant ses efforts sur les activités de Recherche et de Développement en mécanique, en continuité avec l'historique et le savoir-faire du groupe portant sur la calorimétrie électromagnétique (EM). Un membre de l'équipe est membre de la collaboration internationale CALICE (CALorimeter for the LInear Collider Experiment) qui regroupe 57 Instituts de 17 pays différents provenant des 4 continents : Afrique, Amérique, Asie et Europe ; ainsi que de la collaboration internationale ILD (International Large Detector). Cette activité concerne essentiellement des R&D techniques et instrumentale.

Les travaux du Service Études et Réalisations Mécaniques ont été réalisés en collaboration avec les laboratoires LLR de Palaiseau et le LAL d'Orsay.

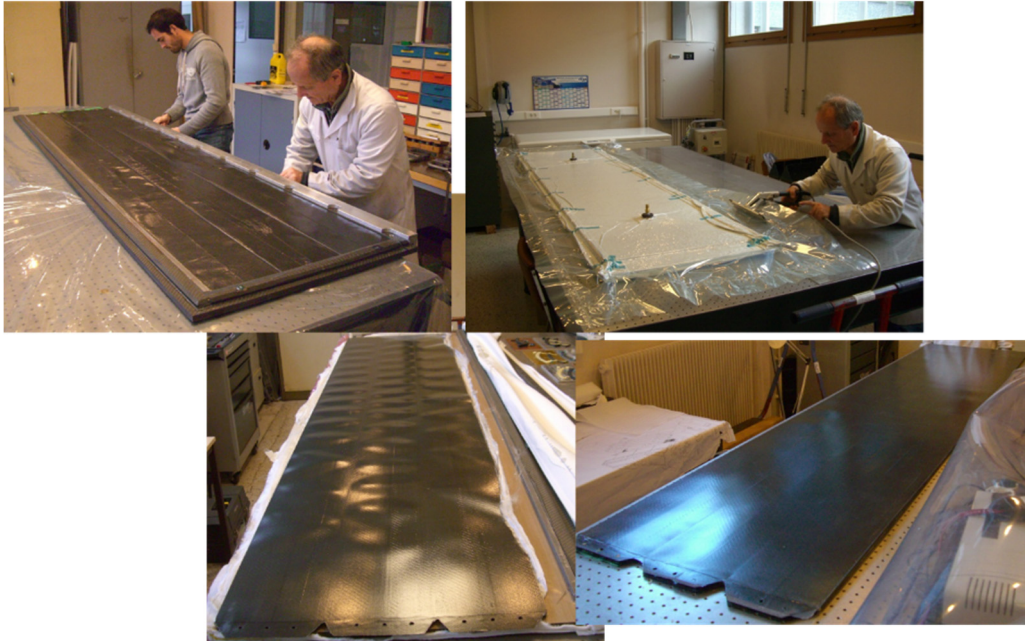


Fig. 1 : Réalisation d'une couche 3 alvéoles de 2m50, d'un grand module du bouchon EM

Au LPSC-Grenoble, l'équipe est ainsi engagée dans :

1. La conception de l'architecture générale des bouchons EM : structure alvéolaire haute résistance (tungstène + fibres de carbone), dessins avancés, simulations numériques et réalisation de prototypes à structures longues (2,5m), voir figure 1.
2. L'assemblage et le positionnement de l'ensemble (tonneau + bouchons) du calorimètre EM : conception et réalisation de rails en composite structurel ou en aluminium avec passage des fluides et commandes.
3. La définition du système de thermalisation de l'ensemble du calorimètre EM : système de circulation d'eau sous-atmosphérique "leakless", prototypes d'échangeurs thermiques, centrale de refroidissement, étude détaillée de l'installation globale (circuits, vannes, etc...), test en grandeur réelle (exemple : thermalisation du module EUDET), test d'une boucle sous-atmosphérique prototype. Ces derniers tests ont constitué mi-2018 le livrable D14.8 du contrat Européen (FP8) AIDA2020, contrat dans lequel le LPSC a la responsabilité du WP14.5.2 (Compact and highly efficient cooling systems), voir figure 2.
4. La réalisation d'un outillage de manutention et l'étude des différentes étapes de l'intégration des bouchons dans le détecteur ILD.

L'avenir de cette activité est actuellement suspendu à la décision de la communauté - et de l'IN2P3 - de s'engager dans la construction de l'ILC. Les compétences acquises et développées dans le domaine (matériaux composites, refroidissement) pourront faire l'objet de valorisation auprès d'autres projets si celui-ci ne devait aboutir.

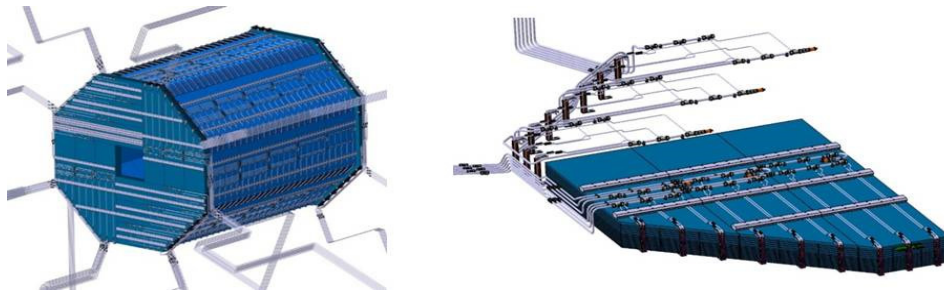


Fig. 2 : Rails de fixation et réseau de refroidissement sous-atmosphérique du ECAL

1.1.9 Pour en savoir plus

Principales publications au cours de la période écoulée :

Tous les membres de l'équipe sont signataires de la collaboration ATLAS qui a publié entre 2016 et 2018, 321 articles dans des revues avec comité de lecture. Parmi ces derniers, 17 articles ont reçu une contribution significative d'un membre du groupe. Ce sont :

- Search for new phenomena in high-mass diphoton final states using 37 fb⁻¹ of proton-- collisions collected at sqrt(s)=13 TeV with the ATLAS detector
- Search for dark matter at sqrt(s)=13 TeV in final states containing an energetic photon and large missing transverse momentum with the ATLAS detector
- Probing the Wtb vertex structure in t-channel single-top-quark production and decay in pp collisions at sqrt(s)=8 TeV with the ATLAS detector
- Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks at sqrt(s)=13 TeV with the ATLAS detector
- Search for new phenomena in events with same-charge leptons and b-jets in pp collisions at sqrt(s)=13 TeV with the ATLAS detector
- Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector
- A search for pairs of highly collimated photon-jets in pp collisions at sqrt(s)=13 TeV with the ATLAS detector
- Measurement of the photon identification efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run 2 data collected in 2015 and 2016
- In situ calibration of large-R jet energy and mass in 13 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector
- Higgs Physics at the HL-LHC and HE-LHC
- Constraints on mediator-based dark matter and scalar dark energy models using sqrt(s)=13 TeV pp collision data collected by the ATLAS detector

Thèses soutenues pendant la période écoulée : 4

- 1- Thomas Meideck, Recherche de dimensions supplémentaires dans l'état final di-photon avec le détecteur ATLAS à 13 TeV, octobre 2018
- 2- Joakim Gradin, Searching for a charged Higgs boson and development of a hardware track trigger with the ATLAS experiment, (co-tutelle avec l'université d'Uppsala, Suède), octobre 2017
- 3- Clément Camincher, Liquid argon calorimetry and search for new physics with pairs of boosted top quarks in the ATLAS experiment at the LHC, octobre 2017
- 4- Simon Berlendis, Search for exotic production of same-sign top-quark pairs at the LHC with the ATLAS detector, septembre 2017.

1.2 Équipe ALICE

Équipe de recherche : membres permanents

G. Conesa-Balbastre, J. Faivre, C. Furget, R. Guernane, C. Silvestre-Tello

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

H. Hassan (doctorant), R. Hosokawa (doctorant), J. Norman (post-doctorant), A. Vauthier (doctorante), H. Yosokawa (doctorant)

Personnels des services techniques

J-F Muraz, M. Marton (service Détecteurs & Instrumentation)

D. Grondin, C. Le Tulle (service mécanique SERM)

O. Bourrion, J. Bouvier (service électronique)

Collaborations : Université du Liban, Université de Tsukuba, Université de Wuhan

The ALICE experiment is dedicated to the study of the quark-gluon plasma produced in ultra-relativistic heavy ion collisions at the LHC. In this context, the LPSC has been involved since 2006 in the construction of the two electromagnetic calorimeters EMCal and DCal for the measurements of high momentum jets, photons and electrons. The LPSC team is still involved in the calorimeters operations and other developments related to the ALICE upgrades for LHC run 3 and 4. The LPSC group participates to several physics analyses mainly on neutral mesons, photon-hadrons and hadron jet correlations and jet and heavy flavor observables for different systems of collisions.

1.2.1 Introduction

À l'échelle de l'infiniment petit, la matière et son comportement peuvent être décrits par trois interactions fondamentales, auxquelles sont sujets les quarks et les leptons. Parmi ces trois interactions, l'interaction forte constitue un sujet d'étude important car elle n'est pas encore testée avec précision. En outre, elle est responsable du confinement des quarks dans les hadrons, observé expérimentalement mais pas encore compris théoriquement. Le plasma de quarks et de gluons (QGP), produit dans les collisions d'ions lourds, est un milieu dans lequel les quarks et les gluons sont déconfinés, qui permet l'étude de l'interaction forte dans des conditions particulières.

Depuis 2006, notre groupe est impliqué dans l'étude du QGP avec l'expérience ALICE à l'aide des faisceaux d'ions lourds ultra-relativistes auprès du collisionneur LHC. Le principal objectif de l'expérience ALICE [1] est d'étudier les propriétés physiques du QGP à partir de la comparaison d'observables mesurées en collisions Pb-Pb, p-Pb et p-p. Les résultats obtenus lors des runs 1 et 2 du LHC indiquent que les collisions d'ions lourds les plus centrales permettent d'atteindre des températures d'environ 400 MeV largement supérieures à la température critique d'environ 150 MeV nécessaire pour produire le QGP. De plus, les mesures démontrent un comportement collectif des constituants dans l'état final et permettent d'en conclure que le milieu se comporte comme un fluide quasi parfait avec un rapport de la viscosité sur l'entropie très faible. De plus, les collisions produisent des quarks plus lourds comme les quarks étranges (s), charmés (c) et beaux (b) qui pourraient participer à l'expansion collective du QGP. Même si ces résultats ont permis de préciser les caractéristiques thermodynamiques du QGP, ils ne permettent pas encore de contraindre suffisamment les paramètres des modèles théoriques qui doivent préciser l'état initial hors équilibre accessible lors de la collision, les conditions de thermalisation de cet état vers un plasma de quarks et de gluons en expansion, et l'évolution globale du système qui conduit à la production des particules dans l'état final.

Notre groupe s'intéresse plus particulièrement à l'étude des particules de grand moment transverse, qui sont issus de la fragmentation des partons produits dans les collisions dures, telles que les photons directs, les mésons neutres, et les jets de particules afin de mesurer la perte d'énergie des partons dans le QGP et la manière dont l'énergie se répartit dans l'état final. Celle-ci peut être étudiée en fonction des différents paramètres de la collision tels que son énergie, sa centralité, mais également le type de parton initialement produit (gluon ou saveur des quarks) à partir des collisions p-p, p-Pb et Pb-Pb disponibles au LHC.

Depuis le démarrage du LHC en 2009, l'expérience ALICE a participé aux prises de données au cours des runs 1 et 2 du LHC entre 2009 et 2018. Les prises de données ont porté sur les collisions p-p à plusieurs énergies dans le centre de masse de la collision (0,9, 2,76, 5,02, 7, 8 et 13 TeV), les collisions p-Pb à 5,02 et 8,16 TeV, les collisions Pb-Pb à 2,76 et 5,02 TeV et les collisions Xe-Xe à 5,44 TeV. Un vaste programme d'améliorations des performances du LHC (augmentation de l'intensité et de l'énergie des faisceaux) et de l'expérience ALICE aura lieu en 2019-20, qui devrait permettre de multiplier par dix les statistiques enregistrées au cours des runs 3 et 4 s'étalant de 2021 à 2029. Les améliorations des détecteurs portent à la fois sur l'électronique de lecture, afin d'augmenter le taux d'enregistrement d'un facteur 50, mais également sur la résolution du système de trajectographie, qui est constitué d'une partie interne formée de capteurs silicium (ITS) et d'une chambre à projection temporelle (TPC).

L'équipe du LPSC, qui a significativement contribué à la construction des calorimètres électromagnétiques EMCal et DCal, est restée fortement impliquée dans leur fonctionnement avec des contributions techniques (services associés au détecteur et système d'électronique de déclenchement) et des activités de calibration et d'analyse associés au calorimètres électromagnétiques. De plus ses membres ont pris part à des contributions techniques portant sur la construction du nouveau détecteur ITS et sur l'électronique de lecture des données de l'expérience (projet O2). En parallèle, l'équipe a contribué durant les trois dernières années à plusieurs analyses de physique portant sur l'étude des corrélations photon-hadron et hadron-jet, de la production de jets inclusifs ainsi que l'étude des saveurs lourdes avec des baryons charmés et les jets étiquetés de quarks beaux. L'ensemble de ces analyses ont fait l'objet de quatre thèses de doctorat dont deux thèses en co-tutelle avec l'université de Tsukuba et une thèse en co-tutelle avec l'université du Liban en collaboration avec le groupe de physique théorique du laboratoire.

1.2.2 Activités relatives aux calorimètres EMCAL et DCal

Développements et calibration des calorimètres EMCal et DCal

L'équipe du LPSC est associée depuis le début du projet aux activités de calibration en énergie des 17664 canaux du calorimètre. La pré-calibration avec des muons cosmiques (2008-2012) s'est poursuivie par la prise de responsabilité de la calibration in-situ utilisant les décroissances en deux photons des pions neutres produits dans les collisions proton-proton, et permettant d'atteindre une précision en énergie de l'ordre du pourcent. La première phase de prises de données (2010-2013) a été une phase de développement des outils de reconstruction, de contrôle-qualité, de simulation des données, ainsi que d'exploration des caractéristiques et du comportement du détecteur. La haute-tension de chaque canal a été progressivement réajustée, et les coefficients de calibration associés ont été produits pour les différentes sous-périodes de prise de donnée.

L'expertise acquise durant cette phase a permis de soulever des questions et d'identifier des problèmes. Durant la deuxième phase de prise de données (2015-2018), outre l'ajustement des hautes-tensions et la production des coefficients de calibration pour la partie du détecteur nouvellement installée, les membres de l'équipe se sont donc investis dans une exploration systématique de ces aspects. Concernant le calorimètre, l'attention portée à la qualité des données a révélé un vieillissement prématuré d'un des composants électroniques et la présence de deux types de diaphonie entre certains canaux. Une solution matérielle a été adoptée pour remédier au premier problème. Cela n'étant pas réalisable pour la diaphonie, l'équipe a développé une méthode pour la reproduire dans la simulation des données et ainsi obtenir un meilleur accord entre les caractéristiques des dépôts d'énergie réels et ceux simulés. Concernant la calibration, une procédure a été introduite pour pouvoir calibrer les canaux subissant l'influence de canaux « bruyants » par l'intermédiaire de la diaphonie, ce qui a permis de diminuer significativement le nombre de canaux ne pouvant pas être calibrés. D'autre part, l'incertitude sur les coefficients de calibration due à la statistique accumulée a été évaluée, et diverses études ont été menées pour identifier et quantifier les effets systématiques.

Développement du système de déclenchement de niveau 1

La mesure des particules neutres et des jets de grandes impulsions a nécessité la mise en œuvre d'un système de déclenchement calorimétrique particulièrement sélectif pour ne conserver que quelques dizaines d'événements par seconde. Depuis le démarrage de la construction du calorimètre EMCal, le laboratoire a en charge le développement de la carte électronique STU (Summary Trigger Unit) et de son micro-logiciel embarqué,

responsable de générer les signaux de déclenchement de niveau 1 vers le Central Trigger Processor (CTP) à partir des données reçues du niveau 0.

Après l'installation de l'extension DCal du calorimètre EMCal pendant le Long Shutdown 1 du LHC, l'équipe a travaillé en collaboration avec l'université de Tsukuba à la mise à jour du micro-logiciel de la carte STU en vue d'en étendre l'utilisation aux calorimètres DCal et PHOS. En plus de seuils de déclenchement fixes utilisés en collisions p-p et p-Pb, cette nouvelle version implémente une nouvelle technique de soustraction du bruit de fond qui améliore la sélection des jets dans les collisions Pb-Pb par l'évaluation de la densité d'énergie moyenne dans les calorimètres DCal et PHOS qui est ensuite retranchée à l'énergie mesurée dans EMCal, et vice versa. Ce nouveau logiciel, particulièrement exigeant en ressources matérielles et logicielles, a été mis en service avec succès dans des délais très courts et utilisé de façon routinière tout au long du Run 2 du LHC. Enfin, la vitesse de lecture de la carte STU a été portée à plusieurs kHz, la rendant capable de supporter l'augmentation des taux d'acquisition de la TPC liée à l'utilisation des cartes RCU2. L'ensemble de ces nouvelles fonctionnalités sont à présent gérées par le logiciel de contrôle en-ligne (serveur DIM) de la carte STU développé au LPSC.

En prévision du Run 3 (et au-delà), l'équipe est impliquée dans la mise à jour de l'électronique de déclenchement du calorimètre électromagnétique, qui sera installée pendant le Long Shutdown 2 du LHC (2019-2020), avec le développement du micro-logiciel de bas-niveau, la construction de nouvelles cartes électroniques STU et l'étude des performances.

1.2.3 Analyses de physique

Les activités de physique de l'équipe du LPSC se sont naturellement orientées vers les particules neutres et les jets, que l'on mesure à l'aide du calorimètre électromagnétique. De plus, un des membres a été chargé par la collaboration ALICE de la coordination du groupe d'analyses de physique associées aux photons et mésons neutres (PWG-GA) pour 2015-16.

Étude des mésons neutres et des corrélations photon-hadrons

L'étude des spectres de pion neutre, d'un photon isolé et leurs corrélations (comme « particule-trigger »), avec les autres particules produites est un axe de travail important au sein de l'équipe depuis de nombreuses années avec trois thèses et plusieurs collaborations extérieures. Elles permettent d'accéder à la mesure de la distribution du paramètre de balance, qui est sensible aux mécanismes d'hadronisation des partons. Les modifications attendues en collisions Pb-Pb par comparaison avec les collisions p-p doivent permettre de contraindre le coefficient de transport du parton dans le milieu.

Le développement des outils d'identification de π^0 à haute impulsion transverse a abouti à la mesure du spectre de π^0 en collisions p-p à 2.76 TeV avec EMCal [4] et en collisions Pb-Pb avec la mesure de la suppression des mésons de haute impulsion due au QGP [5]. En plus, les corrélations π^0 -hadron en collisions pp et Pb-Pb ont permis la mesure de la suppression des particules provenant des jets de haute impulsion et l'augmentation des particules de basse impulsion loin du jet, attribué aussi au jet-quenching [6]. En 2016-18, les analyses du spectre des photons directs isolés et des corrélations photon isolés-hadron ont portées principalement sur l'amélioration de la mesure de la pureté des photons directs isolés à l'aide de nouvelles techniques d'analyse alliant la simulation et les données, et notamment la reproduction de la diaphonie dans la simulation. En particulier, une meilleure compréhension du bruit de fond liés à la désintégration des mésons neutres (π^0 et η) permet un meilleur contrôle des erreurs systématiques associés. Ces études ont permis également un meilleur contrôle de la soustraction du bruit de fond dans la mesure de la distribution du paramètre de balance (reliée à la fonction de fragmentation) en collisions p-p à 7 TeV.

Mesures des jets inclusifs

Les jets, qui sont les signatures expérimentales des quarks et des gluons émergeant des processus à grands transferts d'impulsion, voient leurs propriétés (production, structure et fragmentation) modifiées par la présence du QGP. Ainsi, la reconstruction des jets permet de comprendre plus précisément selon quels processus (décrits dans le cadre de la QCD perturbative) un parton interagit et perd de l'énergie dans le milieu dense et chaud,

apportant à fortiori une meilleure description de la dynamique du milieu lui-même (coefficient de transport, viscosité...).

À partir de l'analyse des données collectées en 2015, l'équipe s'est engagée dans les mesures des sections efficaces de production inclusive de jets chargés en collisions p-p et Pb-Pb, ainsi que du facteur de modification nucléaire associé. Ces mesures en collisions p-p ont été comparées aux prédictions de QCD à l'ordre dominant (LO) et sous-dominant (NLO). Tandis que l'accord avec les calculs NLO avoisine globalement les 10%, des différences supérieures à 50% apparaissent dans la région des basses impulsions transverses ($p_T < 10$ GeV/c) plaidant ainsi pour un calcul à l'ordre NNLO actuellement en cours d'élaboration. Ces mesures de sections efficaces de production inclusive de jets en collisions p-p ont été combinées à celles également réalisées en collisions Pb-Pb afin de construire les facteurs de modification nucléaire des jets. Une suppression d'un facteur ~ 3 de la production de jets a été observée pour les collisions les plus centrales (0-10%). Un ajustement des facteurs de modification nucléaire mesurés a permis de confirmer l'hypothèse d'une perte d'énergie radiative dominante dans le mécanisme de jet quenching.

Étude des saveurs lourdes et du b-tagging

Les baryons charmés dans les collisions proton-proton sont utilisés pour tester les prédictions de la QCD portant sur la production de quarks de saveur lourde (quarks c ou b) et sont particulièrement sensibles aux mécanismes d'hadronisation. Les mesures du run 1 réalisées sur le baryon charmé Λ_c (avec un contenu en quarks udc) ont montré que sa production est supérieure à celle attendue en collisions e+e-. Les données obtenues lors du run 2 ont permis d'accéder au rapport baryon sur méson Λ_c/D_0 , qui est remarquablement semblable au même rapport obtenu avec des saveurs légères (voir figure).

Afin d'étudier la dépendance en masse du jet quenching dans la région des basses impulsions transverses accessible avec l'expérience ALICE, l'équipe s'est engagée dans la mesure de la production inclusive de jets issus de quarks beaux en collisions p-p et p-Pb à l'énergie de 5.02 TeV. Cette mesure a nécessité l'implémentation de techniques d'étiquetage basées sur le paramètre d'impact des traces. Les performances de ces algorithmes (efficacité de sélection de jets issus de quarks beaux et facteur de rejet de jets légers et charmés) ont été évalués par une approche fondée sur les données. Plusieurs points de fonctionnement ont été étudiés afin de garantir des niveaux d'efficacité et de pureté adaptés aux mesures envisagées : mesures des sections efficaces de production inclusive de jets issus de quarks beaux en collisions p-p et p-Pb et du facteur de modification nucléaire. Ces mesures sont en accord avec les prédictions de QCD à l'ordre NLO et constituent également une étude de la faisabilité de l'étiquetage des jets de quarks lourds en collisions Pb-Pb à l'aide des échantillons de hautes statistiques attendus au Run 3 et au-delà.

La collaboration ALICE fournit également un effort important pour le développement de nouvelles techniques d'analyse basées sur les méthodes de « machine learning ». L'équipe du LPSC est impliquée dans le développement de ces outils d'analyse dans le but d'améliorer les mesures portant sur l'identification des quarks beaux pour les futures analyses.

Corrélations hadron-jet et jet-hadron

Un des grands défis de la mesure des jets en collision d'ions lourds réside dans la soustraction du bruit de fond constitué de faux jets. Une manière de s'affranchir de ce bruit de fond consiste à mesurer les jets émis dos-à-dos avec un hadron de grande impulsion transverse et de soustraire les jets qui ne sont pas corrélés. Cette technique d'analyse permet de réaliser des mesures de jets jusqu'à de très faibles moments transverses et des grands rayons de jets. Elle permet également de mesurer la déviation des jets dû à la diffusion dans le QGP. L'équipe est impliquée dans l'analyse des corrélations hadron-jet à partir des données du run 2 en collision Pb-Pb.

De plus, l'analyse des corrélations angulaires pour différentes orientations du jet relativement au plan de réaction permet d'étudier la perte d'énergie dans le milieu en fonction de la longueur traversée par le parton de haute impulsion. L'équipe a étudié les corrélations angulaires de hadrons chargés relativement à l'axe du jet reconstruit dans les collisions Pb-Pb à 5.02 TeV. Les résultats, qui ont été obtenus pour différentes orientations

du jet relativement au plan de réaction dans les événements semi-périphériques (30-50 %), montrent une distribution du jet plus étendue dans le plan de réaction qu'en dehors du plan à basse impulsion transverse ($0.7 < p_T < 2 \text{ GeV}/c$). Un décalage de la position moyenne de la distribution des hadrons par rapport au jet a été observée pour les événements en dehors du plan de réaction et une analyse plus précise sera réalisée avec les données obtenues en 2018. L'interprétation de ces résultats fait intervenir la géométrie initiale du milieu chaud, les mécanismes de radiation dans le milieu, et son évolution hydrodynamique.

1.2.4 Contributions techniques

Maintenance des calorimètres EMCal et DCal

Durant la période 2016-18, le Service Détecteurs et Instrumentation a continué à s'impliquer dans l'amélioration des services relatifs aux calorimètres EMCal et DCal. En particulier, le service a conçu, réalisé puis installé, auprès de l'expérience ALICE, le système de refroidissement ainsi que les supports des cartes SRU (Summary Region Unit). Au cours de la période LS2 à venir (2019), les équipes techniques participeront également à l'extraction puis à la réinsertion des supermodules DCal, PHOS et CPV. L'ensemble de ces contributions techniques sont très importantes car elles permettent non seulement d'améliorer la fiabilité dans le temps du fonctionnement du détecteur mais aussi de contribuer de manière significative à l'effort commun.

Contributions à l'upgrade d'ALICE

L'expérience ALICE a mis en place pour les runs 3 et 4 du LHC un programme d'améliorations du détecteur, qui portent sur le remplacement des chambres de lecture de la TPC et des électroniques de lecture par une électronique sans temps mort pour de nombreux détecteurs (TPC, TRD, Muon etc.) de même que sur le remplacement du trajectographe central (ITS) et l'ajout d'un trajectographe MFT aux angles avant.

Dans ce contexte, le service de mécanique (SERM) du laboratoire s'est impliqué dans la conception et réalisation de l'outil d'assemblage des staves (unités d'assemblage composés du système de refroidissement, de l'électronique et des pixels) de la couche intermédiaire du détecteur ITS en collaboration avec l'INFN Turin.

Par ailleurs le passage à un mode continu de lecture des données, nécessite le développement d'un micro-logiciel de la carte CRU, qui est en charge de la transmission des informations et des données issues de l'ensemble des sous-détecteurs. Le laboratoire a pris en charge la responsabilité de ce développement en proposant l'architecture du micro-logiciel à la collaboration et en réalisant des tests significatifs sur plusieurs sous-systèmes. La phase de développement sera suivie d'une phase de déploiement avec un support et une documentation mise à disposition de l'ensemble des sous-détecteurs.

1.2.5 Pour en savoir plus

Principales publications au cours de la période écoulée :

[1] Performance of the ALICE experiment at the CERN LHC, ALICE collaboration, Int. J. Mod. Phys. A29 (2014) 1430044.

[2] Mesure des corrélations photon-hadron auprès de l'expérience ALICE au LHC pour l'étude du plasma de quarks et de gluons, A. Vauthier, thèse de doctorat de l'université Grenoble-Alpes soutenue le 26 septembre 2017. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01743801>

[3] Measurement of jet spectra reconstructed with charged particles in Pb-Pb collisions at 5,02 TeV with the ALICE detector at the LHC, H. Yokoyama, thèse de doctorat de l'université Grenoble-Alpes soutenue le 29 mars 2018. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01835842>

[4] Production of π^0 and eta mesons up to high transverse momentum in pp collisions at 2.76 TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C (2017) 77: 339.

[5] Neutral pion and eta meson production at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at 2.76 TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C98 (2018) 044901

[6] Jet-like correlations with neutral pion triggers in pp and central Pb-Pb collisions at 2.76 TeV, ALICE collaboration, Phys, Lett. B, Vol 763 (2016) 238-250

Thèses soutenues pendant la période écoulée : 3

- 1- A. Vauthier- « *Mesure des corrélations photon-hadron auprès de l'expérience ALICE au LHC pour l'étude du plasma de quarks et de gluons* » - 26 septembre 2017 - Dir. J. Faivre
- 2- H. Yokoyama- “*Measurement of jet spectra reconstructed with charged particles in Pb- Pb collisions at 5.02 TeV with the ALICE detector at the LHC* ” - 29 mars 2018 - Dir. C. Furget, R. Guernane
- 3- H. Hadi, “ *Modeling and measuring the b-jet nuclear modification factors in p-Pb collisions at 5.02TeV with the ALICE experiment at the LHC*” - 19 février 2019 - Dir C. Furget, R. Guernane

1.3 Équipe de Physique théorique

Équipe de recherche : membres permanents

S. Kraml, M. Mangin-Brinet, J. Quevillon, I. Schienbein, C. Smith

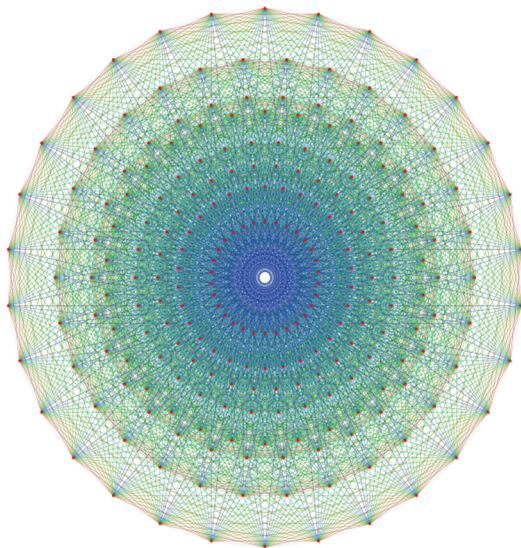
Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

G. Chalons, J. Da Silva, A. Kusina, K. Mawatari, D. Sengupta (post-doctorants), J. Bernon, U. Laa, G. Gbedo, M. Altakach, K. Svirina, S. Touati, H. R. Gonzales (doctorants)

The theory group at LPSC is active in particle phenomenology. Our research follows essentially two main lines. The first is the study of QCD, both analytically and numerically through lattice simulations. One of the goal is to study the proton and nucleon structures, with the purpose of determining the parton distribution functions of relevance for high-energy collider experiments like the LHC. The second is the construction and characterization of extensions to the Standard Model, for example extended Higgs sectors, supersymmetry, extra gauge bosons, Grand Unified Theories, etc. Particular emphasis is set on their collider signatures, for which precision calculations are often required, and automated tools have to be developed.

1.3.1 Introduction

La physique théorique a comme objectif la construction de modèles mathématiques aussi simples et complets que possible, capables de rendre compte d'un maximum de phénomènes physiques à partir d'un minimum de paramètres libres. En physique des particules, ces modèles décrivent les constituants élémentaires et leurs interactions. Dans ce contexte, le siècle dernier a vu l'avènement du Modèle Standard (MS), décrivant presque tous les processus connus en termes de juste 19 paramètres. Il laisse de côté l'interaction gravitationnelle, dont le traitement quantique nous échappe, mais reste le meilleur modèle disponible aujourd'hui. Bien sûr, le but ultime est d'inclure toutes les interactions au sein d'une seule théorie ayant peu ou pas de paramètres libres. Le fonctionnement de l'univers, du subatomique au cosmologique, découlerait alors entièrement de sa structure géométrique intime.



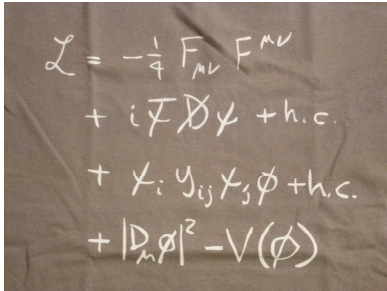
Au quotidien, face à l'ampleur et l'ambition de cet objectif, les théoriciens suivent deux axes de travail. Un premier angle d'attaque est de tester le MS, et d'estimer précisément ses paramètres libres. La théorie intervient car le lien entre paramètres fondamentaux et observables mesurées est indirect. L'établir nécessite l'évaluation de corrections quantiques, particulièrement complexes quand l'interaction forte joue un rôle. Par exemple, lorsque le LHC collisionne des protons, agrégats de quarks et de gluons, ce sont ces derniers qui interagissent. La mesure d'un paramètre fondamental nécessite donc de contrôler la distribution des constituants des protons.

Au lieu de tester le MS en espérant le prendre en défaut, la deuxième approche est de regarder directement au-delà. En effet, passer du MS à la théorie ultime, si elle existe, ne se fait probablement pas en une étape. Donc, partant des limitations du MS, les théoriciens cherchent à construire des

modèles un peu plus simples ou complets. Par exemple, ils peuvent avoir moins de paramètres libres ou un meilleur comportement quantique, expliquer pourquoi les neutrinos sont si légers, de quoi est faite la matière noire, ou comment l'équilibre entre matière et antimatière s'est brisé après le Big Bang. Reste alors à vérifier si ce modèle passe les contraintes expérimentales actuelles, puis à analyser sa phénoménologie, entre autres aux collisionneurs, en vue de le valider directement. Ici aussi, contrôler les interactions fortes est crucial pour identifier avec certitude un nouveau phénomène.

Un peu d'histoire...

La prédiction du boson de Higgs illustre à merveille le travail des théoriciens, et leur rôle au côté des expérimentateurs. L'interaction faible est la seule interaction fondamentale de courte portée. Les trois autres, fortes, électromagnétiques, et gravitationnelles, sont de portée infinie car dues à l'échange de particules sans masse : gluons, photons, et gravitons. Jusqu'en 1969, le modèle de Fermi était utilisé pour décrire l'interaction faible. Bien qu'en parfait accord avec l'expérience, ce modèle ne satisfaisait pas les théoriciens. Il n'expliquait pas pourquoi les vecteurs de l'interaction faible avaient une masse et, plus grave, il était incompatible avec certains préceptes incontournables de théorie des champs : la renormalisabilité et l'unitarité. C'est ce problème


$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \chi_i^\dagger \gamma_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

qu'Englert, Higgs et d'autres ont résolu, ce qui leur a valu le Prix Nobel 2013. Ils ont montré comment générer la masse des vecteurs de l'interaction faible, et donc limiter sa portée, à travers leurs interactions avec un champ scalaire. Procéder ainsi préserve la symétrie de la théorie et la rend renormalisable et unitaire. La preuve de ce dernier point valut à 't Hooft et Veltman le Prix Nobel 1999. Ce mécanisme est à la base du MS, tel que formulé par Glashow, Weinberg, et Salam, Prix Nobel 1979. Ses prédictions se sont toutes spectaculairement vérifiées, la dernière en date étant l'existence du champ scalaire -le boson de Higgs- découvert en 2012 au LHC.

Qu'étudient les théoriciens du LPSC ?

Le LPSC a toujours eu un groupe de physique théorique important, jusqu'à une dizaine de chercheurs permanents. Par le passé, les thématiques étaient surtout centrées sur la physique hadronique et nucléaire. Après la vague de départs des années 2000, le groupe s'est rajeuni, restructuré et réorienté vers la physique des particules. Il se compose aujourd'hui de cinq chercheurs permanents (4 CNRS, 1 UGA), soutenus sur la période 2016-18 par deux ou trois chercheurs en CDD chaque année, et autant d'étudiants en thèse. Comme nous l'illustrerons dans ce rapport d'activités, l'équipe du LPSC contribue aux avancées dans les domaines les plus actifs et compétitifs de la physique des particules d'aujourd'hui. Grâce à ce dynamisme, à la fiabilité et au sérieux des travaux effectués, elle bénéficie d'une excellente réputation et d'une visibilité tant nationale qu'internationale.

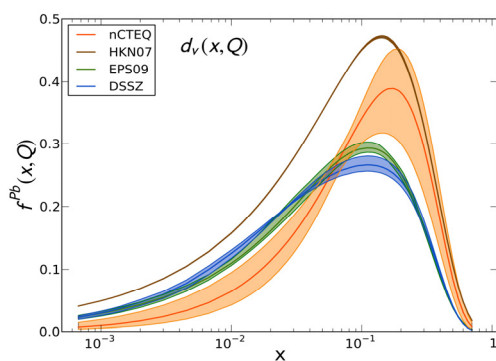
Les travaux s'inscrivent dans le cadre général exposé plus haut, et couvrent un large spectre d'approches et de thématiques. Avant d'entrer dans le détail, nos axes majeurs de recherche sont (1) Le traitement des effets dus aux interactions fortes, en particulier dans les collisions proton-proton du LHC, (2) la formulation de modèles de nouvelle physique, l'étude de leurs phénoménologies aux collisionneurs, présent ou futur, et celle de leurs conséquences astrophysiques et cosmologiques. Ces thématiques sont étroitement liées aux programmes expérimentaux du LPSC. Par exemple, l'étude du boson de Higgs, la recherche de la supersymétrie, ou le contrôle des effets de l'interaction forte sont des préoccupations communes avec la collaboration ATLAS. Également, l'interaction forte est au cœur de l'activité de la collaboration ALICE. Nos travaux sur le problème CP fort établissent un lien naturel avec les activités de l'équipe UCN. Finalement, l'épineuse question de la nature de la matière noire mobilise une partie de nos efforts et de ceux des groupes d'astrophysique.

1.3.2 Chromodynamique Quantique

Le but de la Chromodynamique Quantique est d'expliquer la cohésion des noyaux ainsi que la structure des hadrons : protons, neutrons, hypérons, pions, kaons, etc....c'est-à-dire l'essentiel de la matière visible de l'univers. Quand on sait que les hypérons, particules étranges et instables sur terre, constituent une fraction importante du cœur des étoiles à neutrons ou que les premières microsecondes de l'Univers ont vu le plasma de quarks et de gluons se transformer en hadrons, en omettant bien d'autres domaines essentiels, on ne s'étonnera pas que la QCD soit l'objet d'un immense effort théorique pour en comprendre tous les ressorts. Les activités de l'équipe en QCD se concentrent aussi bien sur les aspects perturbatifs de la QCD, que sur les calculs *ab initio*, donc non perturbatifs.

Détermination des distributions de partons

L'une des activités principales de recherche de l'équipe du LPSC concerne l'étude de la structure des nucléons et noyaux complexes. Ces systèmes sont caractérisés par leurs distributions de partons (PDF) qui, intuitivement, décrivent en détails leur constitution en quarks et de gluons. Ces PDF sont d'une importance primordiale pour la physique moderne des hautes énergies, qui se concentre sur l'étude des interactions entre particules élémentaires telles les quarks et gluons. La connaissance aussi précise que possible des PDF, c'est-à-dire de la structure des hadrons, est indispensable pour exploiter au mieux les résultats expérimentaux des collisionneurs de haute énergie utilisant des hadrons dans l'état initial. En particulier, les PDF sont indispensables à la détermination d'une large classe d'observables, et des outils essentiels pour pouvoir prédire les sections efficaces des collisions p-p, p-A, A-A (ainsi que γ -p et γ -A) au Large Hadron Collider (LHC), indispensables au succès de son ambitieux programme de physique. Rappelons que le LHC explore les lois fondamentales de la nature à l'échelle du téra-électronvolt, ce qui inclut l'étude du mécanisme de brisure de symétrie électrofaible, les recherches de signaux d'une nouvelle physique, les tests de la Chromodynamique Quantique perturbative (pQCD) dans des domaines cinématiques jamais explorés jusqu'alors, ainsi que les études détaillées des propriétés du plasma de quarks et de gluons (QGP). De plus, les PDF ne sont pas seulement des outils ou des pré-requis empiriques pour les calculs, mais représentent aussi en elles-mêmes un sujet d'étude crucial de la chromodynamique quantique (QCD); elles font en particulier l'objet d'études par calculs sur réseau, ou via des théories effectives.



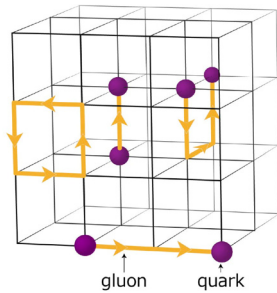
Les PDF sont déterminées par des ajustements globaux des données d'une grande variété de processus durs en utilisant le cadre théorique nCTEQ [1], qui a été développé par l'équipe du LPSC avec quelques membres de la collaboration CTEQ. Cette approche représente une extension du cadre théorique de la collaboration CTEQ pour analyser les PDF dans les protons, et permet de traiter plusieurs noyaux avec nombre atomique A, reproduisant le cas du proton dans la limite $A \rightarrow 1$. Un aspect unique de cette approche est ainsi sa large portée puisque les PDF dans les protons et les noyaux sont utilisées dans un cadre théorique cohérent et unifié, au lieu de la pratique habituelle qui consiste à considérer soit des protons

soit des noyaux. Notre groupe a investi un effort tout particulier dans la détermination des PDF nucléaires nCTEQ et de leurs incertitudes. Par exemple, dans la figure ci-dessous sont représentées les PDF des quarks de valence dans un noyau de plomb et leurs incertitudes, à une énergie de 10 GeV, comparées aux résultats obtenus par différents groupes nPDF (HKN07, EPS09, DSSZ).

Un projet débuté récemment ambitionne d'appliquer la méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov à la détermination des PDF, ce qui permet en particulier une estimation plus rigoureuse des incertitudes. L'un des points les plus délicats de ces méthodes est le temps de calcul requis. Une première étude a démarré, qui vise à identifier les étapes les plus lentes et à optimiser les codes, avec une éventuelle utilisation du parallélisme.

Calculs sur réseau

La QCD ne compte que sept paramètres : une masse pour chacun des 6 quarks et une constante de couplage qui règle l'intensité de l'interaction forte. Cette théorie permet d'interpréter un nombre immense de phénomènes physiques à partir de peu de paramètres et d'un formalisme mathématique bien défini et très compact. Toute médaille a son revers et dans le cas de cette splendide théorie, il se manifeste par l'extraordinaire difficulté des calculs de QCD. Cette complexité est le prix à payer pour une théorie qui, à basse énergie, est capable de confiner les quarks et les gluons dans les hadrons.



Si à haute énergie, dans le domaine où la constante de couplage forte est relativement petite (dans les diffusions à haute énergie par exemple), les développements perturbatifs ont apporté une compréhension quantitative et qualitative précieuse de cette théorie, à basse énergie (pour la description des états liés et de la structure des hadrons par exemple) la seule méthode de calcul rigoureuse est la chromodynamique quantique sur réseau (LQCD pour « lattice QCD »).

L'une des activités principales du LPSC en LQCD [2] a consisté ces trois dernières années à développer un formalisme original pour calculer les constantes de renormalisation sur réseau. La renormalisation non perturbative est en effet un ingrédient essentiel des calculs sur réseau. La discrétisation de la QCD sur un réseau d'espace-temps fournit une régularisation évidente de la théorie, en introduisant la maille du réseau comme coupure naturelle. Cependant, toute comparaison avec des résultats physiques - en particulier en ce qui concerne les fonctions de structure du nucléon - requiert un contrôle précis de la limite du continu. La renormalisation permet, à partir des quantités nues calculées sur réseau, d'obtenir les observables physiques (indépendantes donc de la maille du réseau), avec de bonnes précisions (typiquement de l'ordre du pourcent). Les constantes de renormalisation sont donc des quantités cruciales pour une comparaison pertinente entre les résultats expérimentaux disponibles et les calculs théoriques, que ce soit pour les fonctions de structure ou les distributions de partons dans le nucléon. Les méthodes développées localement permettent en particulier d'éliminer de façon très efficace les artefacts réseau qui affectent le calcul de ces constantes de renormalisation.

L'équipe a aussi activement contribué à générer des champs de jauge (gluons) avec quatre saveurs de quarks dynamiques, et à la masse physique des quarks, ce qui représente une première dans le domaine de la LQCD.

1.3.3 Recherche de nouvelle physique

Le LHC explore la physique à l'échelle d'énergie du TeV, dans l'espoir d'y découvrir les mécanismes régissant la brisure de la symétrie électrofaible et d'observer les premiers signes d'une dynamique au-delà du Modèle Standard (MS). La découverte en 2012 d'une nouvelle particule, avec une masse d'environ 125 GeV et des propriétés proches de celles attendues pour le boson de Higgs du MS, véritable pierre angulaire de ce modèle, constitue donc un premier triomphe pour ce programme.

Même conforté par cette découverte, le MS laisse beaucoup de questions en suspens. Outre qu'il exclue la gravité, les valeurs mesurées de ses paramètres ne semblent pas arbitraires. Par exemple, la convergence des constantes de couplage forte, faible et électromagnétique ou la petitesse des masses des neutrinos ne se comprennent naturellement qu'en présence d'une nouvelle dynamique à très haute énergie, entre 10^{12} et 10^{16} GeV. Plus grave, la légèreté du boson de Higgs par rapport à ces énergies est inexplicable dans le cadre du MS où les corrections radiatives l'alourdiraient terriblement.

Ce problème de hiérarchie peut se résoudre par l'extension du MS dès l'échelle d'énergie du TeV. Toutes les extensions proposées introduisent de nouvelles particules, qu'elles soient fermioniques (matière), vectorielles (interaction), ou scalaires (similaires au boson de Higgs). N'étant pas toutes beaucoup plus lourdes que celles du MS, elles peuvent affecter sa dynamique. Par exemple, les propriétés du boson majoritairement en charge de la brisure électrofaible sont altérées. De ce fait, l'étude détaillée du boson observé à 125 GeV ouvre une fenêtre précieuse sur la nouvelle physique, et impacte directement les modèles les plus étudiés : supersymétrie, nouvelles dimensions spatiales, brisures non-perturbatives (technicouleur, little Higgs...), ou plus génériquement les modèles avec groupes de jauge étendus, secteur de Higgs élargi, ou nouvelle génération de matière.

Phénomènes supersymétriques aux collisionneurs

Les principes de symétrie sous-tendent les théories de physique des particules élémentaires. Historiquement, le premier groupe de symétrie est celui de Galilée, intimement lié à la mécanique classique. Plus tard, ce groupe fut supplanté par celui de Poincaré, intrinsèque à la relativité restreinte. La supersymétrie (SUSY) s'inscrit dans cette évolution ; sa version locale pourrait même en être l'étape ultime dans le cadre d'une théorie quantique des champs. Elle offre une description unifiée des particules de spins entiers et demi-entiers, éliminant ainsi la

distinction entre interactions dues à l'échange cohérent de bosons et matières stabilisées grâce au principe d'exclusion de Fermi.

Phénoménologiquement, le principal attrait de la SUSY est qu'elle résout le problème de hiérarchie : grâce à la présence d'un partenaire de spin différent d'1/2 pour chaque particule du MS, les corrections radiatives se compensent largement, et le boson de Higgs ne s'alourdit plus autant. Évidemment, cette compensation n'est efficace qu'avec des partenaires pas trop lourds. Typiquement, ils devraient avoir des masses de l'ordre du TeV, et être accessibles au LHC.

	Particules standards	Partenaires Supersymétriques	
Quark & leptons Spin 1/2			Squarks & sleptons Spin 0
Bosons de jauge Spin 1			Jauginos Spin 1/2
Bosons de Higgs Spin 0			Higgsinos Spin 1/2

Toutefois, la SUSY en tant que telle est loin d'être un principe suffisant pour complètement définir une théorie. En effet, cette symétrie ne peut être qu'approximative à basse énergie puisque particules et sparticules n'ont pas les mêmes masses. Actuellement, de nombreux modèles ou descriptions phénoménologiques de sa brisure coexistent, ce qui rend l'étude de la SUSY plutôt complexe. D'un autre côté, cette sous-détermination peut être vue comme une qualité phénoménologique : de par sa versatilité, la SUSY permet de sonder une large gamme d'effets de nouvelle physique, et ce tout en restant dans le cadre d'une théorie renormalisable, dont les corrections quantiques sont calculables.

Le contexte supersymétrique couvre une large partie de nos activités. Comme pour l'étude du boson de Higgs, celle de la SUSY peut se faire de façon effective, c'est-à-dire en tentant de couvrir aussi largement que possible ses réalisations concrètes, ou de façon spécifique en se concentrant sur un modèle précis. Nos travaux suivent l'une ou l'autre voie, et tentent surtout d'interpréter les contraintes expérimentales et/ou de proposer de nouvelles stratégies pour découvrir ou contraindre la SUSY.

Théorie effective

En plus de la SUSY, l'équipe du LPSC étudie de nombreux autres scénarios de nouvelle physique. Récemment, ses travaux ont surtout reposé sur le formalisme effectif, que ce soit pour interpréter le signal d'un boson de Higgs à 125 GeV et les mesures de ses couplages, les limites « Simplified Model Spectra » [3], la violation du nombre baryonique dans les canaux dileptons, ou la recherche de matière noire. À chaque fois, l'équipe a paramétré en toute généralité, sans référence à un modèle particulier, l'impact de la nouvelle physique. De plus, ces analyses ont été illustrées à l'aide de modèles spécifiques, par exemple les secteurs scalaires étendus pour les études du boson de Higgs et de la matière noire, ou les leptosquarks pour celles sur la violation du nombre baryonique.

L'équipe s'est également intéressée aux théories introduisant de nouveaux bosons de jauge (W' , Z') très massifs. De telles particules se détectent via leurs désintégrations, par exemple en paires de leptons et/ou de quarks, qui souffrent d'importantes incertitudes dues aux interactions fortes. Grâce aux calculs des corrections quantiques effectués au sein de l'équipe, ces incertitudes ont pu être réduites, ce qui permettrait, au moins en principe, de caractériser la théorie sous-jacente à partir de signaux expérimentaux.

Finalement, l'équipe du LPSC s'intéresse à la mise au point d'une procédure permettant de rechercher une nouvelle particule qui interférerait avec le bruit de fond (constitué des particules du Modèle Standard), créant des structures très singulière en "pic et creux" qui ne sont pas encore maîtrisées. Cette thématique est l'objet d'un groupe de travail au CERN [4].

1.3.4 Matière noire : Propriétés et contraintes

À moins de profondément modifier notre compréhension de la gravité, l'univers ne peut être constitué uniquement de matière connue. Les preuves cosmologiques et astrophysiques de l'existence d'une grande quantité de matière noire s'accumulent et, dans une large mesure, concordent. Si cette matière noire (dénotée

DM pour dark matter) se compose de particules, elles doivent être stables à l'échelle de l'âge de l'univers, électriquement neutres, et non relativistes. Ceci étant, aujourd'hui, nous n'en savons pas plus sur cette forme de matière, et elle n'a pas été observée directement sur terre.

Néanmoins, les théoriciens s'attendent à ce que la DM ne soit pas très différente de la matière classique. D'abord, les densités reliques de matière baryonique et noire sont très proches, juste un facteur cinq. Puis, le MS contient déjà des particules de DM, les neutrinos, même si pas en quantité suffisante. Ensuite, les théories de nouvelle physique incluent souvent, ou peuvent facilement inclure, une particule stable, neutre et suffisamment massive. Enfin, si cette particule de DM interagit avec celles du MS, alors l'intensité de cette interaction doit être similaire à celle de l'interaction faible. Par exemple, en supersymétrie avec parité R, le plus léger des super-partenaires neutres des bosons de Higgs et de jauge peut parfaitement remplir ce rôle. Plus généralement, tous ces indices pointent vers une modification relativement légère du MS, et non vers un changement complet de paradigme.

Une telle interaction de la DM avec la matière ordinaire ouvre la possibilité de l'observer directement, tant aux expériences dédiées qu'aux collisionneurs. Inversement, la mesure de sa densité relique et l'absence actuelle de signaux deviennent contraignantes pour nos modèles de nouvelle physique. Cette connexion est à la base des travaux de l'équipe du LPSC. Comme précédemment, l'une des deux stratégies complémentaires pour l'exploiter est mise en œuvre : soit effective, en paramétrant les couplages de la DM de manière générique, soit dans un modèle particulier, en étudiant la viabilité de son candidat DM.

Toujours est-il qu'en dépit d'un large programme expérimental, aucune particule de DM n'a été découverte jusqu'à présent. Toutes les évidences de son existence restent de nature gravitationnelle. Alors que beaucoup de théories prédisent des interactions avec les particules du Modèle Standard, et justifient donc l'existence de ce large programme, il est aussi tout à fait possible que le secteur de la matière noire soit isolé. Dans ce cas, des progrès significatifs peuvent toujours être fait en se basant sur des observations cosmologiques et astrophysiques. En particulier, des observations astronomiques sur des échelles relativement petites pourraient mettre en évidence les propriétés thermodynamiques de ce secteur caché, et ce d'autant plus que les observations vont énormément progresser dans les années à venir grâce à la nouvelle génération d'outils de hautes précisions astronomiques tels que LIGO, Gaia et LSST. L'équipe du LPSC s'emploie donc à fournir des prédictions quantitatives pour les structures de matière noire sur de petites échelles cosmologiques, tels les trous noirs primordiaux ou les amas d'axions, ainsi qu'à leur détection par exemple via lentillage gravitationnel.

1.3.5 Pour en savoir plus

Liens vers les pages de nos collaborations :

[1] Pour les distributions de partons : [la collaboration nCTEQ](#).

[2] Pour les calculs sur réseaux, [la collaboration ETMC](#).

[3] Pour les outils automatisés, voir par exemple [PyR@TE](#) qui implémente l'évolution sous le groupe de renormalisation de n'importe quel modèle, ou [SModelS](#) qui permet d'interpréter les résultats d'analyses au LHC.

[4] Certaines de nos études du secteur scalaire s'inscrivent dans le cadre du [LHC Higgs Cross Section working group](#), auquel notre groupe est rattaché.

Thèses soutenues sur la période écoulée : 3

1. Jérémy Bernon, 2016, [Higgs sector characterization and aspects of the flavor puzzle](#).

2. Ursula Laa, 2017, [Understanding LHC searches for new physics with simplified models](#).

3. Gabin Gbedo, 2017, [Les techniques Monte Carlo par chaînes de Markov appliquées à la détermination des distributions de partons](#).

Principales publications au cours de la période écoulée :

Sur la période 2016-2018, nous avons publié 90 documents, dont 44 sont des articles parus dans des revues avec comité de lecture. *La liste complète de nos publications* peut être consultée sur INSPIRES via [ce lien](#).

1.4 Équipe Neutrons ultra-froids (UCN)

Équipe de recherche : membres permanents

B. Clément, G. Pignol, K. Protassov, D. Rebreyend, A. Leredde (CDD), R. Virod (CDD), L. Ferraris-Bouchez, Y. Kermaïdic, Yinghao Xi (doctorants)

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

A. Leredde, R. Virod (post-doctorants), L. Ferraris-Bouchez, Y. Kermaïdic, Yinghao Xi (doctorants)

Personnels des services techniques

P. Boge, Y. Carcagno, C. Fourel, J. Menu, E. Perbet, F. Vezzu, L. Vivargent, atelier mécanique (Service Études et Réalisations Mécaniques)

R. Faure, J. Marpaud, M. Marton, C. Thomassé (Service Détecteurs et Instrumentation)

O. Bourrion, D. Tourres, C. Vescovi (Service Électronique)

C. Martin, C. Vannier (Service Administration et Finances)

Ultra Cold Neutrons (UCN) -- neutrons in the neV range that can be stored in material (as well as magnetic) vessels -- are privileged tools to investigate the so-called high intensity frontier, i.e. the quest for physics beyond the Standard Model of particle physics using high precision experiments. Our group is involved in two main experiments: the search for new sources of CP violation with the measurement of the electric dipole moment of the neutron at the Paul Scherrer Institute (nEDM@PSI) and the investigation of the quantum states of UCN bouncing at the surface of a mirror at the Laue Langevin Institute (ILL).

1.4.1 La mesure du moment dipolaire électrique du neutron : l'expérience nEDM

L'expérience nEDM@PSI est portée par une collaboration d'une cinquantaine de personnes provenant d'une dizaine de laboratoires principalement en Europe. Trois laboratoires de l'IN2P3 (CSNSM Orsay, LPC Caen, LPSC Grenoble) sont membres de la collaboration.

Analyse des données

La période 2016-2018 a vu l'arrêt de l'exploitation du spectromètre développé dans les années 80 par la collaboration RAL/Sussex/ILL. Ce spectromètre, déménagée de l'ILL à PSI en 2009, est détenteur de la meilleure limite de l'EDM du neutron, $d_n < 3 \cdot 10^{-26} \text{ e cm}$ (90 % CL), publiée en 2006. Après plusieurs années consacrées à une remise à niveau et à des améliorations de l'installation - la plus notable étant l'ajout d'un ensemble de magnétomètres Cs - puis à l'optimisation des performances, la prise de données en conditions nominales s'est déroulée en 2015 et 2016, l'année 2017 ayant été consacrée à des mesures complémentaires. Un résultat préliminaire de la sensibilité statistique correspondant à l'intégralité de la période 2015-2016 a déjà été obtenu dans le cadre de la thèse de Yoann Kermaïdic (soutenue en octobre 2016). Depuis lors, l'implication de l'équipe dans l'analyse se poursuit en menant en parallèle le long et minutieux travail de vérification/consolidation de l'analyse et des études spécifiques pour estimer un certain nombre d'erreurs systématiques. Une thèse, celle de Laura Ferraris-Bouchez, est en particulier consacrée à l'extraction de la distribution spatiale du champ magnétique à partir de cartes 3D enregistrées à l'aide d'un robot lors de campagnes de mesure dédiées. Les inhomogénéités résiduelles du champ magnétique sont en effet à l'origine de plusieurs effets systématiques dont le principal, le faux EDM de mouvement du ^{199}Hg . Le résultat définitif devrait légèrement améliorer la précédente mesure.

L'équipe a également mis à profit la disponibilité des données nEDM pour explorer d'autres canaux de nouvelle physique comme la recherche d'axions oscillants.

Conception du spectromètre n2EDM

Depuis déjà plusieurs années, la collaboration s'est engagée dans le développement d'un instrument de nouvelle génération, le spectromètre n2EDM, dans l'objectif d'atteindre une sensibilité de 10^{-27} e cm . Le futur dispositif reprendra les mêmes éléments de base que l'ancien instrument : appareil à température ambiante et magnétométrie combinée Hg/Cs mais sera de dimension sensiblement plus grande. La figure 1 montre un schéma de l'ensemble du dispositif.

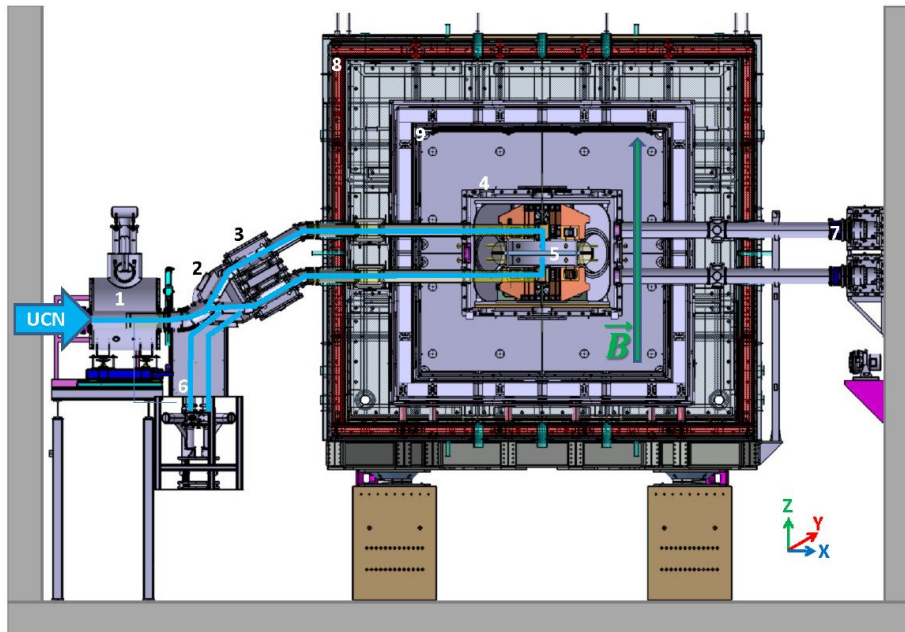


Fig. 1 : Vue d'ensemble du spectromètre n2EDM. La double chambre de précession (5) se trouve dans une chambre à vide (4) elle-même située au centre d'un blindage magnétique (8,9) de dimension extérieure 5x5x5 m³. Les parties surlignées en bleu correspondent au trajet des UCN. Le switch (2,3) permet de guider les UCN de la source aux chambres de précession puis vers les détecteurs (6). Un aimant supra (1) permet de polariser les UCN.

L'équipe du LPSC a pris la responsabilité de plusieurs tâches d'ampleur avec l'appui des services techniques du LPSC et est en charge de délivrer les éléments suivants :

- Le switch UCN : ce système d'aiguillage, constitué de guides UCN mobiles de grand diamètre (130 mm), permet de guider les UCN de la source vers les chambres de précession durant le remplissage, puis des chambres vers les détecteurs après la séquence de Ramsey.
- Un robot pour la cartographie 3D du champ magnétique. Ce travail consiste à adapter le robot utilisé précédemment aux nouvelles dimensions ainsi qu'à corriger certains défauts.
- Le co-magnétomètre Hg qui permet de corriger les variations résiduelles du champ magnétique. Il s'agit d'injecter une vapeur polarisée de ¹⁹⁹Hg dans les chambres de précession en même temps que les UCN. L'analyse de la précession des atomes ¹⁹⁹Hg donne accès à la même moyenne spatio-temporelle de B que celle ressentie par les neutrons.
- La source de courant pour la bobine principale : une source de courant ultra-stable (~ 0,01 ppm) est nécessaire pour garantir la stabilité du champ magnétique durant les 180 s du temps de précession.

Les trois premières tâches qui impliquent un important travail de conception mécanique au bureau d'études du SERM. Un design conceptuel du switch a été validé par la collaboration fin 2018 et les modifications du robot ont été aussi récemment approuvées. Un premier prototype de chambre de polarisation pour le magnétomètre Hg est en cours de test dans l'installation dédiée au LPSC (cf section 1.5.2). La source de courant quant à elle est développée le Service électronique. Deux prototypes de cartes contenant chacune deux sources de courant vont permettre de vérifier s'il est effectivement plus avantageux en termes de bruit de combiner plusieurs sources pour produire un courant donné. L'ensemble des développements devraient converger en 2019 pour être délivrés en 2020.

1.4.2 Métrologie du moment magnétique du ¹⁹⁹Hg

Dans le cadre de la thèse de Y. Kermaïdic, une installation dédiée à la magnétométrie Hg a été développée au LPSC en 2016. Initialement prévu pour permettre des études R&D en vue de la conception du co-magnétomètre de l'expérience n2EDM, son programme s'est désormais élargi à la métrologie du facteur gyromagnétique du mercure. Cette nouvelle activité est financée par une bourse ERC (starting grant) obtenue par G. Pignol. Il s'agit d'améliorer d'un ordre de grandeur la précision afin que celle-ci soit comparable à celle du neutron, ce qui permettra de conforter la compréhension des effets systématiques pour n2EDM.

Pour atteindre la précision requise de 0.1 ppm, la mesure utilisera la technique dite de comparaison d'horloges en faisant précesser dans le même volume deux espèces : le ^{199}Hg et ^3He dont le facteur gyromagnétique est connu à mieux que 0.1 ppm et qui servira de co-magnétomètre afin de mesurer et corriger les fluctuations du champ magnétique. Cette activité est conduite avec le support du SDI en particulier pour les aspects DAQ et la coordination technique de l'installation.

L'infrastructure nécessaire pour la partie ^{199}Hg est désormais finalisée :

- Laser UV à 254 nm

L'un des composants majeurs de l'expérience est le laser délivrant la lumière UV à 254 nm pour le pompage optique du mercure et la mesure de sa précession. Courant 2018, la réception du laser, sa prise en main et la mise en place du système de sécurité ont été réalisés. Plus récemment, l'étape critique d'asservissement en fréquence du laser sur la raie d'absorption saturée utilisée pour la mesure a été réalisée à l'aide d'une technique de FMS (Frequency Modulation Spectroscopy). Très prochainement, une mesure test de magnétométrie mercure sera réalisée dans cette configuration.

- Banc de remplissage des cellules

Suite à des améliorations du design du banc de remplissage qui permet maintenant d'obtenir une pression résiduelle de l'ordre de 10^{-8} mbar avant remplissage des cellules, il est possible de remplir des cellules de spectroscopie (pour l'asservissement du laser UV) et de magnétométrie (pour la mesure) avec une absorption contrôlable et des performances supérieures au cahier des charges pour réaliser la mesure.

L'installation des composants nécessaires au fonctionnement de la partie ^3He (laser, remplissage des cellules, décharge plasma) a débuté fin 2018 et sera réalisée en collaboration avec le CEA-LETI et l'ILL.

1.4.3 Étude des rebonds quantiques de neutrons ultra-froids : le projet GRANIT

Le projet GRANIT vise à la caractérisation d'un système quantique unique composé d'un neutron lié gravitationnellement à une surface réfléchissante. L'étude des niveaux d'énergies quantifiés de ce système (induction de transitions résonnantes entre niveaux grâce à un coupleur gravito-magnétique) ainsi que celle de l'extension spatiale des fonctions d'onde (atteignant la dizaine de micromètres et nécessitant des détecteurs sensibles à la position de résolution micrométrique) donne accès à des observables permettant une mesure simultanée des masses graves et inertielles du neutron. Les caractéristiques de ce système permettent également de contraindre l'existence de nouvelles forces à courte portée prédite notamment dans certains modèles d'énergies noires (caméléon, symétron).

Bilan de la période 2016-2018

Les équipes scientifique et technique du LPSC ont joué un rôle central dans la collaboration, en particulier pour la construction du spectromètre et les opérations au jour le jour sur l'expérience ainsi que pour l'analyse des données. Le dispositif expérimental est composé de deux instruments complexes couplés entre eux : d'une part une source super-thermale d'UCN qui convertit les neutrons froids issus du réacteur à haut flux de l'ILL par interaction résonnante dans l'hélium 4 superfluide ; d'autre part un spectromètre gravitationnel, constitué d'un ensemble de miroirs et de fentes permettant la préparation et la sélection d'états quantiques ainsi que l'induction des transitions. Le travail réalisé sur la période 2016-2018 a permis de :

- Fiabiliser et améliorer les performances cryogénique (10 jours de fonctionnement continu), thermique (installation d'un filtre IR dans l'extraction pour permettre une ouverture continue de la source) et neutronique (amélioration du temps de stockage grâce à de l'huile Fomblin) de la source de neutrons ultra-froids.
- Affiner les procédures d'alignement et de réglage du spectromètre. En particulier, après une première mise en œuvre du système, un nouveau support mécanique des miroirs a été construit afin de fiabiliser l'alignement des éléments optiques et supprimer les déplacements lors de la mise sous vide.
- Mettre en service le spectromètre. La transmission de l'absorbeur a été mesurée avec une précision suffisante pour étalonner le spectromètre et mettre en évidence la nature quantique de la position verticale des neutrons. Un premier résultat basé sur 20 h de données a permis de détecter un premier signal de transition résonnante $2 \rightarrow 1$, compatible en fréquence et en intensité avec le signal attendu.

- Développer de nouveaux détecteurs de neutrons ultra-froids. En collaboration avec l'équipe Plasma du LPSC (A. Bès, A. Lacoste), un procédé de dépôt de couches minces (20nm Ti/200nm ^{10}B /20nm Ni) a été mis au point afin de réaliser une couche de conversion des neutrons en particules chargées. Ce multicouche a été déposé directement sur un capteur CCD afin d'obtenir un détecteur d'UCN sensible à la position de résolution micrométrique.

Les services techniques du LPSC ont réalisé le support mécanique et l'électronique dédiés permettant l'utilisation de 8 capteurs de ce type au sein du spectromètre GRANIT. Un second projet réalisé dans le cadre de la thèse de Y. Xi vise à déposer ce multicouche sur un substrat de scintillateur.

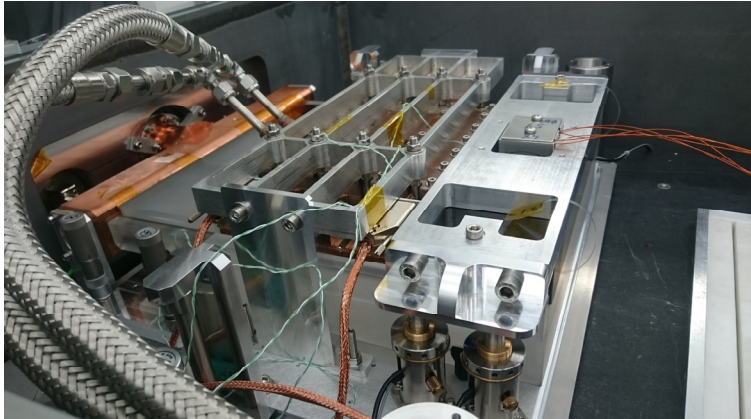


Fig. 2 : Vue de l'intérieur du spectromètre GRANIT en mode transition. Les UCN proviennent de la gauche et traversent successivement un volume de cuivre pour étaler le faisceau incident, une fente semi-diffusive pour sélectionner les neutrons sans vitesse verticale, le coupleur gravito-magnétique où la transition s'opère et, pour finir, la fente d'extraction pour sélectionner l'état fondamental.

1.4.4 Pour en savoir plus

Principales publications au cours de la période écoulée :

Search for Axionlike Dark Matter through Nuclear Spin Precession in Electric and Magnetic Fields

C. Abel *et al.*, Phys. Rev. X7, 041034 (2017).

Magnetic field uniformity in neutron electric dipole moment experiments

C. Abel *et al.*, to appear in Phys. Rev. A. [arXiv:1811.06085](https://arxiv.org/abs/1811.06085)

C2D8: An eight channel CCD readout electronics dedicated to low energy neutron detection

O. Bourrion *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. A880 (2018) 28-34. [arXiv:1710.08786](https://arxiv.org/abs/1710.08786)

Boron-10 conversion layer for ultra-cold neutron detection

B. Clément *et al.*, submitted to JINST [arXiv:1902.09232](https://arxiv.org/abs/1902.09232)

Thèses soutenues pendant la période écoulée : 1

Y. Kermaïdic, « La mesure du moment dipolaire électrique du neutron : Analyse de données et développements autour du co-magnétomètre Hg » - 7 octobre 2016 - Dir. D. Rebreyend

1.5 Équipe Structure Nucléaire

Équipe de recherche : membres permanents

M. Ramdhane, G. Simpson, G. Thiamova

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

N. Grachev (doctorant)

In the last four years our experimental and theoretical studies have focused on low-energy structure of nuclei in the mass region $A=100-150$ where many intriguing features still await an explanation. In particular, we have aimed at a better understanding of the evolution of the nuclear deformation along isotopic chains, i.e. as a function of the varying neutron and proton numbers. Our measurements in GANIL have confirmed a surprising result that for neutron-rich Kr isotopes no rapid onset of deformation around $N=60$ has been observed, in contrary to other neighbouring isotopic chains. With two protons less, selenium isotopes have been a subject of an extensive experimental and theoretical analysis of their gamma-soft, transitional character. Several complementary theoretical approaches have been employed to shed a light on the evolution of their nuclear deformation. Similar analysis is underway for Xe isotopes. On the other side of the investigated mass region, ^{152}Pr have been studied experimentally at ILL and analyzed theoretically within a semi-microscopic approach to determine key Nilsson orbitals playing a role in its ground-state and low-lying, isomeric configurations.

Note: After the departure of the team leader and the movement of the two other members for the “Reactor Physics” and the “Nuclear Physics and medical applications” teams, the “Nuclear structure” team has been dissolved, concluding the experimental involvements of the laboratory in this field.

1.5.1 Introduction

Les noyaux atomiques sont des objets quantiques contenant un nombre fini de protons (Z) et de neutrons (N). La forme du noyau reflète l'organisation interne de ses nucléons et évolue en général graduellement en fonction du nombre de protons et de neutrons. En de rares occasions, cette forme change brusquement si le noyau contient un nucléon de plus ou de moins. Ce changement de forme radical et soudain donne aux physiciens de précieux indices sur l'organisation et la force de liaison entre les neutrons et protons qui constituent le noyau. Pour cela, nous avons menée trois expériences sur différents noyaux pour essayer de comprendre au mieux le lien entre la déformation et l'interaction entre les nucléons dans le noyau.

1.5.2 ^{96}Kr ($Z=36$) - la limite basse en Z de l'île de déformation à $N=60$

Le Krypton-96 est obtenu lors d'une expérience menée au GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) avec un faisceau de ^{238}U à 6,2 MeV/u, d'intensité de 1 pA, sur une cible de ^9Be de 10 microns d'épaisseur. Dans ce travail l'avantage de la cinématique inverse utilisée est que les fragments de fission sont focalisés en direct à des vitesses élevées, ce qui permet une détection efficace et une identification isotopique dans le spectromètre. C'est l'association de deux spectromètres à la pointe de la technologie, AGATA (Advanced GAMMA-ray Tracking Array) et VAMOS (VARIABLE MOde magnetic Spectrometer), qui a mis en évidence la forme sphérique du Krypton-96, remarquable en comparaison de la forme très allongée du Rubidium-97, qui compte seulement un proton de plus.

Le spectre caractéristique de rayonnements gamma du Krypton-96 a permis de déduire la forme sphérique de ce noyau. Le rapport $R_{4/2} = E(4+)/E(2+)$ nouvellement obtenu et rapporté dans le présent travail montre que $R_{4/2}$ décroît continuellement jusqu'à $N = 60$, comme indiqué sur la Fig. 1(a). Cela prolonge les tendances opposées inattendues de $R_{4/2}$ et $B(E2; 2+1 \rightarrow 0+1)$ pour les isotopes riches en neutrons de Kr et confirme la non-observation d'un début soudain de collectivité à $N = 60$, comme le montre la Fig.1(b). Ce chiffre représente l'évolution du ratio $R_{4/2}$ en fonction du nombre de protons pour les isotones entre $N = 58$ et $N = 62$ et montre la transition nette entre Sr et Kr à $N = 60$. Les isotopes de Kr riches en neutrons semblent donc présenter un comportement différent de celui des chaînes isotopiques voisines. C'est une de ces rares transitions abruptes de formes qui a été identifiée entre le noyau de Rubidium-97 (37 protons, 60 neutrons), qui présente une forme très allongée, et le noyau de Krypton-96 (36 protons, 60 neutrons), dont la répartition sphérique des nucléons a été déduite lors de cette expérience. L'étude de ces exceptions est essentielle pour déterminer les caractéristiques

spécifiques de la force nucléaire qui assure la cohésion du noyau. Cette transition de forme, actuellement inexpliquée par les modèles théoriques modernes, aidera les physiciens à identifier les composants clés de la force nucléaire.

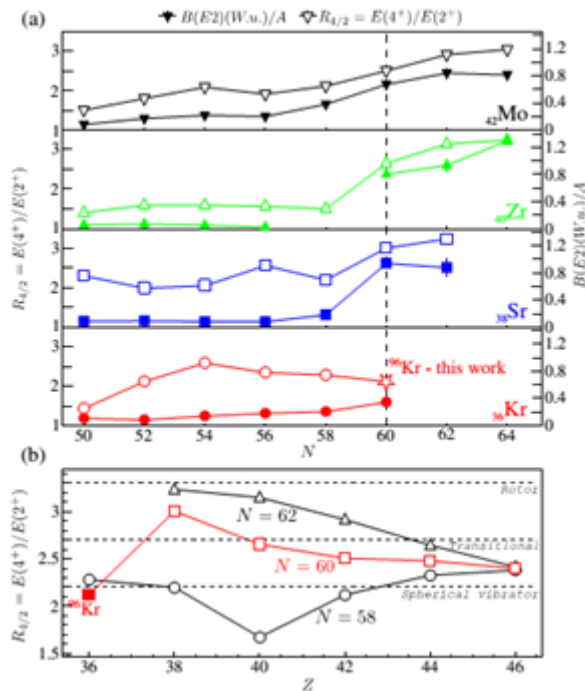


Fig.1. (a) Le rapport $R_{4/2}=E(4^+)/E(2^+)$ (symboles ouverts, axe gauche) des énergies des premiers états 4'et 2'excités et Probabilités de transition réduites exprimées en unités de Weisskopf (symboles solides, axe droit) dans les noyaux pairs, en fonction du nombre de neutrons (N). (b) Le rapport $R_{4/2}$ par rapport au nombre de protons Z pour N=58 à 62 chaînes isotoniques. Les lignes pointillées horizontales représentent une classification schématique entre les noyaux sphériques vibratoires et rotors.

1.5.3 Identification des états excités et de la collectivité dans ^{88}Se .

Une question fondamentale dans l'étude de structure nucléaire est de savoir comment décrire macroscopiquement le début du comportement collectif lorsqu'on s'éloigne des fermetures de couches en termes d'interactions entre des nucléons individuels occupant des états à une seule particule. L'apparition rapide de fortes déformations quadripolaires dans les états fondamentaux des isotopes Sr et Zr lorsqu'on passe de $N = 58$ à 60 neutrons a été étudié de manière intensive. On en sait cependant moins sur les noyaux riches en neutrons $A \sim 90$ au nord-est de ^{78}Ni qui peut posséder des états collectifs quand seulement quatre protons et deux neutrons de valence sont présents. Des preuves récentes ont été trouvées concernant le comportement collectif dans les isotopes de Se riches en neutrons, à savoir le début d'une bande gamma dans ^{86}Se [7,8] et le spin de l'état fondamental à $j-1$ de $(3/2^+)$ pour ^{87}Se . Le noyau suivant de la chaîne isotopique du Se ^{88}Se aurait une énergie anormalement élevée $(2+1)$ (886,2 keV), par rapport à la systématique des isotopes $N = 50-54$ Ge, Se et Kr. Toutefois, cette transition à 886,2 keV a récemment été réaffectée à ^{87}Se , laissant le schéma de niveau de ^{88}Se à présent inconnu.

L'expérience a été réalisée à l'Institut Laue-Langevin de Grenoble utilisant le dispositif de détecteurs de Ge EXILL. La cible ^{235}U était irradiée avec un flux de neutrons thermiques de $\sim 1 \times 10^8 \text{ n s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, ce qui donnait un taux de fission de $\sim 1 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$. La cible était placée au centre du dispositif EXILL, composé de huit Clover EXOGAM placés sur le plan perpendiculaire au faisceau de neutron. Le dispositif a été complété par six détecteurs GASP et deux détecteurs Clover du Spectromètre Lohengrin.

La technique d'analyse $\gamma-\gamma-\gamma$ pour les gammas prompts a permis de construire le premier schéma de niveaux de ^{88}Se illustré à la Fig.2. L'ordre des transitions dans la bande de yrast a été déterminé à partir de leurs intensités. L'évolution systématique des énergies expérimentales des états connus $(2+1)$ dans les isotopes $50 \leq N \leq 58$ de Ge, Se, Kr et Sr est présentée dans la Fig. 2 (a). Le niveau de ^{88}Se de 589,4 keV $(2+1)$ se situe entre ceux de ^{86}Ge et de ^{90}Kr . Sur la figure 3 (a), on peut voir que les valeurs $E(2+1)$ de chaque chaîne isotopique entre $N=52$ et 58 diminuent lorsque l'on passe de Sr à Ge, ce qui implique une augmentation de la déformation quadripolaire. Les

rapports d'énergie $E(4+1)/E(2+1)$ des noyaux Se et Kr, illustrés à la Fig.3 (b), augmentent de 2.1 à 2.3 pour $N = 52$, valeurs typiques des excitations vibrationnelles, de 2.5 à 2,6 à $N=54$, caractéristique des noyaux g-instables ou transitoires. Cette augmentation de la collectivité est confirmée par la hausse des valeurs de $B(E2; 2+1 \rightarrow 0+1)$ de ~ 10 à 20 W.u. (Unités de Weisskopf) lorsqu'on passe de 88 à 94Kr.

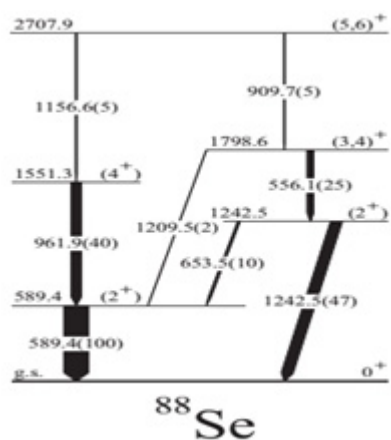


Fig.2. Schémas de niveaux de ^{88}Se obtenus dans le cadre de ce travail.

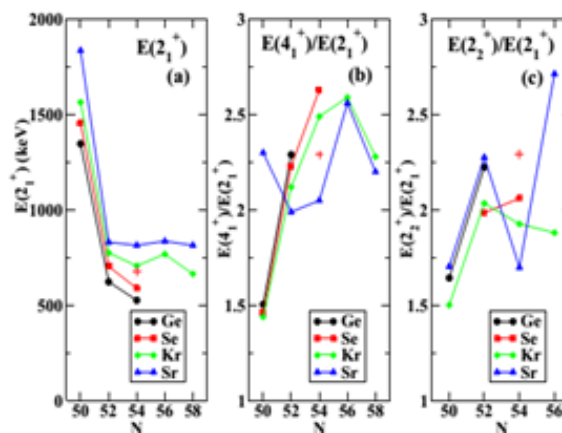


Fig.3. (a) Energies expérimentales des états (2^+_1) , (b) Rapports des énergies de niveau $E(4^+_1)/E(2^+_1)$ et (c) $E(2^+_2)/E(2^+_1)$ d'isotopes $50 \leq N \leq 58$ Ge, Se, Kr et Sr. Les valeurs calculées par le modèle de coque pour ^{88}Se sont mises en évidence par un symbole +.

Pour étudier plus en détail les propriétés du ^{88}Se , le schéma de niveau expérimental a été comparé aux résultats du calcul SM donné à la Fig. 4. L'espace de valence utilisé est composé des orbites π ($f_{5/2}$, $p_{3/2}$, $p_{1/2}$, $g_{9/2}$) et ν ($d_{5/2}$, $d_{3/2}$, $s_{1/2}$, $g_{7/2}$, $h_{11/2}$). Une interaction efficace récente pour cet espace modèle (Ni78-II) a été utilisée. Les caractéristiques générales du schéma de niveaux expérimental de ^{88}Se sont reproduites raisonnablement bien par le calcul, y compris les rapports $E(4+1)/E(2+1)$ et $E(2+2)/E(2+1)$, qui sont marqués par des croix sur les Figs.4 (b) et (c). Les calculs effectués aussi à l'aide du modèle ACM reproduisent également le schéma de désintégration de ^{88}Se et permettent de classer la structure de ce noyau dans la catégorie transitionnelle, conformément à la systématique. L'ACM prédit également que le ^{88}Se a une déformation β statique non nulle et est γ -instable.

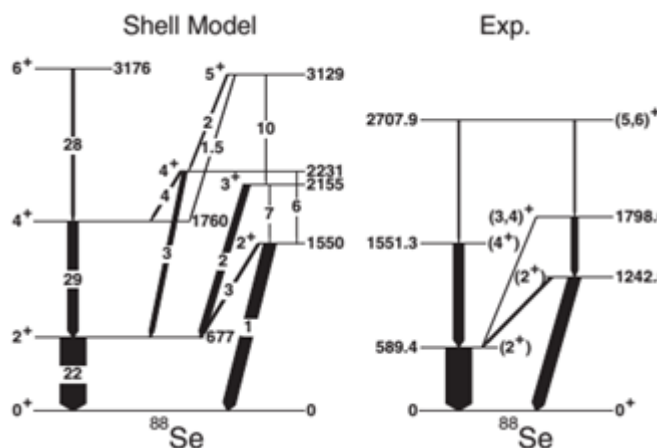


Fig.4. Énergies calculées et expérimentales des états excités dans ^{88}Se .

Le caractère transitoire des isotopes $^{86,88}\text{Se}$ a aussi été étudié avec différentes types d'interaction de Skyrme (Fig. 5.). Ces calculs confirment que les deux isotopes du sélénium possèdent une structure typique pour les noyaux transitoires, avec un potentiel très mou en gamma.

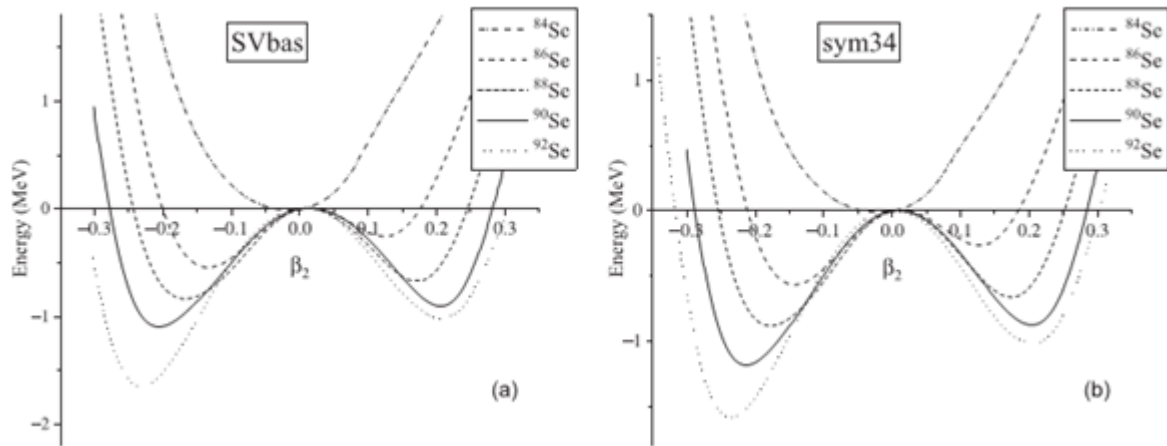


Fig.5. Énergie potentielle de surface en fonction de la déformation β_2 pour la chaîne d'isotopes $^{84-92}\text{Se}$

1.5.4 Description des états de basse énergie de ^{152}Pr par le modèle quasiparticule phonon

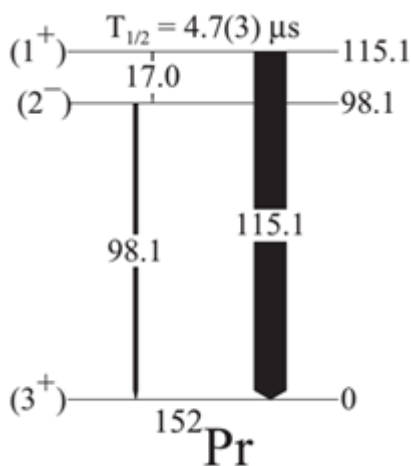


Fig.6. Schéma de niveau partiel de ^{152}Pr obtenu dans ce travail.

Les noyaux de la région riche en neutrons $A=150$ possèdent de nombreuses caractéristiques intéressantes, y compris un changement rapide de la forme de l'état fondamental du sphérique à prolate pour $N = 88-90$, de forts corrélations octupolaires, des bandes de rotation à moments d'inertie identiques, et des états isomères couvrant une large plage de durée de vie. Les corrélations octupolaires dans les noyaux atomiques sont une manifestation de la brisure de la symétrie de réflexion dans le champ moyen nucléaire. Ces modes peuvent être à la fois statiques et dynamiques et résultent du couplage de $Dl = Dl = 3$ des orbitales se trouvant près de la surface de Fermi. Dans le présent travail, nous avons mesuré les rayons γ retardés et des électrons de conversion à partir d'un état isomérique dans ^{152}Pr et la structure des états retardés a été interprétée en utilisant le modèle quasi particule - phonon ainsi que le modèle particule-rotor (QPM + PRM).

La spectroscopie par g -retardés et électrons de conversion des fragments de fission de $A=152$ a été réalisée au spectromètre de masse Lohengrin du réacteur à haut flux de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble. Des noyaux riches en neutrons $A = 152$ ont été produits par fission induite par des neutrons thermiques sur une cible de ^{241}Am , de $0,870 \text{ mg/cm}^2$, $7 \times 0,5 \text{ cm}^2$.

La combinaison de toutes les informations a permis d'établir le schéma de niveaux partie illustré à la Fig.6. La demi-vie d'une valeur de $4.7(3) \text{ ms}$ de l'état isomères à 115.1 keV a été déterminées et les intensités relatives des gammas retardés mesurés avec les détecteurs Ge et Si(Li) ont été évaluées.

En collaboration avec le groupe de structure nucléaire de Technical University of Ostrava (République Tchèque), le Modèle Quasi-Particule Phonon (QPM) a été utilisé pour étudier les propriétés des noyaux riches en neutrons de la région de masse $A= 150$, où les modes octupolaires sont présents. L'évolution des modes octupolaires en fonction du nombre de nucléons et de la déformation dans cette région n'est pas encore claire. En confrontant les résultats expérimentaux obtenus récemment avec les prédictions des modèles nous pouvons mieux

comprendre l'évolution de ces modes ainsi que le rôle clé joué par certaines orbitales nucléaires. Une comparaison avec les données de désintégration β existantes et les résultats des calculs QPM a permis d'établir la configuration et le spin de l'état fondamental comme $(\pi 3/2 [541] \nu 3 / 2 [521]) 3^+$. Une comparaison similaire entre les données expérimentales et les calculs QPM a assigné l'état isomérique à $(\pi 3/2 [422] \nu 5/2 [642]) 1^+$ et le niveau à 98,1 keV à $(\pi 1/2 [420] \nu 3/2 [521]) 2^-$.

1.5.5 Conclusion : la clôture de l'équipe

Avec le départ du responsable d'équipe G. Simpson au 1^{er} aout 2018, la mobilité de M. Ramdhane dans l'équipe de Physique des réacteurs et de G. Thiamova dans l'équipe Physique nucléaire et applications médicales, l'équipe « Structure nucléaire » du LPSC a été fermée. Seule une activité théorique menée par G. Thiamova se poursuivra au laboratoire. Ce fait marque la fin des activités de physique expérimentale dans le domaine de la « structure nucléaire » au laboratoire.

1.5.6 Pour en savoir plus

Principales publications durant la période écoulée :

Identification of excited states and collectivity in 88Se

N. Gratchev, G. S. Simpson, G. Thiamova, M. Ramdhane, K. Sieja, A. Blanc, M. Jentschel, U. Köster, P. Mutti, T. Soldner, G. de France, C. A. Ur, and W. Urban, PHYSICAL REVIEW C 95, 051302(R) (2017).

Macroscopic and microscopic description of low-energy collective states in 86,88Se

G. Thiamova, Y. Grachev, M. Abolghasem, P. Alexa, P.-G. Reinhard, T. R. Rodríguez and G. S. Simpson PHYSICAL REVIEW C98, 064304 (2018).

Evolution of the position of single-particle levels in the neutron-rich cerium and neodymium isotopes

M. Abolghasem, P. Alexa, R. Uhlir et G. Thiamova, Submitted to Acta Physica Polonica

Quasiparticle phonon model description of low-energy states in ¹⁵²Pr

P. Alexa, M. Ramdhane, G. Thiamova, G. S. Simpson, H. R. Faust, J. Genevey, U. Köster, T. Materna, R. Orlandi, J. A. Pinston, A. Scherillo, and Z. Hons, PHYSICAL REVIEW C 97, 034327 (2018)

Thèse soutenue durant la période écoulée : 1

I. Grachev- Étude expérimentale et théorique de la structure nucléaire des isotopes de sélénium riches en neutrons - 13 novembre 2017 - Dir. G. Thiamova