

Activités de recherche

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.

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, 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. Fournissant une énergie dans le centre de masse jamais atteinte auparavant, le LHC peut nous permettre d'explorer cet « Au delà du modèle standard » en recherchant la signature de nouvelles particules qui pourraient être produites dans les collisions proton-proton.

L'équipe ATLAS du LPSC se concentre donc sur ces recherches, notamment dans les états finaux comportant des quarks top ou des photons, bénéficiant de l'expertise du groupe en calorimétrie électromagnétique. Certains résultats utilisant les données à 13 TeV du LHC accumulées en 2015 ont déjà été soumis pour publication : un excès entrevu dans le canal diphoton sera à surveiller dans l'année qui suit. Le groupe théorique du LPSC est également impliqué dans cette recherche de nouvelle physique 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 terme de modèles de nouvelle physique.

Il est également impératif de planifier le futur de la recherche dans ce domaine, c'est pourquoi le LPSC est impliqué dans des activités couvrant les développements nécessaires à court, moyen et long terme. Ainsi, l'équipe ATLAS s'implique dans l'amélioration du système de déclenchement du calorimètre pour le run 3 du LHC ainsi que dans la conception du nouveau trajectomètre qui remplacera celui existant pour la phase à haute luminosité du LHC. En parallèle, l'équipe des futurs collisionneurs étudie également la faisabilité d'un trajectomètre basé sur des diamants monocristallins pour des environnements de radiation intense. Cette équipe se concentre également 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.

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 : la mesure du moment dipolaire électrique du neutron permettant de sonder les différences entre matière et anti-matière (expérience nEDM et projet n2EDM), l'expérience GRANIT permettant entre autres d'étudier la gravité newtonienne dans le contexte de la mécanique quantique, ainsi que la recherche de dépolarisation d'un gaz d'hélium 3 polarisé qui serait induite par une interaction au-delà du Modèle Standard.

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 maintenant de l'information que ceux-ci apportent à l'analyse. 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 également 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.

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 développe et teste différents modèles théoriques afin de mieux en comprendre la structure.

Expérience ATLAS au LHC

S. Berlendis, C. Camincher, J. Collot, S. Crépe-Renaudin, P.-A. Delsart, C. Gabaldon, M.-H. Genest, J. Gradin, J.-Y. Hostachy, F. Ledroit-Guillon, A. Lleres, A. Lucotte, A. Madsen, F. Malek, T. Meideck, C. Monini, E. Petit, J. Stark, B. Trocmé, M. Wu
D. Grondin, J. Menu, S. Roudier, L. Vivargent (Service Études et Réalisations Mécaniques)
S. Albrand, C. Biscarat, C. Gondrand, J. Fulachier, F. Lambert, J. Odier (Service Informatique)
J. Bouvier, D. Dzahini, L. Eraud, L. Gallin-Martel, F. Rarbi, D. Tourres, C. Vescovi, M. Zeloufi (Service Électronique)
J.-F. Muraz (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. ATLAS took data from 2009 to 2012 at centre of mass energies of 7 TeV and 8 TeV, which lead to the discovery of the Higgs boson. In 2015, after a two-year shutdown, data taking resumed at the energy of 13 TeV. The LPSC physicists analyse these data in two main directions: top quark physics and direct searches for new particles beyond the Standard Model. In parallel, they are also preparing upgrades of the detector in view of future data taking conditions with higher luminosities.

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 à terme 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 de 2009 à 2012 (run 1), à des énergies dans le centre de masse de 7 et 8 TeV. Après un long arrêt du collisionneur en 2013-2014, la deuxième période de prise de données (run 2) a commencé en 2015 à l'énergie quasi nominale de 13 TeV. Les objectifs scientifiques de l'expérience sont la mise en évidence et l'étude des constituants élémentaires de la matière et de leurs interactions. Le Modèle Standard de la physique des particules décrit notre compréhension actuelle de ces éléments. Le premier objectif a été atteint dès juillet 2012 lorsque les collaborations ATLAS et CMS ont annoncé simultanément la découverte d'un boson de Higgs à une masse d'environ 125 GeV. Ce dernier, associé au processus qui permet aux particules d'acquérir une masse, était la dernière particule du Modèle Standard non encore observée. Le Modèle Standard est donc confirmé une fois de plus aux échelles d'énergie accessibles aux expériences passées et en cours. Il laisse cependant un grand nombre de questions encore ouvertes, de « Pourquoi le boson de Higgs est-il si léger ? » à « Qu'est-ce que la matière sombre qui constitue un quart de l'univers ? ». Il est donc nécessaire de rechercher de la nouvelle physique, au-delà du Modèle Standard, pour répondre à ces interrogations.

Le groupe ATLAS du LPSC appartient depuis qu'elle s'est formée à la collaboration ATLAS, aujourd'hui forte de plusieurs milliers de physiciens venant d'une quarantaine de pays. Il a initialement participé à la conception et à la construction d'une partie du calorimètre électromagnétique. Cette implication se poursuit par la certification de la qualité des données du calorimètre. Le LPSC contribue également aux améliorations du détecteur dans deux domaines. Premièrement nous avons développé un composant électronique pour l'amélioration du système de déclenchement du calorimètre. Celle-ci est destinée à lui permettre de conserver ses performances lorsque la luminosité instantanée atteindra deux fois la luminosité nominale, c'est-à-dire vers 2018 lors de la « phase I de l'upgrade » du LHC. Deuxièmement, après avoir contribué à l'installation d'une couche supplémentaire de détecteurs à pixels (IBL) dans le trajectomètre pendant l'arrêt long de 2013-2014, nous sommes maintenant engagés dans le remplacement complet du détecteur à pixels. Ce travail est effectué en vue de la phase II de l'upgrade du LHC (HL-LHC), qui verra la luminosité augmenter de nouveau, de l'ordre d'un facteur cinq par rapport à la luminosité nominale. Ces activités sont décrites dans la première partie de ce chapitre.

Les activités des équipes 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. Elles sont décrites dans la partie suivante de ce chapitre.

Finalement, le groupe du LPSC s'investit dans les analyses de physique proprement dites. Deux thématiques principales sont étudiées : la physique du quark top et la recherche de nouvelles particules (boson de Higgs chargé, excitations de Kaluza-Klein du graviton, bosons de jauge lourds, particules supersymétriques). Ce travail d'analyse est décrit dans les dernières parties de ce chapitre.

Activités instrumentales

Calorimètre électromagnétique

Depuis 2009, le groupe du LPSC est responsable de la certification des données du calorimètre à argon liquide, instrument crucial impliqué dans la détection des électrons, photons et jets hadroniques. Cette responsabilité consiste en premier lieu à s'assurer que le calorimètre fonctionne comme attendu et le cas échéant traiter les problèmes observés. Cette tâche doit être faite dans un temps extrêmement court (moins de 48 heures après la prise de données) afin de ne pas encombrer la grille de calcul. Depuis la première année de prises de données, la fraction de données validées n'a cessé d'augmenter en dépit de l'apparition de plusieurs problèmes liés à l'augmentation constante de la luminosité instantanée et de l'énergie. En 2015, ce sont plus de 99,4% des données du calorimètre qui ont été validées.

En complément de cette implication forte sur la prise de données présente, le groupe du LPSC a été impliqué dans l'amélioration du système de déclenchement du calorimètre, qui est prévue à l'horizon 2018. Ce projet nécessite la construction de nouvelles cartes d'électronique embarquée comportant un convertisseur analogique-numérique de haute performance (40 millions d'échantillons/s, très basse consommation, haute résistance aux radiations et une gamme dynamique de 12 bits). Fort d'une expérience conséquente en la matière, le groupe de microélectronique a proposé une solution innovante en technologie IBM-CMOS 130 nm. En dépit de performances prometteuses, la collaboration ATLAS a préféré choisir un autre prototype de convertisseur conçu par un laboratoire américain. Si les performances de ce dernier étaient inférieures à la solution du LPSC, il s'est révélé plus abouti au moment du choix final et la collaboration ATLAS a préféré limiter les risques intrinsèques à tout développement de pointe de ce type.

Trajectomètre interne

Quel que soit l'apport scientifique du programme LHC dans les années à venir, celui-ci restera le seul collisionneur de haute énergie en fonctionnement dans le monde lors des deux prochaines décennies. Ce constat a été confirmé par le conseil du CERN ainsi que l'ECFA (European Committee for Future Accelerators) dans leur déclaration commune, faisant de l'exploitation optimale du LHC, en y incluant sa phase à haute luminosité (HL-LHC), la toute première priorité de la physique des particules européenne jusqu'en 2030 au moins. L'objectif du HL-LHC sera d'accroître la luminosité instantanée de la machine (jusqu'à $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) afin de décupler la quantité de collisions proton-proton enregistrées à une énergie de 14 TeV dans le centre de masse (3000 fb^{-1} au lieu de 300 fb^{-1} par expérience). Le programme envisagé se concentrera sur la mesure précise des propriétés du boson de Higgs, y compris de son auto-couplage, sur des tests additionnels du Modèle Standard et sur la recherche de nouvelles particules.

En s'appuyant sur son expérience acquise lors de sa participation à la construction et l'installation d'une quatrième couche de pixels dans le trajectomètre d'ATLAS au cours des années 2009 à 2014, le groupe ATLAS du LPSC a décidé de s'engager dans le projet ITk (Internal Tracker). Ce projet vise la construction et l'installation d'un nouveau trajectomètre entièrement constitué de capteurs en silicium pour une installation en 2025 dans ATLAS. En effet, le trajectomètre actuel ne pourra pas soutenir l'accroissement des doses de rayonnement ni même de la multiplicité des particules prévues au HL-LHC. Le LPSC s'est investi aux côtés du LAPP¹, du LPNHE² et du CPPM³ afin d'étudier la réalisation, les performances et le potentiel scientifique d'une géométrie innovante de détecteur à pixels, dite alpine. Dans cette nouvelle configuration, les capteurs de silicium sont inclinés afin de se rapprocher de l'incidence normale aux trajectoires des particules. Cette solution permettrait de réduire d'un facteur deux la surface nécessaire de capteurs de silicium, et de simplifier l'acheminement des câbles, des fluides et des autres services. La configuration alpine est une alternative à l'agencement classique d'un détecteur à pixels (cylindres concentriques centraux plus disques parallèles latéraux) qui constitue l'option par défaut étudiée par ATLAS. Si ses avantages techniques sont confirmés en s'appuyant sur la construction d'un prototype, et si cela conduit à un gain en terme de performances pour la physique, elle pourrait être retenue fin 2017 au moment de la rédaction du rapport technique détaillé (TDR) pour la construction du détecteur final. Le groupe ATLAS souhaite participer à la construction du nouveau détecteur à pixels d'ATLAS quelque soit la solution finalement retenue. Une partie importante des compétences scientifiques et techniques acquises lors de la phase de R&D pourra alors être mobilisée afin de participer au projet final.

¹ Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules

² Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies de Paris

³ Centre de Physique des Particules de Marseille

Dans ce projet, le LPSC s'est pour le moment concentré sur la réalisation de mini-échelles avec des « montagnes » de mousse de carbone destinées à incliner les capteurs (Fig. 1). Ces prototypes permettent de tester le comportement thermique des capteurs, qui constitue l'une des principales clés technologiques de la faisabilité de cette configuration.

Ce projet est actuellement soutenu par un programme AGIR (20 k€) de l'université Grenoble Alpes, et par une aide substantielle du labex ENIGMASS (150 k€).

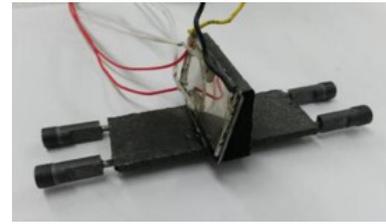


Fig. 1 : Mini-échelle prototype équipée d'une montagne et d'une « chauffe-rette » en silicium simulant un capteur.

Traitement des données

Chaque année, ATLAS enregistre les produits d'une dizaine de milliards de collisions appelés événements ainsi qu'une grande quantité de données d'étalonnage. En parallèle, les physiciens simulent des collisions et l'interaction des particules dans les détecteurs pour pouvoir les confronter aux données réelles. Ces données sont reconstruites pour reconstituer, à partir des signaux des détecteurs, les particules produites et leurs caractéristiques. Finalement ces données sont analysées pour produire les mesures et recherches désirées.

L'ensemble du traitement des données nécessite donc un système complexe de logiciels, bases de données et serveurs de calcul et de stockage auquel le LPSC contribue activement.

AMI⁴, un environnement logiciel pour les métadonnées

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

AMI Dataset Discovery : sélection de données d'analyse par critères de physique. Ce moteur de recherche générique est le point d'entrée des physiciens de la collaboration afin de consulter les données disponibles pour l'analyse.

AMI-Tags : gestion des paramètres de configuration du logiciel d'analyse de la collaboration ATLAS. Ce service est la référence pour la configuration de toutes les tâches de production et d'analyse de données de la collaboration. Il doit ainsi répondre à de fortes contraintes de disponibilité.

Tag Collector : gestion de paquets et de releases du logiciel hors-ligne de la collaboration ATLAS. L'enjeu principal est de faciliter la politique de coordination et de développement du logiciel d'analyse. L'outil permet aux coordinateurs d'indiquer quelles versions de quels paquets doivent être intégrées dans quelle version globale (release).

Ces deux dernières années ont vu l'apparition de nouvelles applications en réponse à des besoins exprimés par la collaboration ATLAS ainsi qu'une refonte globale du cœur de l'environnement AMI afin d'améliorer la qualité et la mise en œuvre des services. Signalons en particulier une interface en collaboration avec le moteur de recherche Glance d'ATLAS pour lier des données d'analyse à des publications scientifiques. Il y a eu en outre la mise en production d'une nouvelle version majeure de notre client python, pyAMI. Le client utilise désormais un protocole de communication beaucoup plus léger, ce qui améliore ses performances et facilite son utilisation dans les tâches de production de la collaboration. Enfin, une grande priorité a été mise sur l'adaptation de l'infrastructure et sur les processus de déploiement des services afin de répondre aux attentes de la collaboration. Les services AMI sont déployés avec l'outil d'intégration continue Jenkins et s'orientent de plus en plus vers de l'intégration continue. Ils utilisent désormais des ressources « Cloud » du CC-IN2P3, et la collaboration ATLAS nous a demandé d'étudier la possibilité de déployer une instance répliquée de nos services au CERN en utilisant les mêmes technologies.

Plus de détails concernant les améliorations de technologie et d'infrastructure se trouvent dans le chapitre *Service Informatique* de ce rapport.

Traitement distribué des données

Pour traiter les données enregistrées et simulées, les expériences LHC utilisent une grille de calcul et de stockage (World LHC Computing Grid) qui consiste en un ensemble d'environ 150 sites répartis dans

4 ATLAS Metadata Interface

le monde, liés entre eux par le réseau Internet. Chaque site propose aux expériences des ressources de calcul et de stockage. En 2015, ATLAS a stocké quelques 80 Po de données et utilisé un peu moins de 2000 kHS06 ce qui représente quelques 200 000 tâches effectuées en continu et en parallèle. L'ensemble est géré par un ensemble de logiciels, intergiciels et infrastructures qui sont de la responsabilité soit de WLCG, soit des expériences LHC.

Le groupe ATLAS du LPSC a participé à cet effort de façon importante puisque le LPSC héberge un des sites de WLCG (voir *Plateformes technologiques*). Une personne du groupe est la responsable scientifique de cet équipement qui représente environ 10% des ressources françaises de ce type (sites de niveau Tier-2). Par ailleurs, le groupe est investi dans la gestion et la coordination des efforts du traitement distribué des données tant au niveau français qu'au niveau de la collaboration ATLAS. De plus, en 2015, une nouvelle équipe a été créée au sein d'ATLAS pour mieux coordonner les différentes personnes qui travaillent au bon fonctionnement de ces systèmes et ainsi alléger le travail des différents experts. Un membre du groupe a mis en place et coordonne cette nouvelle équipe.

Physique avec le quark top

Le quark top est la particule la plus massive du Modèle Standard, il se couple fortement au boson de Higgs et joue un rôle particulier dans la brisure de symétrie électrofaible ainsi que dans de nombreux modèles de nouvelle physique conçus pour pallier les insuffisances du Modèle Standard. Le groupe d'ATLAS du LPSC est très investi dans la recherche de nouvelle physique avec des quarks top dans l'état final, et dans le développement des outils de reconstruction spécifiques à cet objet, en particulier la sous-structure des jets.

Reconstruction et identification des particules hadroniques

Un jet hadronique est produit à partir des quarks et gluons via des phénomènes de fragmentation et d'hadronisation initiés par les émissions de partons. Ces jets sont abondamment produits dans les collisions de protons, et sont les produits de désintégration principaux du quark top. Ils concernent néanmoins toutes les analyses dans ATLAS : bruits de fond, caractérisation d'un état final ou objets d'étude en soi. Le groupe du LPSC est fortement impliqué dans la reconstruction expérimentale de ces objets. Du point de vue technique, il a contribué à la maintenance et au support des logiciels dédiés à ces objets expérimentaux.

Le groupe prend aussi une part significative aux études sur les sous-structures des jets, en particulier dans le régime des très hautes impulsions. Ce régime est atteint en présence d'une (hypothétique) particule très massive : lors de sa désintégration, plusieurs jets se retrouvent alors collimatés en un seul gros jet (Fig. 2). Il devient alors nécessaire de caractériser les sous structures du gros jet afin de le distinguer des événements de bruit de fond QCD. Le groupe s'est attaché au cas des désintégrations hadroniques du quark top dans ce régime et a réalisé l'étude menant aux « pré-recommandations » d'ATLAS concernant la caractérisation de tels quarks top.



Fig. 2 : Topologie des jets issus d'un quark top de basse (gauche) et de très haute (droite) impulsion transverse.

Physique du quark top célibataire

Des mesures de précision des propriétés de production et de décroissance de quarks top célibataires sont actuellement menées par la collaboration ATLAS. Un des principaux objectifs de ces mesures de précision est la recherche de signes de nouvelle physique via l'observation de déviations par rapport aux prédictions du Modèle Standard. Dans les collisionneurs hadroniques, les quarks top célibataires sont produits par interaction faible, cette production impliquant un vertex Wtb .

Trois états finals, se différenciant par la virtualité du boson W échangé, contribuent à la production électrofaible de quarks top : la voie t ($Q^2 < 0$), la voie s ($Q^2 > 0$) et la production associée avec un boson W réel (voie Wt). Quel que soit son mode de production, le quark top décroît par interaction faible en un boson W et un quark de type down, lequel est de façon prédominante un quark b selon les prédictions du Modèle Standard. Le boson W peut décroître par la suite soit leptoniquement en un lepton chargé et un neutrino, soit hadroniquement en deux quarks légers. Les trois modes de production électrofaible de quark top, ainsi que sa désintégration, sont susceptibles d'être sensibles à des manifestations différentes de nouvelle physique (couplages Wtb anormaux, existence de nouveaux bosons vecteur ou scalaire...). Les activités du groupe du LPSC dans ce domaine portent sur la mesure de la section efficace de la production associée Wt, la recherche de la production en voie s et les mesures de polarisation du quark top et du boson W de décroissance produits en voie t.

La section efficace pour la production de top quark célibataire en association avec un boson W a été mesurée à l'énergie dans le centre de masse de 8 TeV à partir des données, correspondant à une luminosité intégrée de $20,3 \text{ fb}^{-1}$, collectées par l'expérience ATLAS en 2012. Un lot d'événements contenant deux leptons chargés (de type électron ou muon) et un jet central étiqueté b a été analysé en utilisant des arbres de décision combinant un certain nombre de variables discriminantes afin de séparer les événements Wt des événements venant du bruit de fond. La section efficace inclusive extraite de l'ajustement de la distribution de la réponse du classificateur multi-varié est de $23,0 \pm 3,9 \text{ pb}$; elle est en accord avec la prédiction du Modèle Standard. Ce résultat a été utilisé pour extraire une valeur de $1,01 \pm 0,10$ pour l'élément $|V_{tb}|$ de la matrice CKM, valeur correspondant à une limite inférieure de 0,80 pour un niveau de confiance à 95%. L'analyse et la publication de ces différents résultats ont été entièrement menées par des membres du groupe ATLAS du LPSC.

Une recherche de la production de quarks top célibataires en voie s a également été menée et publiée par des membres du groupe du LPSC, à partir des données ATLAS enregistrées en 2012. Un classificateur multi-varié, basé sur des arbres de décision et optimisé afin de discriminer les événements recherchés des contributions des principaux processus de bruit de fond, a été appliqué sur un lot d'événements, chacun d'eux contenant un lepton chargé (de type électron ou muon) et deux jets étiquetés b, émis en association avec un grand moment transverse manquant. L'ajustement de la distribution de la réponse du classificateur a permis d'extraire une limite supérieure sur la section efficace de production en voie s de $14,6 \text{ pb}$ pour un niveau de confiance de 95% (Fig. 3). Cet ajustement donne également une valeur pour la section efficace de $5,0 \pm 4,3 \text{ pb}$, valeur en accord avec la prédiction du Modèle Standard.

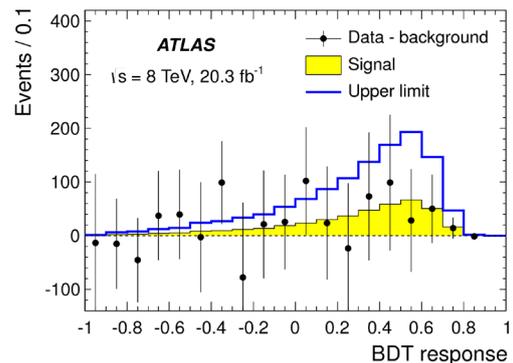


Fig. 3 : Distributions observée (points) et prédite (histogramme jaune) de la réponse des arbres de décision après soustraction des événements du bruit de fond. L'histogramme en bleu représente la distribution du signal normalisée à la limite supérieure extraite pour la section efficace.

La recherche de la production de quarks top célibataires en voie s a été le sujet d'une thèse de doctorat soutenue au LPSC en septembre 2014 par C. Monini.

Les quarks top produits par interaction électrofaible sont très fortement polarisés et des mesures de précision sur les différentes observables de polarisation associées au quark top ou au boson W de décroissance devraient permettre de mettre des contraintes fortes sur de potentiels couplages Wtb non-standard. Des membres du groupe ATLAS du LPSC sont engagés sur ces mesures de polarisation dans la production en voie t de quarks top célibataires. Un travail important a été mené afin de développer et valider les méthodes d'analyse (procédures de convolution ou de déconvolution de distributions angulaires variées à partir desquelles les observables de polarisation sont mesurées). Les résultats obtenus à 8 TeV à partir des $20,3 \text{ fb}^{-1}$ de données collectées en 2012 sont en cours d'approbation et devraient être publiés d'ici la fin de l'année 2016. Les résultats préliminaires montrent un bon accord avec les prédictions du Modèle Standard de l'ensemble des observables de polarisation étudiées.

Recherche d'un boson de Higgs chargé

Après la découverte d'un boson de Higgs neutre et léger, la question de l'existence d'autres particules scalaires fondamentales, mais de masse plus élevée, pouvant être neutres ou chargées se pose. De telles particules apparaissent systématiquement dans toutes les extensions du Modèle Standard.

En collaboration avec l'université d'Uppsala en Suède, le groupe participe depuis 2012 à la recherche d'un boson de Higgs chargé sur l'expérience ATLAS. Dans un premier temps cette activité s'est concentrée sur l'hypothèse d'un boson de Higgs chargé plutôt léger, dont la masse serait inférieure à celle du quark top (173 GeV). Cette étude a été menée dans plusieurs canaux impliquant au moins un lepton chargé afin de réduire le bruit de fond hadronique. Dans un deuxième temps, cette recherche a été étendue au cas d'un boson de Higgs chargé lourd, dont la masse serait cette fois supérieure à celle du quark top. Ici le boson de Higgs chargé serait produit en association avec un quark top unique ou, à plus haute masse encore, par le biais de la fusion de deux quarks (canal s de production). La mise en œuvre de techniques multivariées d'extraction du signal et d'estimation des bruits de fond appliquées aux données recueillies à 8 TeV, nous a conduits à explorer plusieurs canaux potentiels (tb et tv) de désintégration du boson de Higgs chargé. Globalement ces recherches ont permis de placer des limites sur l'existence d'un boson de Higgs chargé. Ainsi la probabilité de désintégration d'un quark top en un quark b et un boson de Higgs chargé léger, lequel se désintégrerait en un lepton tau et un neutrino doit être inférieure, à 95% de degré de confiance, à 1,1% (0,3%) si la masse de ce boson est de 80 GeV (160 GeV). Par ailleurs, la section efficace de production d'un boson de Higgs chargé en association avec un quark top doit être inférieure, à 8 pb (0,5 pb) si la masse de ce boson est de 200 GeV (600 GeV). Enfin, dans l'hypothèse où ce boson pourrait être produit par la fusion d'une paire de quarks, sa section efficace de production ne pourrait pas dépasser 15 pb (0,4 pb) si sa masse est de 400 GeV (3 TeV).

Cette activité a donné lieu à deux thèses en cotutelle avec l'université d'Uppsala, l'une soutenue en 2015 (A. Madsen) et l'autre toujours en cours (J. Gradin). Ces recherches sont soutenues par un programme international de collaboration scientifique (PICS) et ont fait l'objet d'un financement octroyé par l'ambassade de France en Suède dans le cadre du programme Ömse en 2015.

Recherche de la 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 signe opposé ($t\bar{t}$). Dans le cadre de Modèle Standard, la production de paires de quarks top de même charge ($tt, \bar{t}\bar{t}$) 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, la production de paires de quarks top de même signe est possible dans le cadre du modèle minimal de supersymétrie ou d'un modèle de supersymétrie supposant la violation de la R-parité.

La recherche au LHC de la production de paires de quarks top de même signe nécessite tout d'abord le développement de modèles de supersymétrie permettant de générer des échantillons d'événements pouvant être confrontés aux données de collisions enregistrées par le détecteur ATLAS. Des études ont été menées par des membres des groupes ATLAS et physique théorique du LPSC afin de développer et valider un générateur Monte Carlo dans le cadre du modèle de supersymétrie avec R-parité violée.

La recherche de la production de quarks top de même charge requiert également une caractérisation précise des événements de bruit de fond contaminant les lots d'événements satisfaisant les critères de sélection des événements recherchés (état final constitué de deux leptons chargés de même charge, au moins un jet étiqueté b et de l'énergie transverse manquante). Dans ce but, des études ont été menées afin de caractériser les contributions dues aux processus du Modèle Standard conduisant au même état final (via des simulations Monte Carlo) et les contributions dues à des problèmes instrumentaux (mauvaise identification de la charge des leptons dans les données).

Les développements théoriques et les études expérimentales faites dans le cadre de cette recherche de la production de paires de quarks top de même signe sont le sujet d'une thèse de doctorat (S. Berlendis) menée au sein du groupe ATLAS du LPSC en collaboration avec le groupe de physique théorique.

Recherche de production résonnante de nouvelles particules se désintégrant en une paire de top

L'énergie et la fréquence des collisions du LHC permettent de chercher de nouvelles particules qui peuvent être très massives (plusieurs TeV) et rarement produites (section efficace de production de l'ordre de 0,1 pb). Ceci combiné au rôle particulier du quark top fait que la recherche de nouvelles particules se désintégrant en paire de quarks top est très prometteuse.

Les collisions de protons du LHC peuvent produire des paires de top ou d'autres particules imitant cette signature via des processus décrits par le Modèle Standard. L'analyse consiste à sélectionner parmi les collisions enregistrées par l'expérience celles dont la signature correspond à la présence de deux quarks top, l'un se désintégrant leptoniquement et l'autre hadroniquement, ce qui permet d'optimiser le rapport entre un éventuel signal et les bruits de fond. Si une particule se désintègre en deux quarks top alors la masse invariante de ceux-ci correspond à la masse de la particule initiale. L'analyse consiste donc à reconstruire la masse invariante des quarks top sélectionnés. La distribution de cette variable est un continuum si on ne considère que les quarks top produits par les processus du Modèle Standard. Une nouvelle particule apparaîtrait alors comme une résonance au dessus de ce continuum.

Une des difficultés de l'analyse est que les quarks top peuvent être produits dans une région cinématique où ils ont une très grande impulsion (ce sera le cas si la masse de la nouvelle particule est supérieure au TeV). Les produits de désintégration des quarks top sont alors très proches les uns des autres ce qui rend leur identification et leur mesure difficiles. Le groupe développe donc des outils permettant d'optimiser ces mesures.

L'analyse est menée de façon la plus agnostique possible vis-à-vis des modèles théoriques. L'étude des données du run 1 du LHC et de la première année du run 2 n'a pas permis de mettre en évidence de déviation par rapport aux prédictions du Modèle Standard. Des limites sur les sections efficaces de production et les masses de nouvelles particules ont été obtenues pour des modèles de référence (modèle avec des dimensions supplémentaires ou de technicouleur). Le groupe, dont un étudiant en thèse (C. Camincher), travaille à améliorer les techniques d'analyse et les données des prochaines années sont attendues avec impatience.

Recherche de nouvelle physique à l'aide de photons

De nombreux modèles de nouvelle physique prédisent un excès d'événements contenant un ou des photons dans l'état final. La présence de photons permet non seulement d'avoir un bruit de fond réduit comparativement aux recherches basées sur la présence de jets hadroniques, mais également une très bonne résolution en énergie.

L'analyse mono-photon

Environ 85% du contenu en masse de l'univers est composé de matière noire. Une piste très prisée pour expliquer la nature de cette matière est de postuler l'existence de nouvelles particules massives interagissant faiblement, particules qui pourraient éventuellement être produites au LHC. Afin de détecter ces particules, qui n'interagissent pas directement avec le détecteur, l'analyse s'appuie sur la présence d'un photon énergétique qui serait émis par les quarks impliqués dans les collisions proton-proton. Le signal recherché est donc de type mono-photon, c'est-à-dire des événements pour lesquels on ne trouve qu'un photon énergétique accompagné d'une grande impulsion transverse manquante associée aux particules de matière noire. Le LPSC participe à cette recherche et à l'édition des publications associées depuis l'analyse des données à 8 TeV, dont une thèse de doctorat est issue (thèse de M. Wu). Les résultats sur les données à 13 TeV accumulées en 2015 ont été récemment rendus publics, plaçant des limites encore plus fortes sur les modèles de matière noire possibles. En 2015-2016, un membre de l'équipe du LPSC était également en charge de coordonner le sous-groupe « Jets and Dark Matter » du groupe de physique d'ATLAS sur la physique au delà du Modèle Standard « Exotics », qui regroupe une quinzaine d'analyses (dont l'analyse mono-photon) recherchant cette matière noire et d'autres particules au-delà du Modèle Standard (résonances dijet, analyse mono-jet, etc.).

L'analyse diphoton

La recherche de nouvelles particules peut également se faire par l'étude du spectre de masse invariante de deux photons. Des déviations dans ce spectre sont prédites, par exemple, par des théories postulant

l'existence de dimensions supplémentaires, comme les modèles de Randall – Sundrum (RS) ou de Arkani-Hamed – Dimopoulos – Dvali. Ces modèles prédisent l'existence d'excitations du graviton (G^*), de spin 2, se désintégrant entre autres en deux photons. L'étude du spectre à haute masse a démarré en 2010 avec les collisions à 7 TeV, puis a été poursuivie sur les collisions à 8 TeV, permettant de placer des limites inférieures sur la masse de certains G^* jusqu'à 2,67 TeV. L'analyse, par l'équipe du LPSC, des données à 13 TeV recueillies en 2015 a non seulement permis de repousser la sensibilité de l'analyse jusqu'à 3,29 TeV dans le modèle RS, mais a également mis en évidence un excès d'événements diphoton à une masse d'environ 750 GeV (Fig. 4). L'annonce de cet excès a été le temps fort du séminaire CERN de fin d'année 2015 et a entraîné de nombreuses publications de la part de théoriciens tentant d'expliquer cette observation. Depuis, et c'est le sujet de thèse d'un doctorant du groupe (T. Meideck), le travail s'est porté essentiellement sur la compréhension de cet excès ; une collaboration avec d'autres équipes d'ATLAS recherchant un signal dans la même région en masse a été entreprise. Une note scientifique a été rendue publique début 2016 et plusieurs présentations ont été faites lors de conférences. L'analyse des données à venir sera nécessaire pour vérifier cet excès, dont la signification statistique n'est pas encore au niveau requis pour une découverte.

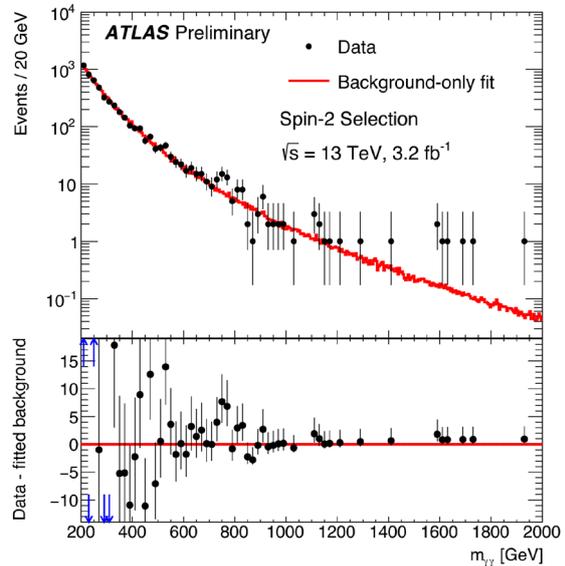


Fig. 4: Distribution de la masse invariante diphoton pour la sélection utilisée dans la recherche d'une résonance de spin 2, avec le meilleur ajustement du bruit de fond seul. La partie inférieure de la figure montre la différence entre les données et l'ajustement.

Pour en savoir plus

- » Search for s -channel single top-quark production in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV with the ATLAS detector, ATLAS collaboration, Phys. Lett. B740 (2015) 118
- » Measurement of the production cross-section of a single top quark in association with a W boson at 8 TeV with the ATLAS experiment, ATLAS collaboration, JHEP 01 (2016) 064
- » Search for charged Higgs bosons decaying via $H^\pm \rightarrow \tau\nu$ in fully hadronic final states using pp collision data at $\sqrt{s}=8$ TeV with the ATLAS detector, ATLAS Collaboration, JHEP 03 (2015) 088
- » Search for charged Higgs bosons in the $H^\pm \rightarrow tb$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV using the ATLAS detector, JHEP 03 (2016) 127
- » Search for supersymmetry at $\sqrt{s}=13$ TeV in final states with jets and two same-sign leptons or three leptons with the ATLAS detector, ATLAS collaboration, ATLAS-CONF-2015-078, <http://cds.cern.ch/record/2114850> et EPJC76 (2016) 1
- » A search for $t\bar{t}$ resonances using lepton-plus-jets events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector, ATLAS collaboration, JHEP 1508 (2015) 148
- » Search for new phenomena in events with a photon and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector, ATLAS Collaboration, arXiv:1604.01306, soumis à JHEP
- » Search for resonances in diphoton events with the ATLAS detector at $\sqrt{s}=13$ TeV, ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2016-018, <http://cds.cern.ch/record/2141568>

Futurs collisionneurs

J. Collot, J.-Y. Hostachy, A. Lacoste, A. Lleres

Y. Carcagno, J. Giraud, D. Grondin, S. Roudier, L. Vivargent (Service Études et Réalisations Mécaniques)

G. Bosson, M. Yamouni (Service Électronique)

J.-F. Muraz, O. Zimmermann (Service Détecteurs et Instrumentation)

A. Bes (CRPMN)

The next major project of particle physics will be the International Linear Collider: a linear accelerator in which electrons and positrons will collide with energies of 500 to around 1000 billion electronvolts. The LPSC-Grenoble is involved in the R&D activities for the International Large Detector (ILD) and in particular in the electromagnetic calorimeter (i.e. design of the fastening and cooling systems, design of the mechanics of the end-caps, test of EM prototypes, tooling and integration of the end-caps). In parallel, we also pursue R&D activities on single-crystal diamond pixel-detectors for tracking purposes in very high radiation environment.

Projet ILC/CALICE

L'ILC (International Linear Collider) est un projet de collisionneur d'électrons et de positrons à une énergie totale comprise entre 90 GeV et 1 TeV. Notre contribution est essentiellement orientée sur des activités de Recherche et de Développement en mécanique, en continuité avec l'historique et le savoir faire du groupe portant sur calorimétrie électromagnétique (EM). Nous sommes membres de la collaboration internationale CALICE (CALorimeter for the LInear Collider Experiment) qui regroupe 57 instituts de 17 pays différents provenant de quatre continents (Afrique, Amérique, Asie et Europe).

Mécanique : travaux de R&D

Les travaux du Service Études et Réalisations Mécaniques ont été réalisés en collaboration avec les laboratoires LLR⁵ de Palaiseau et LAL⁶ d'Orsay. Le LPSC est engagé dans :

- La conception de l'architecture générale des bouchons EM : structure alvéolaire haute résistance (tungstène plus fibres de carbone), dessins avancés et simulations numériques.
- L'assemblage et le positionnement de l'ensemble (tonneau + bouchons) du calorimètre EM : conception et réalisation de rails en composite structural ou en aluminium avec passage des fluides et commandes.
- 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, voir Fig. 1), test d'une boucle sous-atmosphérique prototype.
- La fourniture de composants composites pour la réalisation d'un démonstrateur et du module EUDET (1,50 m de long, 15 couches alvéolaires) ainsi que la réalisation et les tests de structures longues (2,50 m).
- La réalisation d'un outillage de maintenance et l'étude des différentes étapes de l'intégration des bouchons dans le détecteur ILD avec estimation des surfaces pour la maintenance et le stockage.

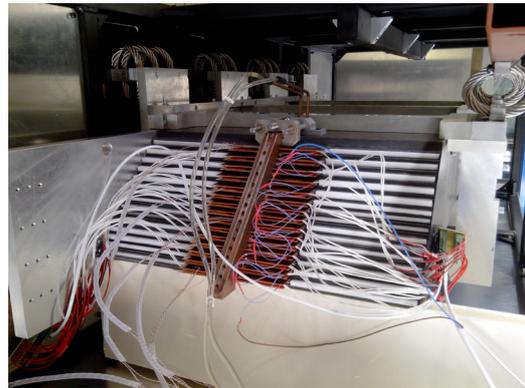


Fig. 1 : ILC-CALICE – tests thermiques d'une colonne de 15 détecteurs dans la structure EUDET.

⁵ Laboratoire Leprince-Ringuet

⁶ Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire

ANR MONODIAM-HE

Depuis le début de l'année 2013, nous participons au projet ANR MONODIAM-HE, lequel regroupe quatre laboratoires : le LPSC, l'IPHC et l'ICube de Strasbourg ainsi que le LSPM de Villeneuve. Deux instituts du CNRS (IN2P3 et INSIS), et trois universités (UGA, université de Strasbourg et université Paris 13) sont impliqués dans ce consortium.

L'objectif du projet est le développement de diamants monocristallins de grande taille ($1 \times 1 \text{ cm}^2$) pour la trajectométrie dans les conditions de radiation intense typiques du LHC à haute luminosité. Le diamant est en effet connu pour sa très grande résistance au rayonnement. Son usage pourrait constituer une sérieuse alternative pour la réalisation de la couche de capteurs à pixels située au plus près du point de collision. Ceci ne serait possible qu'à condition que l'on puisse disposer de monocristaux de diamant de grande taille à un coût maîtrisé dont les propriétés de détection seraient suffisamment homogènes. Actuellement les monocristaux disponibles sur le marché atteignent communément $5 \times 5 \text{ mm}^2$ pour un coût d'environ 500 € par unité. Le LSPM détient des compétences et des réacteurs CVD (chemical vapor deposition) pour la réalisation de tels cristaux.

Dans ce projet, le LPSC a construit un banc de test de diamants utilisant une source de strontium 90. Il s'est par ailleurs engagé dans l'étude de la métallisation des diamants et de son impact sur la collection de charge.

Les résultats obtenus sur des diamants commerciaux montrent que la nature du métal (Al, Cu, W, In) a un impact assez faible sur la charge collectée. Le LSPM a par ailleurs réalisé de gros progrès dans la maîtrise de la croissance de monocristaux utilisables pour la détection. Cependant, globalement il semble que les espoirs de croissance de gros monocristaux dans un avenir proche soient pour le moment assez maigres. L'absence de racine de croissance de grande taille et de bonne qualité (sans dislocations) sur le marché constitue actuellement le verrou de la réalisation de ce types de cristaux. D'autres techniques (clonage) n'ont pas encore livré de résultats probants. Par ailleurs, la stabilité des propriétés de détection des monodiamants dans le temps est également problématique.

Expérience ALICE auprès du LHC

G. Conesa Balbastre, J. Faivre, C. Furget, R. Guernane, R. Hosokawa*, S. Kox, J.-S. Real, C. Silvestre Tello, A. Vauthier, H. Yokoyama*

(* thèses en co-tutelle entre les universités UGA-Tsukuba)

C. Bernard, J.-F. Muraz (Service Détecteurs et Instrumentation)

D. Grondin, C. Le Tulle (Service Études et Réalisations Mécaniques)

C. Biscarat, C. Gondrand (Service Informatique)

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 is involved since 2006 in the construction of the two electromagnetic calorimeters EMCal and DCal, which improve the measurements of high momentum jets, photons and electrons. The LPSC, which has been strongly involved in the construction of the calorimeters and their dedicated level 1 trigger, is focused on the detector related works (calibration and upgrade of the trigger) and on the physics analysis (photon-hadron correlations and inclusive jet measurements).

Introduction

Depuis 2006, notre groupe est impliqué dans l'étude du plasma de quarks et de gluons (QGP) au sein de l'expérience ALICE à l'aide de faisceaux d'ions lourds ultra-relativistes auprès du LHC. Nous avons participé, dans le cadre d'une large collaboration internationale (USA, Italie, Chine, Japon, France) à la construction et la mise en œuvre des calorimètres électromagnétiques EMCal et DCal. Ces deux calorimètres de large acceptation ont permis d'étendre les performances du détecteur ALICE dans le domaine de la physique des jets, des photons et des électrons de grand moment transverse.

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 plomb-plomb, proton-plomb et proton-proton. Les premiers résultats montrent que les collisions centrales Pb-Pb permettent d'accéder à des températures de l'ordre de 300 MeV et des densités d'énergie d'environ $10 \text{ GeV}/\text{fm}^3$. De plus, les mesures de corrélations indiquent la présence d'un milieu se comportant comme un fluide fortement couplé possédant un faible rapport viscosité sur entropie.

Notre groupe s'intéresse plus particulièrement aux propriétés de transport du QGP à travers le phénomène de jet-quenching : la production des particules de grand moment transverse, qui sont issues de la fragmentation des partons produits dans les collisions dures, est supprimée en collisions d'ions lourds, à cause de l'interaction de ces partons de grande énergie avec les quarks et gluons déconfinés constituant le QGP. L'expérience ALICE permet d'en faire une étude approfondie à travers la modification des distributions en impulsion des hadrons au sein des jets (fonctions de fragmentation) entre les systèmes plomb-plomb et proton-proton ou plomb-plomb et proton-plomb. D'autres observables telles que la redistribution spatiale de l'énergie dissipée ainsi que des mesures de corrélations gamma-hadron peuvent permettre de contraindre plus largement les prédictions théoriques des coefficients de transport dans le QGP.

Cette mesure requiert la mise en œuvre de calorimètres de grande dimension, qui utilisent la technologie de la calorimétrie à échantillonnage en Pb-scintillateur. Ils permettent d'augmenter l'acceptation de détection des photons et des électrons et de fournir un déclenchement efficace et non biaisé sur les jets de grand moment transverse ainsi que sur les photons et électrons de grande impulsion. Combinés au système de trajectographie d'ALICE, ils permettent également d'améliorer la résolution en énergie des jets par la mesure de la contribution des particules neutres. Au sein de l'expérience ALICE, la calorimétrie électromagnétique repose sur trois détecteurs : le calorimètre EMCal, qui possède une acceptation de 107 degrés en azimuth, et les calorimètres PHOS et DCal dans la direction opposée, possédant une acceptation combinée de 67 degrés en azimuth, qui permettent à la fois de compléter l'acceptation du premier et d'étendre les mesures en corrélations impliquant deux jets ou une particule neutre et un jet (PHOS permet par ailleurs de réaliser des mesures plus précises en énergie).

Depuis le démarrage du LHC en 2009, l'expérience ALICE a participé aux prises de données au cours du run 1 entre 2009 et 2013. Les prises de données ont porté sur le système de collisions proton-proton à plusieurs énergies (0,9, 2,36, 2,76, 7 et 8 TeV) mais également sur les collisions plomb-plomb à 2,76 TeV ainsi que les collisions p-Pb à 5,02 TeV. L'arrêt prolongé LS1 du LHC, qui s'est déroulé de mars 2013 à mars 2015, a été mis à profit pour réaliser de nombreuses modifications du système de détection, por-

tant sur la maintenance ou l'amélioration de certains détecteurs (TPC, spectromètre muon, V0) ou l'installation complète d'autres détecteurs comme le TRD ou les calorimètres électromagnétiques (DCal). Depuis avril 2015, le run 2 du LHC a permis des prises de données en collision proton-proton à 13 TeV et 5,02 TeV et en collisions Plomb-Plomb à 5,02 TeV.

Activités liées à la mise en œuvre d'EMCal et DCal

Notre groupe a eu un rôle majeur dans la mise en œuvre du calorimètre et de son système de déclenchement et a notamment contribué à la reconstruction et calibration des données prises avec le détecteur avec diverses responsabilités dans la reconstruction et la calibration.

Assemblage et calibration d'EMCal et DCal

De 2007 à 2013, notre groupe en collaboration avec plusieurs services techniques du laboratoire a été impliqué dans la construction et la mise en œuvre des calorimètres EMCal et DCal. Au total quinze super-modules associés aux calorimètres EMCal et DCal ont pu ainsi être assemblés, testés puis calibrés au LPSC. La calibration réalisée à l'aide de rayons cosmiques a permis d'uniformiser les gains d'environ 15 000 tours composant les super-modules à mieux que 2% avant leur transport au CERN. Le calorimètre EMCal, qui a été mis en service en 2009 et 2010, a permis de fournir de précieuses données tout au long du run 1. L'installation du calorimètre DCal auprès de l'expérience ALICE, qui a été réalisée fin 2013, permet depuis le redémarrage du LHC d'étendre les capacités d'analyse avec les calorimètres.

Parallèlement à ces activités de montage, test et pré-calibration, notre groupe s'est investi dans la calibration in situ des calorimètres en place à partir de la détection des pions neutres produits dans les collisions p-p et se désintégrant en deux photons, permettant d'atteindre une précision en énergie de l'ordre du %. De multiples activités de programmation ont également été conduites sur l'ensemble de la période, d'une part pour mettre en place des outils de reconstruction, de contrôle-qualité, de simulation des données.

Ces activités de calibration et de mise à jour des outils de reconstruction et simulation se sont poursuivies en 2014-15 pendant l'arrêt LS1 du LHC et durant le run 2.

Développement du système de déclenchement de niveau 1

La mesure des particules neutres et des jets de grandes impulsion nécessite la mise en œuvre d'un système de déclenchement efficace et opérationnel associé au calorimètre. Depuis sa construction, le laboratoire a pris en charge le développement de la carte d'électronique STU et les codes d'analyse du système de déclenchement de niveau 1 du calorimètre EMCal mis en service pour le run 1.

En prévision du run 2, notre groupe a travaillé en 2014-15 en collaboration avec l'université de Tsukuba à étendre l'utilisation du système de déclenchement aux calorimètres EMCal, DCal et PHOS, opération rendue possible grâce à la flexibilité de l'architecture de la carte STU lié à l'utilisation du FPGA. De plus, une nouvelle technique de soustraction du bruit de fond a été développée pour améliorer la sélection des jets dans les collisions Pb-Pb consistant à évaluer la densité d'énergie moyenne dans les calorimètres DCal et PHOS et de la retrancher à l'énergie mesurée dans EMCal, et vice versa. Ce nouveau firmware, particulièrement exigeant en terme de ressources matérielles et logicielles, a été mis en service avec succès dans des délais très courts et utilisé pour la prise de données plomb-plomb fin 2015. 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 prévue pour début 2016 avec l'utilisation des cartes RCU2 pour la TPC. 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.

Ces résultats font l'objet d'une contribution à la Conférence Quark Matter 2015 [2] et d'une publication en cours de préparation.

Analyses de physique

Les activités de physique du groupe 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 membre du groupe 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.

Corrélations photon-hadrons

L'étude des corrélations entre d'une part un pion neutre ou un photon « particule-trigger », et d'autre part les autres particules produites est un axe de travail important au sein du groupe depuis de nombreuses années (deux thèses réalisées et une en cours [3]). 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 plomb-plomb par comparaison avec les collisions proton-proton doivent permettre de contraindre le coefficient de transport du parton dans le milieu.

En 2014-15, les analyses des corrélations photon-hadron ont portées principalement sur l'amélioration de la mesure de la pureté des photons directs isolés par de nouvelles techniques d'analyse alliant la simulation et les données. 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 sur le bruit de fond 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 proton-proton à 7 TeV. Une note d'analyse est en cours de soumission.

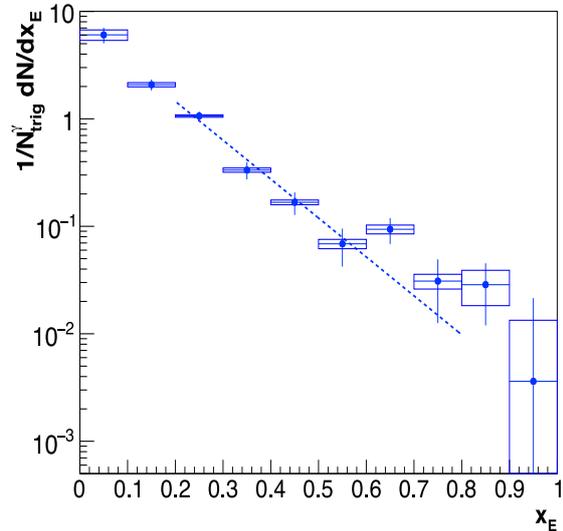


Fig. 1 : Mesure des corrélations hadron-photon.

Mesure de l'atténuation des jets inclusifs

Les jets, qui sont des signatures expérimentales des quarks et des gluons émergent des processus à grands transferts d'impulsion, voient leurs propriétés (production, structure et fragmentation) modifiées par la présence d'un QGP. Ainsi, la reconstruction des jets chargés et complets rendue ardue par l'environnement de haute multiplicité des collisions d'ions lourds au LHC, 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...). Ces mesures, déjà effectuées par ALICE à l'issue de la première campagne de prise de données au LHC [4], se poursuivent après la collecte en 2015 d'un large échantillon de collisions plomb-plomb et proton-proton à 5,02 TeV.

Nous nous sommes engagés dans l'analyse de ces données plus particulièrement avec les mesures des sections efficaces de production inclusive de jets chargés et complets en collisions proton-proton et plomb-plomb, du facteur de modification nucléaire des jets, de la structure des jets complets à l'aide de leurs corrélations avec un hadrons de grande impulsion transverse, et de l'étiquetage des jets de quarks beaux.

Réalisations techniques

Comme nous l'avons indiqué précédemment, les services techniques d'instrumentation, de mécanique et d'électronique du laboratoire ont largement contribué de 2007 à 2013 à la construction des calorimètres électromagnétiques EMCal et DCal et au développement du système de déclenchement de niveau 1. En 2014-15, ces activités ont fait place à des activités d'amélioration des dispositifs existants de même qu'une activité nouvelle en vue des upgrades des détecteurs pour 2018.

Amélioration du calorimètre électromagnétique

Durant la période 2014-15, le service d'instrumentation a continué de s'impliquer pour améliorer les services relatifs aux calorimètres EMCal et DCal. En particulier, le service a conçu, réalisé puis installé auprès de l'expérience ALICE des dispositifs de maintien mécanique de l'ensemble des cartes électroniques du Front-End, de capots de protection électrique des pièces sous tension ainsi qu'un système de refroidissement des cartes SRU de lecture.

L'ensemble de ces réalisations sont importantes car elles permettent d'améliorer la fiabilité dans le temps du fonctionnement du détecteur.

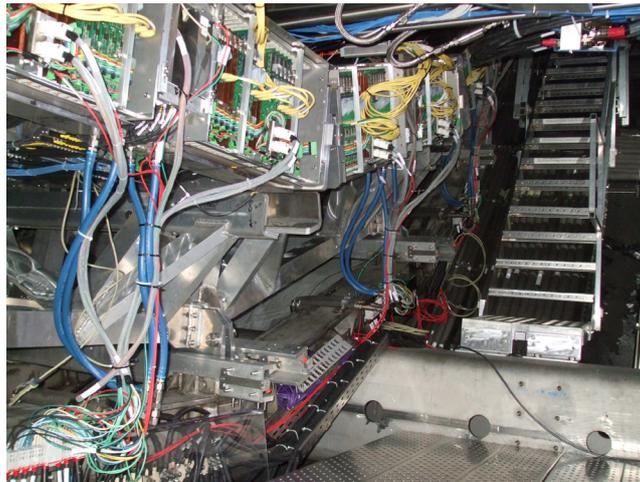


Fig. 2 : Vue du système de lecture Front-End de DCAL.

Participation à l'upgrade de l'ITS

Les perspectives de physique de l'expérience ALICE pour les runs 3 et 4 du LHC ont motivé un programme ambitieux d'amélioration du détecteur dès le prochain arrêt du LHC en 2018. En particulier les améliorations 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 pour améliorer les performances d'identification des vertex et la reconstruction des traces à petits impulsions transverses.

Dans ce contexte, le service de mécanique du laboratoire s'est impliqué dans la construction de moules pour la réalisation de pièces en composite utilisées dans la support mécanique et le refroidissement du détecteur à pixels ITS. Le service est également 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.

Maintenance de la grille

Depuis 2008, le laboratoire s'est doté d'un nœud de grille pour répondre aux besoins de calcul des groupes LHC du laboratoire (ATLAS et ALICE). Depuis sa mise en fonctionnement, le site a démontré son efficacité ce qui lui a permis de passer du niveau de Tier-3 à Tier-2 en 2011 et a étendu ses services à de nombreuses collaborations hors LHC.

Avec des capacités de calcul d'environ 760 cœurs et de stockage de 1,6 péta-octets, la grille de calcul du LPSC assure un service de qualité avec une disponibilité supérieure à 99% et contribue ainsi efficacement aux besoins de la collaboration ALICE.

Pour en savoir plus

- » [1] *Performance of the ALICE experiment at the CERN LHC*, ALICE collaboration, *Int. J. Mod. Phys. A*29 (2014) 1430044
- » [2] *A Summary Trigger Unit for the ALICE Electromagnetic Calorimeters*, Quark Matter 2015 XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 27 Septembre au 3 Octobre 2015, Kobe Fashion Mart, Kobe, Japan
- » [3] *Étude de la fragmentation des partons par la mesure de corrélations photon-hadron auprès de l'expérience ALICE au LHC*, N. Arbor, thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier soutenue le 19 septembre 2013
- » [4] *Measurement of jet suppression in central Pb-Pb collisions at 2.76 TeV*, ALICE coll., *Phys.Lett. B*746 (2015) 1-14

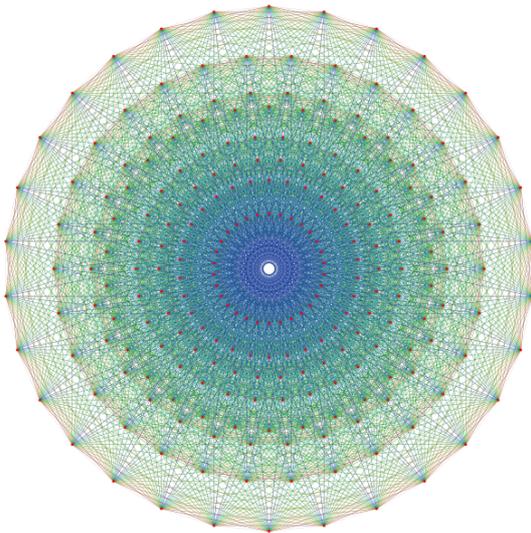
Physique des particules théorique

S. Kraml, M. Mangin-Brinet, I. Schienbein, C. Smith
G. Chalons, S. Kulkarni, A. Kusina, K. Mawatari, D. Sengupta (CDD Postdoc)
J. Bernon, B. Dumont, G. Gbedo, U. Laa, F. Lyonnet, J. Proudom (Doctorants)

The theory group at LPSC is active in particle phenomenology. Our research follows essentially two main lines. The first is the study of 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.

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 mesurés 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

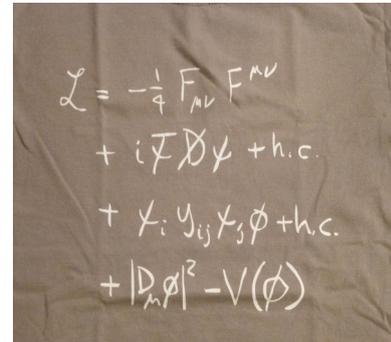
une étape. Donc, partant des limitations du MS, les théoriciens cherchent à construire des modèles un peu plus simples ou complets. Par exemple, ils peuvent avoir moins de paramètres libres ou un meilleur comportement quantique, expliquer pourquoi les neutrinos sont si légers, de quoi est faite la matière 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 autre 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

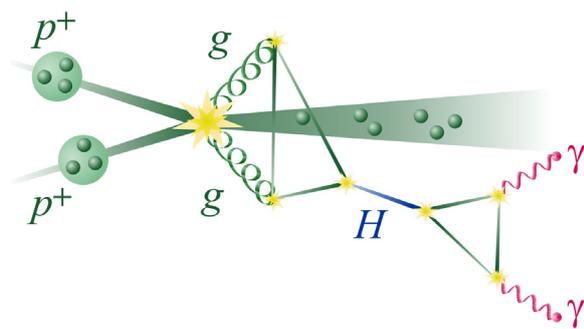
autres, fortes, électromagnétiques, et gravitationnelles, sont de portée infinie car dues à l'échange de particules sans masse : gluons, photons, et gravitons. Jusqu'en 1969, le modèle de Fermi était utilisé pour décrire l'interaction faible. Bien qu'en parfait accord avec l'expérience, ce modèle ne 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 de théorie des champs jugés incontournables : la renormalisabilité et l'unitarité.

C'est ce problème 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 la rendre de courte 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.



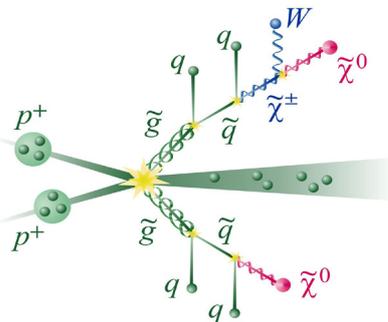
Qu'étudient les théoriciens du LPSC ?

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 depuis la mi-2012 de quatre chercheurs permanents (3 CNRS, 1 UJF), soutenus par trois ou quatre chercheurs en CDD et autant d'étudiants en thèse.



Comme nous l'illustrerons dans ce rapport d'activités, notre groupe 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 de nos travaux, notre groupe bénéficie d'une excellente réputation et d'une visibilité tant nationale qu'internationale.

Nos 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 :



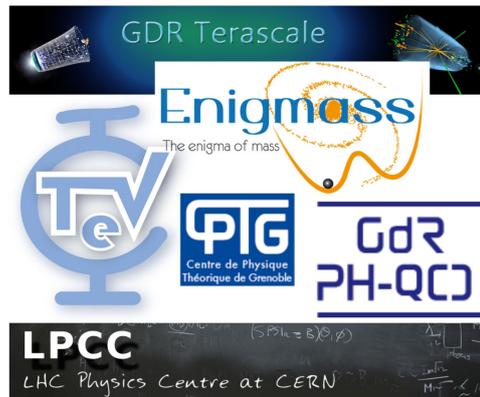
- Le traitement des effets dus aux interactions fortes, en particulier dans les collisions proton-proton du LHC, tant pour les processus du Modèle Standard que pour ceux attendu dans divers scénarios de nouvelle physique.

- 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. La période récente ayant été marquée par la découverte du boson de Higgs, nous lui avons consacré nombre de nos travaux.

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. Finalement, l'épineuse question de la nature de la matière noire mobilise une partie de nos efforts et de ceux des groupes d'astrophysique.

Quelques autres activités

Notre groupe est impliqué dans l'animation d'ateliers, l'organisation de conférences, ainsi que la gestion scientifique de différents réseaux de recherche, et ce tant au niveau national qu'international. Citons par exemple la série d'ateliers des Houches Physics at TeV Colliders, ceux du LHC Physics Center at CERN, les groupements de recherches PH-QCD et Terascale. Ces activités sont particulièrement cruciales pour un groupe théorique, car elles participent à la dissémination de nos résultats et garantissent notre visibilité présente et future. D'ailleurs, les membres de notre groupe sont très souvent sollicités comme orateurs, tant aux conférences thématiques qu'aux congrès internationaux.



Chromodynamique Quantique perturbative

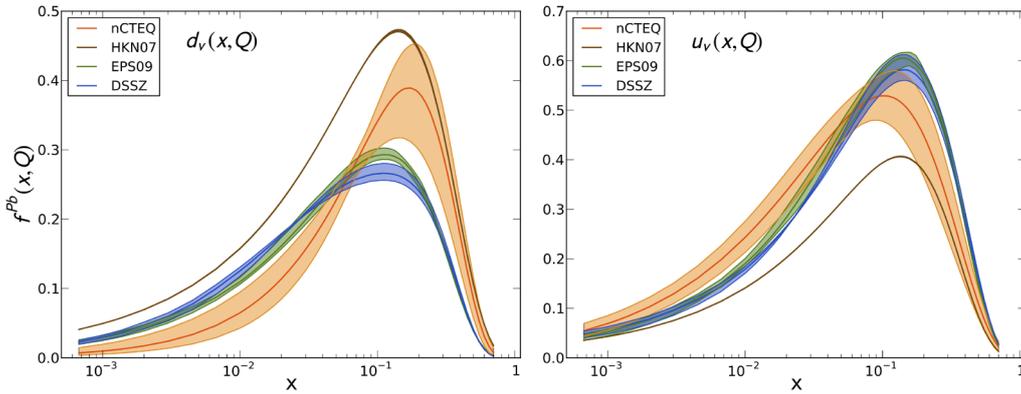
L'une de nos activités principales de recherche concerne l'étude de la structure des nucléons et noyaux complexes. Ces systèmes sont caractérisés par leurs distributions de partons (PDF) qui, intuitivement, décrivent en détails leur constitution en quarks et de gluons.

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 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 prérequis 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.

Détermination des distributions de partons

Les PDF sont déterminées par des ajustements globaux des données d'une grande variété de processus durs en utilisant le cadre théorique nCTEQ, qui a été développé par notre groupe au 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 notre approche est ainsi sa large portée puisque nous analysons les PDF dans les protons et les noyaux en utilisant 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-après 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 permettrait 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.



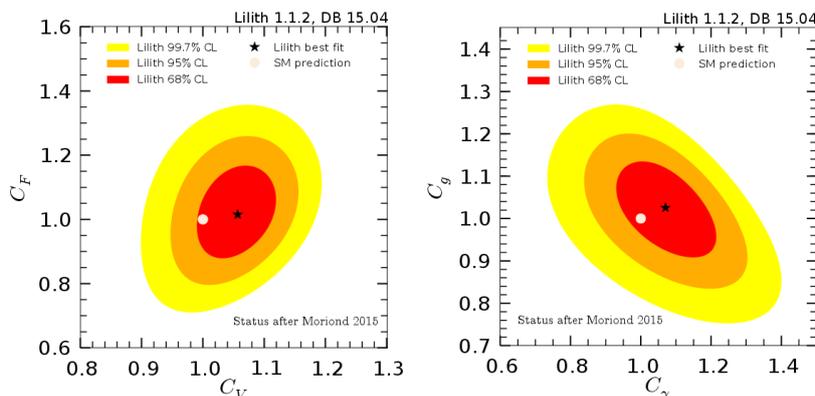
Conséquences de la découverte du boson de Higgs

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 exclut 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. En particulier, 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 nous 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.

Notre groupe s'est fortement impliqué dans cette problématique, que ce soit via des analyses génériques et globales, suivant une stratégie effective ou phénoménologique, ou via l'étude précise des prédictions d'un modèle spécifique de nouvelle physique tel par exemple le modèle à deux doublets de Higgs. Également, nous avons développé un outil d'analyse statistique puissant des signaux observés du boson de Higgs dans différents canaux, permettant de quantifier précisément toute déviation par rapport aux prédictions du MS (comme illustré par la figure ci-dessous).



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, c'est-à-dire être accessibles au LHC.

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.

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

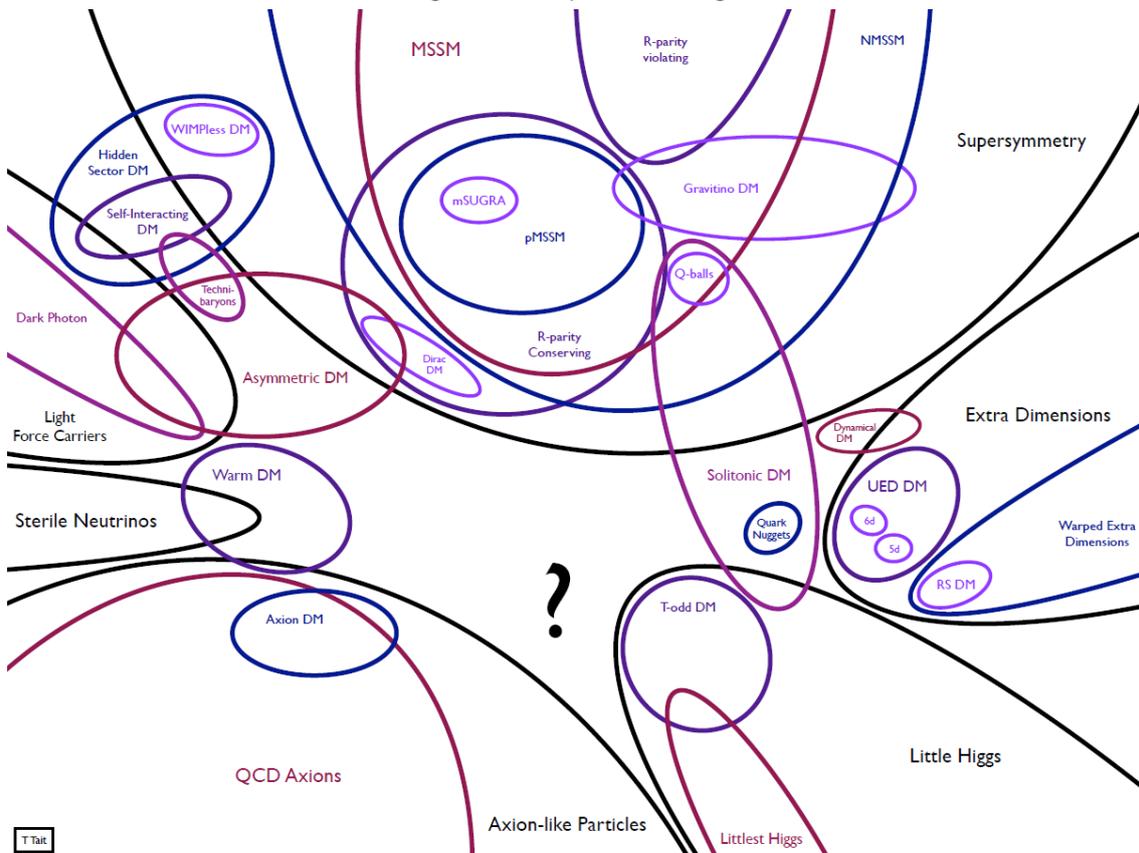
Le contexte supersymétrique couvre une large partie de nos activités. Comme pour l'étude du boson de Higgs, celle de la SUSY peut se faire de façon effective, c'est-à-dire en tentant de couvrir aussi largement que possible ses réalisations concrètes, ou de façon spécifique en se concentrant sur un modèle 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.

En plus de la SUSY, notre groupe étudie beaucoup d'autres scénarios de nouvelle physique. Récemment, ces 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 », la violation du nombre baryonique dans les canaux dileptons, ou la recherche de matière noire. À chaque fois, nous avons paramétré en toute généralité, sans référence à un modèle particulier, l'impact de la nouvelle physique. De plus, nous avons souvent illustré ces analyses 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 leptoquarks pour celles sur la violation du nombre baryonique. Enfin, nous nous sommes intéressés 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 à nos calculs des corrections quantiques, nous avons pu réduire ces incertitudes, ce qui permettrait, au moins en principe, de caractériser la théorie sous-jacente à partir de signaux expérimentaux.

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 nous ne l'avons pas observée directement sur terre. Quelques candidats, et les théories d'où ils émergent, sont repris dans la figure ci-dessous, due à T. Tait.



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 de nos travaux. Comme précédemment, nous suivons typiquement l'une des deux stratégies complémentaires pour l'exploiter : 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.

États isomériques 6^+ de $^{136,138}\text{Sn}$

F. Drouet, G. Gey, M. Ramdhane, G. Simpson
CSIC Madrid, RIKEN, IRES Strasbourg, EURICA collaboration

Delayed γ -ray cascades, originating from the decay of 6^+ isomeric states, in the very neutron-rich, semi-magic isotopes $^{136,138}\text{Sn}$ have been observed following the projectile fission of a ^{238}U beam at RIBF, RIKEN. Shell-model calculations, performed using a realistic effective interaction, reproduce well the energies of the excited states of these nuclei and the measured transition rates, with the exception of the $B(E2; 6^+ \rightarrow 4^+)$ rate of ^{136}Sn , which deviates from a simple 1-broken-pair scheme. These data provide a key benchmark for shell-model interactions far from stability.

Introduction

Les écarts entre les couches magiques dans les noyaux peuvent apparaître et disparaître en fonction du nombre de protons et de neutrons loin de la ligne de stabilité. Ces écarts ont une influence majeure sur la structure nucléaire, avec des conséquences sur les chemins, les taux et les abondances finales de la nucléosynthèse des réactions astrophysiques qui se déroulent dans des régions éloignées de la stabilité. Le modèle en couches est le principal outil de prédiction de la structure des noyaux près des couches fermées, dans les régions inaccessible actuellement par expérience. Avec le choix d'un espace de valence appropriée, ce modèle nécessite deux ingrédients ; les énergies effectives de la particule individuelle et les interactions effectives nucléons-nucléon. Tandis que les premières sont dérivées des grandeurs mesurées expérimentalement, les dernières sont actuellement construites en utilisant une variété de méthodes théoriques sophistiquées. Les données sur les noyaux semi-magiques sont de première importance pour isoler et tester la partie de l'interaction effective neutron-neutron ou proton-proton, permettant ainsi d'exposer toutes les déficiences. Dans ce contexte, nous avons étudié les états excités dans les noyaux semi-magiques $^{136,138}\text{Sn}$ au RIBF, RIKEN dans le cadre de la campagne EURICA. Ces noyaux se trouvent juste au-delà des noyaux doublement magiques ^{132}Sn et ont une structure simple de seulement 4 et 6 neutrons de valence respectivement. Avant notre travail aucune information expérimentale n'existait sur ces noyaux, qui se trouvent à 12 et 14 neutrons au-delà du dernier isotope Sn stable. Nos études font partie d'un effort mondial majeur pour étudier la structure des noyaux loin de la stabilité.

Expérience

L'expérience a été réalisée au RIBF du Centre RIKEN Nishina. Les isotopes riches en neutrons de Sn ont été produits suite à la fission du faisceau d' ^{238}U d'énergie 345 MeV/u. Les ions d'intérêt ont été séparés des autres produits de réaction et identifiés sur une base ion-par-ion par les détecteurs du spectromètre en vol du BigRIPS. Les désintégrations γ de tous les noyaux qui arrivent au point focal du spectromètre toujours dans un état excité ont été détectés par le dispositif EURICA-Ge et affectés à un noyau spécifique à partir des informations d'identification d'ions du BigRIPS.

Résultats

Trois rayons γ retardés ont été observés en coïncidence avec chacun des ions de $^{136,138}\text{Sn}$ ce qui a permis de construire le schéma de niveaux montré dans la figure 1. Le schéma de niveaux connu du noyau avec deux neutrons de valence ^{134}Sn est également représenté. Dans cette figure, on peut voir que les énergies des états 2^+ , 4^+ et 6^+ sont presque constantes en fonction du nombre de neutrons de valence. Cette propriété est compatible avec les excitations provenant de la seule paire brisée de neutrons $f_{7/2}$, appelée l'excitation de séniorité-2. On voit également dans la figure 1 les résultats d'un calcul du modèle en couches effectués à l'aide d'une interaction efficace dérivée du potentiel du nucléon CD-Bonn renormalisé en utilisant une procédure $V_{\text{low-k}}$ (v1k). Ce calcul, qui peut être considéré comme l'état de l'art, reproduit bien les énergies de tous les trois noyaux représentés dans la figure 1.

Les informations sur le temps ions- γ de l'expérience a permis aux taux de la transition déduite, $B(E2)$, de l'isomère $6^+ \rightarrow 4^+$ d'être prédit. Cette quantité est indépendante de l'énergie et les valeurs expérimentales

tales sont présentées sur la figure 2, ainsi que les prédictions théoriques. Si les excitations créent les états dans $^{134,136,138}\text{Sn}$ ne surviennent que d'une paire de neutrons unique étant brisée (excitation de séniorité-2), donc les valeurs de $B(E2)$ doivent suivre la forme d'une parabole négative en fonction du nombre de neutrons. Comme on peut le voir sur la figure 2, ce n'est pas le cas pour les données expérimentales de ^{136}Sn . Les prédictions avec l'interaction vlk suivent la même tendance que les prédictions simples de séniorité-2. Cela indique une carence dans l'interaction vlk, ce qui est surprenant vu que cette méthode a été utilisée auparavant pour construire des interactions efficaces qui fonctionnent universellement bien dans tous les autres systèmes lourds, doublement magiques.

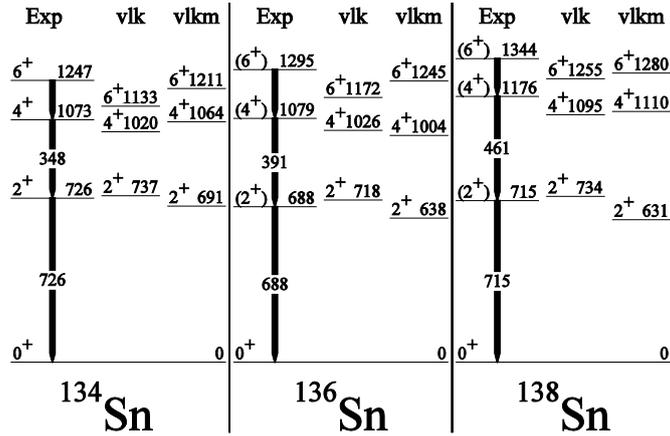


Fig. 1 : Schémas de niveaux de $^{136,138}\text{Sn}$ obtenus dans le cadre de ce travail ainsi que des prédictions théoriques du modèle en couches. Le schéma de niveaux de ^{134}Sn a été reporté précédemment.

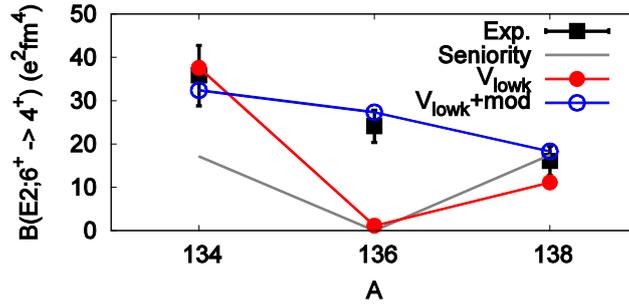


Fig. 2 : Taux des transitions réduites expérimental et théorique de la transition $6^+ \rightarrow 4^+$ dans $^{134,136,138}\text{Sn}$.

Afin de reproduire les données expérimentales, les énergies des éléments de matrices d'appariement de neutron $f_{7/2}$ ont été réduites pour créer une nouvelle interaction appelée vlkm. Les excitations de deux paires brisées se produisant à faible énergie avec cette modification et ces états qui se mélangent avec les états de la séniorité-2, les niveaux changeants de façon significative la fonction d'onde du premier état 4^+ . Le premier état 4^+ contient maintenant des quantités à peu près égales à ceux de séniorité-2 et 4 excitations permettant la reproduction correcte des taux des transitions réduites représentées dans la figure 2, tout en donnant un bon accord avec les énergies de niveau expérimentaux présentés dans la figure 1.

Conclusion

Des rayons γ retardés ont été observés en coïncidence avec les isotopes très riches en neutrons $^{136,138}\text{Sn}$ permettant de construire les premiers schémas de niveaux pour ces noyaux. Afin de reproduire les taux de transition réduits mesurés, la matrice d'appariement de neutron $f_{7/2}$ a dû être réduite. Cela indique une déficience dans la méthode sophistiquée utilisée pour produire ces interactions efficaces et illustre le besoin de données expérimentales clés pour optimiser les interactions du modèle en couches dans les régions loin de la stabilité.

Pour en savoir plus

» *Yrast 6^+ Seniority Isomers of $^{136,138}\text{Sn}$* , G. S. Simpson, G. Gey, et al. *Phys. Rev. Lett.* 113 (2015) 0132502

Exploration des excitations collectives avec le modèle algébrique collectif de Bohr

G. Thiamova

In many nuclei multiphonon excitations have been observed which show various degrees of anharmonicity. Study of such excitations is an interesting subject both for experimental and theoretical nuclear structure physics. We have shown in our work that very big anharmonicities of double- γ vibrations in some deformed nuclei may be related to their triaxial shape.

L'étude des anharmonicités des excitations collectives a une très longue histoire. Il a été démontré, par exemple, que la version la plus simple du modèle des bosons en interaction (IBM-1) ne peut pas décrire des grandes anharmonicités des vibrations double- γ , observées dans l' ^{166}Er . Il a été démontré récemment que les anharmonicités peuvent apparaître si les interactions d'ordre plus élevé (en particulier les interactions à trois corps) sont prises en compte. En même temps les interactions à trois corps peuvent induire la forme triaxiale d'un noyau. Il est alors intéressant d'étudier les corrélations entre les anharmonicités des vibrations et la triaxialité des noyaux.

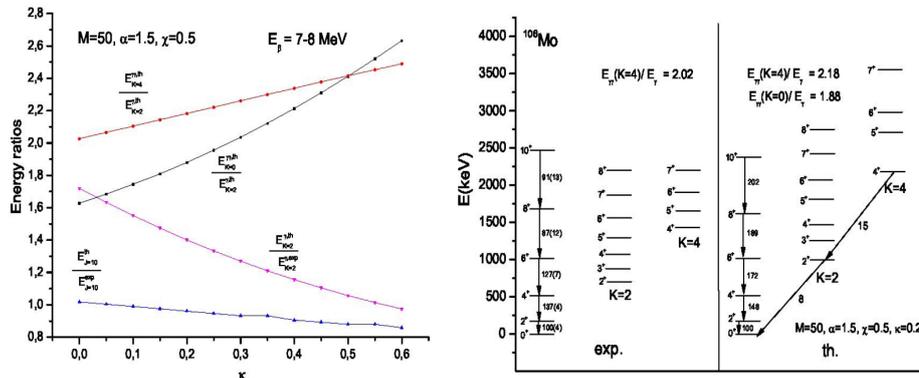


Fig. 1 : Gauche : Les non-harmonicités des excitations double- γ (en rouge pour $K=4$ et en noir pour $K=0$), les rapports des énergies calculées et observées des vibrations γ (en rose) et les rapports des énergies calculées et observées du membre $J=10$ de la bande rotationnelle fondamentale (en bleu). Les énergies observées sont celles du ^{106}Mo . Droite : Le spectre expérimental et calculé du ^{106}Mo .

La figure 1 montre qu'en imposant une forme triaxiale du noyau (le paramètre κ non nul), dans le cadre du modèle algébrique collectif, on peut en principe obtenir de grandes anharmonicités des vibrations double- γ .

Le noyau du ^{106}Mo est un exemple type grâce à la présence d'une vibration double- γ avec $K=4$ parfaitement harmonique. Les vibrations double- γ calculées sont légèrement anharmoniques et l'énergie potentielle possède un minimum de symétrie axiale.

Par contre, dans l' ^{166}Er , des vibrations double- γ sont fortement anharmoniques (figure 3) et l'énergie potentielle présente un minimum triaxial peu profond. En même temps, l' ^{166}Er est intéressant grâce à la présence d'une vibration β , dont l'énergie a été relativement bien décrite par le modèle. Ce noyau représente l'un des rares cas où ce type de vibration a été identifié expérimentalement.

D'autres questions importantes sont apparues lors de cette étude, par exemple le comportement du « staggering » de la bande γ en fonction du spin, qui sert d'indicateur sensible de la forme du noyau, peut être assez complexe et mérite une investigation plus détaillée, surtout dans les régions transitionnelles (changement de forme).

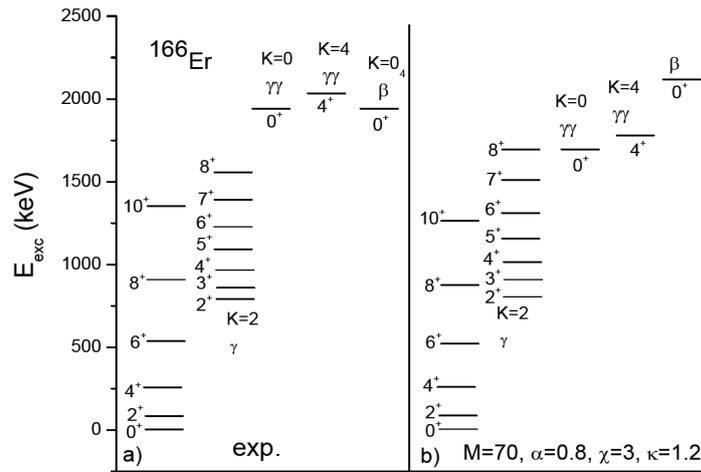


Fig. 3 : Le spectre expérimental a) et calculé b) de ^{166}Er .

Pour en savoir plus

- » Algebraic Collective Model description of ^{166}Er , G. Thiamova, *International Journal of Atomic and Nuclear Physics*, vol. 1, 1, (2015)
- » Algebraic collective model and its applications, G. Thiamova, *Bulgarian J. of Physics*, vol. 42, 457, (2015), invited talk at SDANCA 2015 workshop

Groupe UCN

B. Clément, M. Guigue, Y. Kermaïdic, G. Pignol, K. Protasov, D. Rebreyend
 Y. Carcagno, C. Fourel, G. Frêche, C. Le Tulle, J. Menu, E. Perbet, F. Vezzu, L. Vivargent (Service Études et Réalisations Mécaniques / SERM)
 O. Bourrion, E. Lagorio, D. Tourres, J.-P. Scordilis, C. Vescovi (Service Électronique / SE)
 R. Faure, M. Marton, M. Chala (Service Détecteurs et Instrumentation / SDI)
 J. Fulachier, F. Lambert, J. Odier (Service informatique / SI)
 Collaborations GRANIT, nEDM

Because they can be stored in material (or magnetic) vessels, Ultra Cold Neutrons (UCN) are unique tools to perform low energy high precision experiments to search for new physics. Our group is currently exploring mainly two pathways: the search for new sources of CP violation with the measurement of the neutron electric dipole moment; the spectroscopic study of the quantum states of neutrons trapped in the earth gravitational field. The former is closely connected to the attempt to elucidate one of the biggest puzzle of contemporary physics: the disappearance of anti-matter during the early Universe, also known as the Baryon Asymmetry of the Universe (BAU). The latter gives one of the very rare opportunity to study gravitation in the context of quantum mechanics and provides an original test of the weak equivalence principle.

Mesure du moment dipolaire électrique du neutron

Comprendre comment, à partir d'un contenu initial symétrique entre matière et antimatière, l'Univers a pu évoluer vers un état où seule la matière subsiste est une des grandes énigmes de la cosmologie. La mesure d'un moment dipolaire électrique (EDM) du neutron dans la gamme 10^{-27} e cm – domaine accessible aux expériences de prochaine génération – révélerait une nouvelle source de violation de la symétrie combinée CP et serait un pas décisif vers la confirmation du scénario de baryogenèse électro-faible. À contrario, l'absence de signal le rendrait hautement improbable et favoriserait un scénario du type leptogenèse.

L'expérience nEDM à l'Institut Paul Scherrer (PSI)

Après plusieurs années consacrées à l'amélioration du spectromètre nEDM détenteur de la meilleure limite ($d_n < 3 \cdot 10^{-26}$ e cm (90% CL)) ainsi qu'à la mise en route et l'optimisation de la nouvelle source d'UCN de PSI, l'objectif principal de notre collaboration depuis 2013 est de cumuler de la statistique en vue d'améliorer la mesure actuelle à brève échéance. Après une année 2014 émaillée de nombreux incidents, 2015 a été couronnée de succès. Grâce à un nouvel algorithme d'optimisation de l'homogénéité du champ magnétique, nous avons pu obtenir des temps de relaxation de la polarisation des UCN supérieurs à 1000 s. Côte source, même si la densité n'est pas encore celle escomptée au début du projet, de nombreuses petites améliorations ont permis d'augmenter sensiblement le nombre de neutrons stockés. L'ensemble de ces progrès combinés nous a permis de travailler avec une sensibilité moyenne par jour de $2 \cdot 10^{-25}$ e cm – la meilleure jamais obtenue pour cette mesure – et, grâce à une disponibilité du spectromètre proche de 100%, d'atteindre fin 2015 une sensibilité de $1,7 \cdot 10^{-26}$ e cm. En poursuivant sur le même rythme, une sensibilité de 10^{-26} e cm devrait être atteinte fin 2017.

En plus de participer activement au fonctionnement de l'installation en effectuant des « shifts » in situ à PSI, notre groupe s'est fortement impliqué dans les analyses et les études de systématiques. Dans le cadre de sa thèse, Y. Kermaïdic a ainsi pu développer l'ensemble de la chaîne d'analyse et produire les résultats au fur et à mesure de l'accumulation de la statistique. Il a aussi contribué au déploiement d'une base de données et d'outils d'analyse en ligne (logiciel EDMA) en collaboration avec J. Fulachier et J. Odier du SI. Ces nouveaux outils qui facilitent grandement la gestion des données et le contrôle de leur qualité ont été rapidement adoptés par la collaboration. Enfin, Y. Kermaïdic a mené une étude complète – de la prise de données à la publication en passant par l'analyse – du principal effet systématique de l'expérience : un faux EDM induit par le comagnétomètre Hg. G. Pignol a quant à lui pu obtenir une nouvelle mesure – la première avec des UCN – du moment magnétique du neutron à un niveau de précision comparable à la mesure obtenue par G. Greene et N. Ramsey en 1976 à l'Institut Laue Langevin.

Cet investissement dans l'étude des systématiques a débouché sur une compréhension très améliorée d'un certain nombre de systématiques. En reconnaissance de ce travail, la collaboration RAL-Sussex,

détentrice de la limite actuelle, nous a invités à cosigner un article présentant une réanalyse des données à la base du résultat de 2006 et enregistrées avec le spectromètre nEDM lorsqu'il était stationné à l'ILL.

Le projet n2EDM

Afin d'atteindre le domaine de sensibilité 10^{-27} e cm, il est nécessaire de construire un nouveau spectromètre. C'est le projet n2EDM sur lequel nous travaillons depuis quelques années. Les principales améliorations par rapport au dispositif actuel résident dans une double chambre de précession ainsi qu'une optimisation de la hauteur du spectromètre par rapport à la source d'UCN. Cette combinaison permet de gagner un important facteur sur la statistique et un meilleur contrôle des erreurs systématiques. Pour financer une contribution IN2P3 à la fabrication de ce nouvel instrument, nous avons préparé avec le LPC Caen une demande conjointe auprès de l'ANR en 2014. À notre grande satisfaction, l'ANR a répondu favorablement et nous disposons désormais d'un budget sur la période 2015-2018. En accord avec la collaboration, nous avons pris la responsabilité de trois tâches : le « switch » UCN (Fig. 1), aiguillage qui permet de diriger les neutrons de la source vers le spectromètre puis vers les détecteurs ; la chambre de polarisation Hg dans laquelle une vapeur de ^{199}Hg est polarisée par pompage optique avant transfert dans la chambre de précession ; une source de courant ultrastable pour générer le champ magnétique principal. Nous avons également entrepris de développer un banc de test dédié aux tests de la chambre de polarisation Hg ainsi qu'à des études plus générales sur les processus de relaxation du ^{199}Hg . Ces activités ont démarré en 2015 avec objectif de fournir des livrables fin 2017 pour une intégration à partir de 2018. Elles sont coordonnées par R. Faure du SDI et impliquent M. Marton du SDI, C. Fourel et J. Menu du SERM, L. Eraud et C. Vescovi du SE.

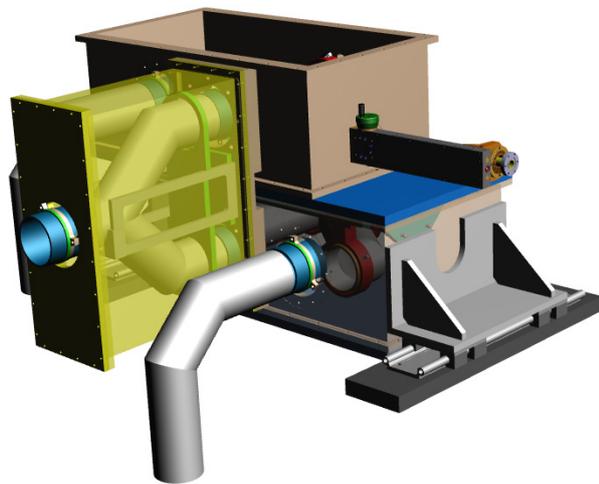


Fig. 1 : Image 3D du switch UCN.

Pour en savoir plus

- » *A measurement of the neutron to ^{199}Hg magnetic moment ratio*, S. Afach et al., *Phys. Lett. B* 739 (2014) 128
- » *Measurement of a false electric dipole moment signal from ^{199}Hg atoms exposed to an inhomogeneous magnetic field*, S. Afach et al., *The European Physical Journal D* (2015) 69:225
- » *A revised experimental upper limit on the electric dipole moment of the neutron*, J.M. Pendlebury et al., *Phys. Rev. D* (2015) 92, 092003

Étude des niveaux quantiques dans le champ de pesanteur terrestre

L'expérience GRANIT à l'Institut Laue Langevin (ILL)

GRANIT est un projet mené en étroite collaboration entre le LPSC et l'ILL depuis 2006, avec la contribution du Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA) pour les traitements de surface et l'appui de laboratoires russes (JNIR et PNPI) et américains (VSU et URI). Il vise à induire des transitions entre les niveaux quantiques de neutrons piégés par le champ gravitationnel terrestre à la surface d'un miroir afin de mesurer leurs énergies. Il s'agit d'un des très rares dispositifs expérimentaux permettant l'étude de la gravité newtonienne dans le contexte de la mécanique quantique.

Suite aux performances médiocres de la source UCN superthermale en 2013, une grande partie de notre activité a été consacrée au diagnostic, à la fiabilisation et à l'amélioration des performances de cette source. Ce travail porte sur trois axes :

- La recaractérisation du faisceau de neutrons froids en entrée dans la source. Un dispositif de mesure de temps de vol à haute résolution a permis de confirmer que les neutrons froids ont bien la longueur d'onde souhaitée de 0,89 nm mais le flux de neutrons est 1,5 fois plus faible que ce qui avait été précédemment mesuré. Le taux de production d'UCN est désormais estimé à $19\,000\text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$.

- Le cryostat a été entièrement démonté durant le long arrêt de l'ILL à l'hiver et au printemps 2014. La modification majeure concerne le remplacement d'une vanne aiguille du circuit 3He par une impédance, simplifiant grandement l'opération du système cryogénique. Un grand nombre de petites modifications ont également été apportées à l'ensemble du système. La température nominale de 0,8 K a pu être atteinte de manière régulière en 2015 avec cependant l'apparition de bouchons dans le circuit 3He au bout d'une quinzaine de jours.
- L'état de surface et les matériaux des différentes pièces du système d'extraction des neutrons ont été améliorés afin de réduire les pertes : étuvage et électro-polissage des tuyaux d'extraction en inox, nouvelles pièces en cuivre en remplacement de pièces avec traitement de surface en nickel ou en DLC (Diamond Like Carbon).

À l'été 2015, un flux de neutron de 350 MHz en sortie d'une fente de 127 μm a été mesuré, soit un facteur 35 d'amélioration par rapport à l'été 2013. Ce flux de neutrons a été suffisant pour commencer le programme de physique de GRANIT avec en particulier une mesure du flux de neutrons en fonction de la hauteur de la fente de sortie (Fig. 2).

Le SERM du LPSC a continué à jouer un rôle déterminant au cours de cette période. Il a assuré la coordination technique du projet et été le maître d'œuvre dans la conception, la réalisation et l'implémentation des modifications sur la source d'UCN. Le SERM a également participé aux premières étapes du « commissioning » et pris en charge l'essentiel des opérations de maintenance de l'instrument GRANIT.

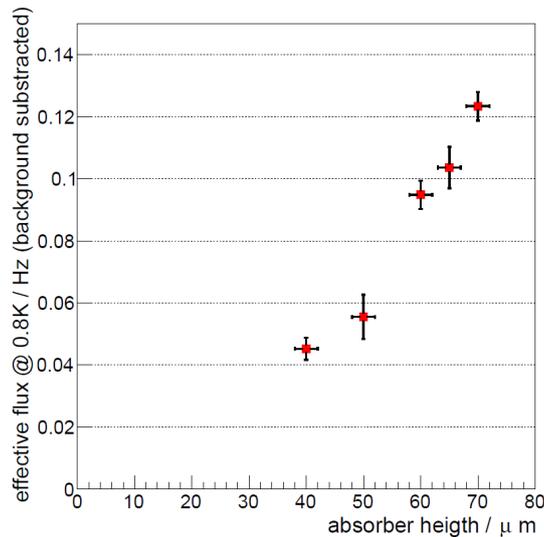


Fig. 2 : Flux de neutrons mesuré en sortie du spectromètre en fonction de la hauteur de l'absorbeur (points rouges). Les points verts et violets correspondent à d'autres expériences.

Le projet UCNBox

En plus de la mesure des transitions résonnantes, le spectromètre GRANIT peut également être utilisé pour déterminer la structure spatiale des fonctions d'ondes du neutron. Cette observable complémentaire aux niveaux d'énergie nécessite un détecteur sensible à la position de résolution micrométrique. Suite à l'obtention d'un budget de 30 k€ de l'université (programme AGIR), le développement d'un tel détecteur a débuté en collaboration avec le groupe Plasma du LPSC et les services électronique et étude et réalisations mécaniques. Le détecteur UCNBox repose sur l'utilisation de capteurs CCD commerciaux sur lesquels une couche mince de 10B est déposée par PVD plasma. Le processus de dépôt a été développé au LPSC en 2015 et un premier capteur a détecté des UCN issus de la source de GRANIT. Le détecteur final utilisera 8 capteurs avec une électronique dédiée.

Pour en savoir plus

» *Status of the GRANIT facility*, D. Roulier et al., *Advances in High Energy Physics*, 2015(730437), (2015)

Recherche d'une nouvelle force avec l'hélium 3 polarisé

En collaboration avec le groupe hélium 3 de l'ILL, nous avons conduit une expérience recherchant une nouvelle interaction, au-delà du modèle standard de la physique des particules, agissant sur le spin des atomes d'hélium 3. Cette nouvelle interaction, violant la symétrie CP, serait véhiculée par un boson léger de type Axion et dont la portée, inversement proportionnelle à sa masse, serait macroscopique. Le signal recherché est une dépolarisation anormale d'un gaz d'hélium 3 polarisé induite par l'interaction hypothétique générée par la paroi de verre de la cellule contenant le gaz. Le système est particulièrement sensible puisque le temps de dépolarisation dû aux effets standards est très long, de plusieurs centaines d'heures. Un environnement magnétique contrôlé (Fig. 3) a été construit spécifiquement pour cette expérience. L'expérience a donné un résultat compatible avec zéro et nous avons obtenu la meilleure limite (en laboratoire) sur le produit des constantes de couplages $g_S g_P$ pour des portées dans la gamme comprise entre 1 et 150 micromètres (correspondant à une masse sub-eV). Ce projet a fait l'objet de la thèse de M. Guigue.

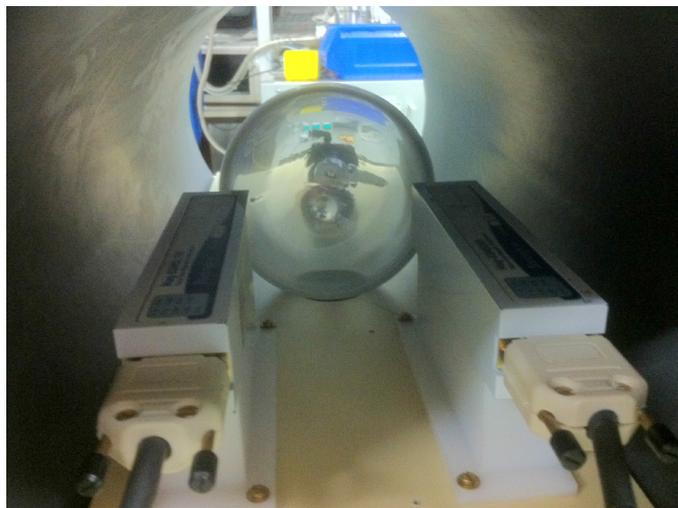


Fig. 3 : La cellule de verre contenant l'hélium 3 polarisé et les magnétomètres (au premier plan) pour mesurer la dépolarisation au centre du blindage magnétique.

Pour en savoir plus

» *Constraining short-range spin-dependent forces with polarized ^3He* , M. Guigue, D. Jullien, A. K. Petukhov, and G. Pignol, *Phys. Rev. D* 92, 114001 (2015)

