

Théorie et phénoménologie

L'ambitieux objectif de la physique théorique est d'élaborer une description précise et robuste des lois de la nature. Dans ce but, le groupe de physique théorique du LPSC travaille sur la physique hadronique et nucléaire – traditions de longue date du groupe – et, depuis 8 ans, sur la physique des particules élémentaires. Le contexte scientifique est extensivement décrit dans les introductions des chapitres 1, « Quarks, leptons et interactions fondamentales », 2 « Astroparticules et cosmologie » et 3 « Hadrons et Noyaux », et ne sera pas détaillé de nouveau ici. Concernant la période sur laquelle s'étend ce rapport, le groupe a été très actif dans les calculs de précision du Modèle Standard (Higgs et physique du top, fonctions de distribution des partons) et au-delà, la phénoménologie de la supersymétrie et les théories de grande unification, la phénoménologie de la matière noire, ainsi que les calculs sur réseau pour la physique hadronique et les forces nucléaires. Les sujets abordés par le groupe de physique théorique sont ainsi étroitement reliés de ceux des groupes expérimentaux du laboratoire.

La production scientifique en 2010/11 a été très substantielle, avec 67 publications, dont 39 dans des journaux avec comité de lecture. Les membres seniors du groupe ont aussi tenu des rôles prépondérants dans plusieurs workshops nationaux (GDRs QCD, LQCD, Terascale) et internationaux (Les Houches, From LHC to Future Colliders, Implications of LHC Results, etc.). De plus, quatre thèses ont été soutenues durant la période couverte par ce rapport.

Avec un nombre important de départs à la retraite ces dernières années, et le départ imprévu de deux membres permanents en 2011, le groupe de physique théorique subit en ce moment un processus de restructuration. En conséquence, le groupe focalise maintenant ses activités sur deux compétences principales : i) la QCD perturbative et les calculs de précision et ii) la théorie et la phénoménologie au-delà du Modèle Standard. Alors que les recherches menées concernent essentiellement la physique des collisionneurs, et ici en particulier la physique du LHC, il faut noter qu'une partie du travail aborde aussi l'astrophysique, à travers la quête de la matière noire.

QCD perturbative et calculs de précision

R. Bonciani, T. Jezo, M. Klasen, Z. Pan, I. Schienbein, T. Stavreva

LAPTH Annecy, Bielefeld U., SMU Dallas, Fermilab, Florida State U., Hamburg U., Hampton U., JLAB, Karlsruhe IT, Milano U., Mainz U., Mayence U., New York City-Tech., Rome III, Zurich U.

The research carried out in perturbative QCD spans a wide range of topics including predictions for inclusive B-meson production at the LHC in comparison with CMS data; global analyses of nuclear PDFs in the nCTEQ framework; the production of prompt photons in association with a heavy quark in pp, pA and AA collisions; and the diffractive production of jets in photon-proton collisions. Furthermore, precision calculations for various important processes are performed at two-loop accuracy. This includes contributions to the NNLO QCD corrections to top quark pair production; NNLO QCD corrections to semi-leptonic decays of B-mesons and virtual mixed QCD-electroweak corrections to Drell-Yan vector boson production.

Production de mésons B au LHC dans le GM-VFNS

Nous calculons la production inclusive de mésons B dans les collisions pp au LHC dans le «general-mass variable-flavor-number scheme» (GM-VFNS) à l'ordre NLO en QCD. Le GM-VFNS prend en compte les effets de la masse du quark b. Nous utilisons des fonctions de fragmentation non perturbatives et universelles que nous avons obtenues par analyse des données e^+e^- ainsi que des distributions de partons dans le proton fournies par la collaboration CTEQ. Nous comparons nos résultats pour la distribution d'impulsion transverse p_T et la distribution de la rapidité y du méson B à 7 TeV avec des données récentes de la collaboration CMS (voir Fig. 1). Nous trouvons un accord satisfaisant en particulier aux grandes impulsions p_T .

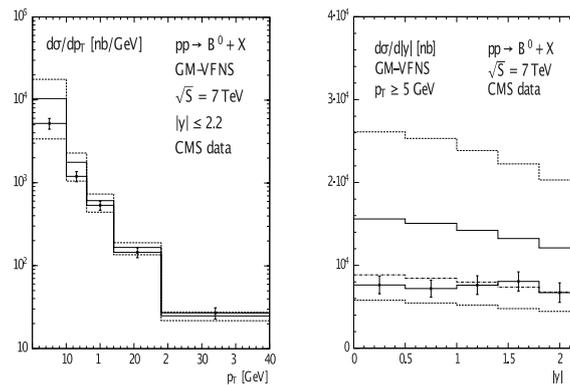


Fig. 1: Sections efficaces différentielles (a) $d\sigma/dp_T$ et (b) $d\sigma/d\eta$ pour $pp \rightarrow B^0 + X$ à l'ordre NLO dans le GM-VFNS, comparées avec des données de la collaboration CMS.

Production de Pairs Top-Antitop au LHC

La physique des quarks lourds (et en particulier du quark top) joue un double rôle dans le programme du LHC. D'un côté, elle représente un canal de découverte active pour la Nouvelle Physique (NP). Le quark top, la plus lourde des particules du Modèle Standard (SM), est une sonde unique de la dynamique qui brise la symétrie de jauge électrofaible. Si ce mécanisme diffère du mécanisme de Higgs du SM, des effets observables pourraient être trouvés premièrement dans la production et désintégration des quarks top, en se manifestant comme des écarts des couplages top-boson de jauge aux valeurs prédites par le SM. D'autre part, la production des quarks lourds constitue un bruit de fonds omniprésent pour la découverte de NP au-delà du SM.

Avec le grand nombre de quarks top qui devraient être produits au LHC dans sa phase de haute luminosité et haute énergie, l'étude de leurs propriétés va devenir «physique de précision», exigeant de la contrepartie théorique, le contrôle des corrections d'ordre supérieur dans la théorie perturbative des interactions fortes (QCD). Particulièrement importante est l'inclusion, dans l'analyse théorique, des corrections à l'ordre NNLO pour des observables clés, comme par exemple la section efficace de production, les distributions en masse invariante et en impulsion transverse. Une partie importante des corrections au NNLO pour le processus de production de top-antitop consiste à évaluer les éléments de matrice à deux boucles. Ceci est le sujet d'un projet en cours. Nous avons fourni, jusqu'à présent, des expressions analytiques pour les corrections de QCD à deux boucles qui impliquent des boucles fermioniques et celles dominantes en couleur, au processus de production de paires de quarks lourds dans le canal quark-antiquark et les corrections dominantes en couleur pour le canal de fusion de gluons. Récemment, nous avons terminé, dans ce canal, l'évaluation des corrections qui font intervenir des quarks légers.

La technique utilisée pour le calcul analytique des corrections se compose de trois étapes. i) Après avoir effectué les algèbres de Dirac et de couleur, le module carré de l'amplitude est exprimé en termes de nombreuses (des milliers d') intégrales scalaires dimensionnellement régularisées. ii) Ces intégrales scalaires ne sont pas toutes indépendantes, et, en utilisant les relations appropriées (identités d'intégration par parties), elles sont réduites à une combinaison d'un certain nombre (petit) d'intégrales indépendantes, appelées « Master Integrals ». iii) Les Intégrales Master sont donc évaluées analytiquement en termes de polylogarithmes harmoniques généralisés, en utilisant des équations différentielles. Une fois que le module carré de l'amplitude est connu analytiquement, on peut l'évaluer numériquement très rapidement, en utilisant des routines en Fortran ou en C++. Par exemple, dans la figure 2 on peut voir la surface qui représente la partie finie du coefficient dominant en couleur à deux boucles dans le canal gg .

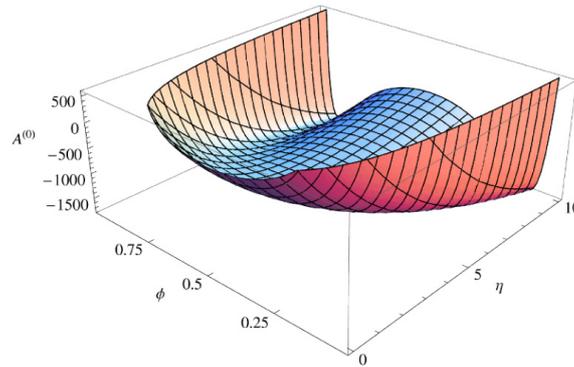


Fig. 2: Surface représentant la partie finie du coefficient dominant en couleur pour le processus $gg \rightarrow t\bar{t}$.

Désintégration Semileptonique de Quarks Lourds

Les mesures de désintégration semileptonique inclusive des mésons B permettent une détermination précise des éléments $|V_{ub}|$ et $|V_{cb}|$ de la matrice CKM, importants pour l'étude de la violation de CP dans le secteur des quarks. Cette précision dans la mesure nécessite de la contrepartie théorique, le calcul des corrections à l'ordre NNLO aux distributions de désintégration différentielles, à partir desquelles il est possible de dériver des prévisions pour les taux de désintégration partielle avec des coupures expérimentales arbitraires.

Le taux de désintégration du méson B est décrit par un « Operator Product Expansion (OPE) » local en puissances inverses de la masse du quark b . A l'ordre dominant en $1/m_b$, le taux de désintégration du méson B est équivalent au taux de désintégration d'un quark b sur couche de masse, ce qui peut être calculé en théorie des perturbations.

Nous avons fourni, jusqu'à présent, une expression analytique pour les corrections au processus de désintégration $b \rightarrow uW^*$ à deux boucles en QCD, où b et u sont respectivement des quarks massif et sans masse, et W^* est un boson faible hors couche de masse, qui se désintègre ensuite en une paire lepton anti-neutrino. Ces résultats sont une première étape vers un calcul entièrement analytique des distributions différentielles pour les désintégrations semileptoniques sans charme des mésons B . Les corrections réelles à la transition lourds-légers sont actuellement à l'étude. Ceci complétera les corrections à l'ordre NNLO et donnera la possibilité d'exploiter la phénoménologie du processus. La désintégration semileptonique est inclusive par rapport à la radiation des partons en QCD. Par conséquent, pour le calcul des diagrammes réels, on peut utiliser la technique introduite pour les diagrammes virtuels (réduction aux Master Integrals et leur intégration analytique en utilisant les équations différentielles), appliquée aux diagrammes « coupés ».

Le calcul des éléments de matrice de la désintégration semileptonique des mésons B est également utile pour la finalisation des corrections à l'ordre NNLO pour la production de paires top antitop, dans le cas où les produits de désintégration du quark top sont considérés dans l'analyse.

Production Drell-Yan de bosons vecteur W et Z

La production de Drell-Yan de Z et W est un processus fondamental pour un test précis du Modèle Standard aux collisionneurs hadroniques, car il a une section efficace grande et il est très sensible aux propriétés des bosons de jauge. En particulier, la production Drell-Yan de bosons W est importante pour la détermination de la masse du W (à partir des distributions en masse transverse et en p_T) qui devrait être mesurée au Tevatron avec un $\Delta m_W \sim 15$ MeV et au LHC encore plus précisément ($\Delta m_W \sim 7$ MeV). Par ailleurs, le Drell-Yan est un processus de bruit de fond pour la recherche de NP, comme par exemple la production de nouvelles résonances vectorielles, W' et Z' . Enfin, il peut être utilisé pour la détermination de la luminosité du collisionneur, car il est théoriquement très bien connu. Pour toutes ces raisons, nous avons besoin d'une prévision théorique précise et fiable de la section efficace et des distributions du mécanisme de production de Drell-Yan.

L'impact le plus grand sur les distribution concernant le processus $p\bar{p} \rightarrow W l \nu$, et donc sur la détermination de la masse du W , provient du rayonnement de QCD d'état initial (ISR) avec rayonnement de QED d'état final (FSR) ou des corrections réel-virtuel (factorisables). Cependant, au niveau de la précision requise ($\Delta m_W \sim 10$ MeV), même les corrections mixtes QCD-EW, qui ne sont pas connues actuellement dans la littérature, peuvent être importantes. Ce genre de corrections est également important pour la stabilisation de la dépendance en l'échelle de renormalisation/factorisation.

Nous avons récemment évalué les corrections virtuelles QCD-EW (deux boucles) à la production de Z et W résonants. Le calcul a été fait en utilisant la même technique expliquée pour la production top-anti-top : réduction aux Master Integrals et leur évaluation en utilisant les équations différentielles. Nous sommes maintenant en train de calculer les corrections réelles, en utilisant les diagrammes coupés, afin d'en déduire les corrections QCD-EW à la section efficace de production.

Photoproduction diffractive de jets

Alors que les nouvelles données de H1 sur la photoproduction diffractive des dijets, qui recouvrent en partie les données plus anciennes de H1 ainsi que les données récemment publiées par la collaboration ZEUS, ont été publiées, nous avons recalculé la section efficace de ces processus à l'ordre sous-dominant en QCD perturbative afin de voir si elles pouvaient être interprétées de façon cohérente. Les résultats de ces calculs sont comparés aux données des deux collaborations. Nous observons que les sections efficaces à l'ordre sous-dominant ne sont pas en accord avec les données, ce qui montre que la factorisation n'est plus valable à cet ordre. Si les contributions directes et résolues sont toutes les deux réduites de la même quantité, le facteur de réduction global dépend des coupures en énergie transverse. Cependant, en ne réduisant que les contributions résolues, et en considérant un facteur de réduction indépendant de ces coupures, un accord raisonnable avec toutes les données est obtenu.

Distributions de partons nucléaires (nPDF)

Nous étudions les fonctions de distributions de partons (PDF), notamment les PDF dans des noyaux (nPDF), dans le cadre d'une collaboration internationale avec quelques membres de la très connue collaboration CTEQ. Notre projet s'appelle nCTEQ et le groupe théorique du LPSC joue un rôle de premier plan dans ces efforts. Les missions principales de cette collaboration sont (i) les analyses globales des distributions de partons dans les noyaux (nPDF), (ii) l'extraction des corrections nucléaires dont la connaissance est nécessaire dans plusieurs applications et (iii) l'identification de processus durs au LHC pour mieux contraindre les nPDF, notamment la distribution du gluon qui est très mal connue. La collaboration bénéficie de financements externes, d'une part grâce à un projet PEPS PTI pour renforcer le lien entre des théoriciens (LAPTH, LPSC) et des expérimentateurs (LPSC, Subatech) travaillant sur la physique des plasmas de quarks et de gluons, et d'autre part à travers un projet PICS France-USA.

En 2010-2011 nous avons fait des progrès notables dans les directions suivantes :

- Mise à disposition des PDFs nCTEQ.

Nous avons créé un site internet décrivant le projet nCTEQ (<http://projects.hepforge.org/ncteq/>) avec des informations sur notre travail. Notamment, les différentes analyses globales que nous avons effectuées sont accessibles par le public. Les ensembles de PDFs nucléaires nCTEQ peuvent désormais être utilisés pour faire des prédictions pour des sections efficaces dans les collisions IA, νA , pA et AA.

- Corrections nucléaires dans la diffusion profondément inélastique νA .

Dans ce travail nous avons effectué des analyses globales en χ^2 , en utilisant des données de la diffusion profondément inélastique neutrino-noyau (νA DIS), lepton chargé-noyau (IA DIS) et du processus Drell-Yan (DY). Pour étudier la compatibilité de la DIS neutrino avec la DIS IA, les données νA ont été incluses avec des facteurs de pondération w ($w=0, 1/7, 1/2, 1$ et ∞). La figure 2 montre que les corrections nucléaires en DIS νA ne sont pas compatibles avec les prédictions basées sur les données de DIS IA et du processus DY. Nous avons quantifié ce résultat en utilisant un critère pour tester des hypothèses, basé sur la distribution de probabilité de la fonction χ^2 . Notamment, ce critère a été appliqué au χ^2 total ainsi qu'au χ_i^2 des ensembles de données individuels et nous avons trouvé que ce n'est pas possible d'accommoder les données de DIS νA et de DIS IA par une adaptation combinée acceptable. Notre résultat a de fortes implications sur l'extraction des PDF dans les noyaux et le proton, en utilisant les données.

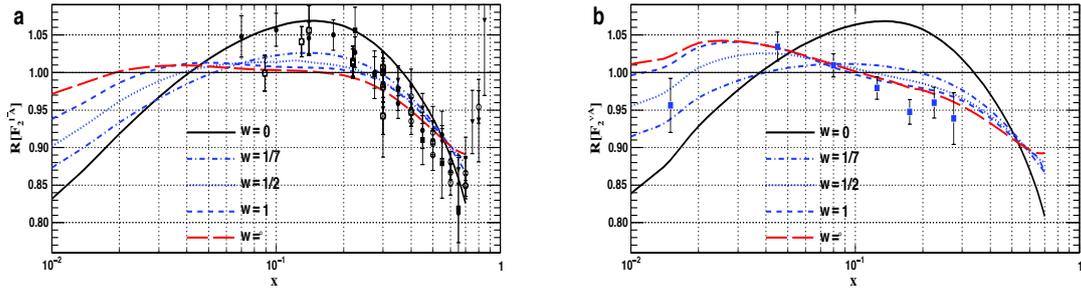


Fig. 3: Facteurs de correction nucléaire pour (a) la fonction de structure F_2 en diffusion profondément inélastique l^\pm -Fe et (b) la fonction de structure F_2 en diffusion profondément inélastique ν -Fe en fonction de x .

- La production d'un photon en association avec un quark lourd à l'ordre NLO en QCD.

Nous travaillons sur la production d'un photon en association avec un quark lourd dans les collisions hadroniques à l'ordre NLO en QCD. La phénoménologie de ce processus est très différente selon l'état initial (collisions pp, pA, AA). Nous avons publié un article montrant que le mode pA est très utile pour contraindre la distribution des gluons dans les noyaux, qui est très mal connue (voir Fig. 3). Une meilleure connaissance de cette distribution gluonique est cruciale pour la physique du plasma de quarks et gluons (QGP). En collisions pp, la production de $\gamma+Q$ est sensible au contenu intrinsèque du nucléon en charme/bottom. En revanche, le processus $AA \rightarrow \gamma+Q$ est extrêmement intéressant pour étudier la perte d'énergie des quarks lourds traversant le QGP. Des résultats préliminaires ont été présentés à plusieurs conférences (Quark Matter 2011, EPS-HEP 2011, GDR QCD).

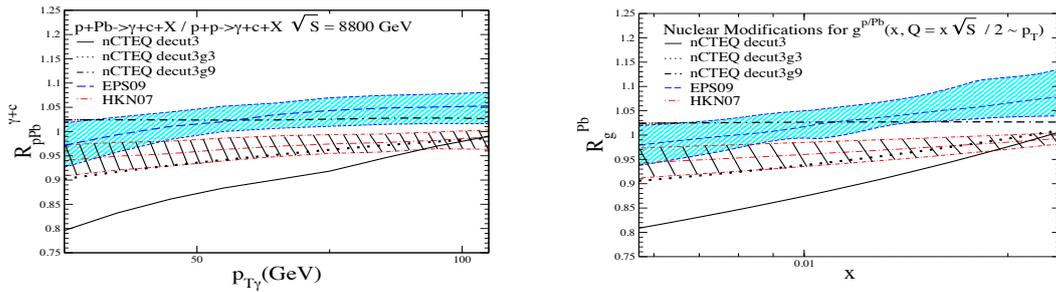


Fig. 4: À gauche: Rapport de distributions p_{T_γ} dans les collisions p-Pb et p-p au LHC en utilisant différents ensembles de PDF nucléaires. À droite: Rapport de distribution du gluon dans le Pb avec la distribution du gluon dans le proton en fonction de x , dans la région de x sondée au LHC.

Au-delà du Modèle Standard

J. Debove, S. Fichet, M. Klasen, S. Kraml, S. Kulkarni, Q. Le Boulc'h, A. Wingarter

CERN, LAPTH Annecy, IPHC Strasbourg, Bonn U., Bucarest U., IPPP Durham, DESY Hambourg, SINP Moscow, Oxford U., Zurich U., Fermilab, Florida State U., Hawaii U., Oklahoma U.

Beyond-the-Standard-Model (BSM), in particular supersymmetry (SUSY), phenomenology has become another major activity of the group. The research carried out concerns in part precision calculations for production and decay of new particles at the LHC and elsewhere; this naturally has a large overlap with the activities in SM precision calculations described just before. Furthermore, it concerns working out the precise phenomenology of theoretically well-motivated SUSY scenarios and the signatures to look for them. Here we have mainly been working on scenarios inspired by grand-unified theories (GUTs) and/or dark matter models. We have studied a variety of SUSY dark matter candidates and performed precision calculations including SUSY flavour violation. Finally, an important effort has been directed into working out the implications of LHC results for BSM theories.

Phénoménologie auprès des collisionneurs (LHC)

Resommation au seuil et jointe pour la production de jauginos

Nous avons présenté une analyse complète des effets de resommation au seuil sur la production directe de paires de jauginos légers et lourds au Tevatron et au LHC. En se basant sur des calculs perturbatifs à l'ordre sous-dominant en SUSY-QCD, qui incluent également les effets de mélange des squarks, nous resomons les radiations de gluons mous dans la région du seuil, aux ordres logarithmiques dominants et sous-dominants, en conservant également les corrections complètes SUSY-QCD dans les fonctions de coefficients finis. Cela nous permet d'associer correctement les sections efficaces resommée et perturbative. Les termes logarithmiques universels sous-dominants sont resommés dans leur forme matricielle complète. Nous observons que la resommation au seuil augmente et stabilise considérablement le spectre de masse invariante et les sections efficaces totales par rapport au calcul à l'ordre sous-dominant. Nous donnons les sections efficaces totales ainsi que leurs erreurs théoriques pour plusieurs points SUSY fréquemment étudiés, ainsi que pour diverses paires de jauginos et différentes énergies de collisionneurs hadroniques.

Dans la publication suivante, nous calculons la production directe de paires de jauginos aux collisionneurs hadroniques à l'ordre NLO, en resommant les grands termes logarithmiques à la fois dans les régions à faible moment transverse et au seuil, à l'ordre logarithmique sous-dominant. Les prédictions numériques sont présentées pour les spectres de moment transverse et de masse invariante ainsi que pour les sections efficaces totales, et comparées aux résultats obtenus à ordre fixé et avec une resommation faite uniquement dans l'une de ces régions. Nous observons que nos nouveaux résultats sont en général en bon accord avec les précédents, mais souvent encore plus précis.

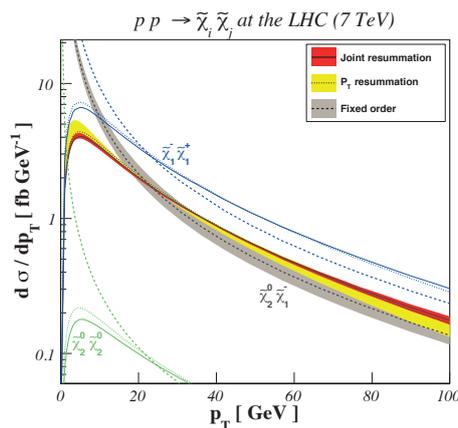


Fig. 1: Distribution d'impulsion transverse pour les paires de jauginos légers au LHC, avec une énergie dans le centre de masse de 7 TeV, respectivement à ordre fixé (en traits discontinus), ainsi qu'avec resommation en impulsion transverse (en pointillés) et jointe (traits pleins).

Tester la SUSY avec couplages Yukawa unifiés: le rôle des jets de b multiples, des dileptons et de l' E_T manquante

Les modèles de Théories de Grande Unification supersymétriques simples basés sur le groupe de jauge SO(10) exigent l'unification des couplages de Yukawa t-b- τ , en plus de l'unification des couplages de jauge. L'unification des couplages de Yukawa pose des contraintes fortes sur le spectre de masse attendu des superparticules, avec des masses de scalaires ~ 10 TeV alors que les gluinos sont beaucoup plus légers: par préférence dans l'intervalle 300-500 GeV.

Au Tevatron, les squarks très lourds suppriment l'interférence négative pour la section efficace de $q\bar{q} \rightarrow \text{gluino gluino}$, menant à une grande augmentation des taux de production. Les gluinos se désintègrent presque toujours via des modes à trois corps en une paire de quarks b, donc nous attendons au moins quatre jets de b par évènement de signal. Nous avons étudié la capacité du collisionneur Tevatron du Fermilab à détecter la production de paires de gluinos en SUSY avec Yukawa unifiés. En se restreignant aux évènements avec beaucoup d'énergie transverse (E_T) manquante et avec plus de 2 ou 3 jets de quarks b identifiés, nous trouvons un excès atteignable de 5σ avec $m(\text{gluino}) \sim 400 \text{ GeV}$ pour 5 fb^{-1} de données. Ce domaine de $m(\text{gluino})$ est bien au-delà de la portée des recherches conventionnelles de SUSY au Tevatron, et devrait permettre d'exclure une bande significative dans la région la plus favorisée de l'espace des paramètres des modèles de SUSY avec Yukawa unifiés.

Nous avons également étudié les possibilités de tester les modèles SO(10) supersymétriques avec Yukawa unifiés pendant la première année du LHC fonctionnant à $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$. Nous considérons deux modèles: le Higgs splitting (HS) et le D-term splitting (DR3). Tous deux prédisent génériquement des gluinos légers et des squarks lourds, avec une hiérarchie de masse inversée pour les scalaires. Nous attendons donc de forts taux de production de paires de gluinos suivis par des désintégrations vers les états finaux avec un grand nombre de jets de b. Pour une luminosité intégrée de $0,2 \text{ fb}^{-1}$, nous trouvons une découverte à 5σ atteignable pour $m(\text{gluino}) \sim 400 \text{ GeV}$ même si l'énergie transverse manquante, $E_{T\text{miss}}$, n'est pas une variable de coupure possible, en examinant les multiples jets de b de l'état final. Un signal concordant devrait ressortir dans le canal dimuon de signe opposé (OS) dans le cas du modèle HS; le modèle DR3 demande des luminosités intégrées supérieures pour fournir un signal dans le canal dimuon OS. Cette région peut aussi être sondée par le Tevatron avec $5\text{-}10 \text{ fb}^{-1}$ de données, si une recherche équivalente dans le canal multi-b+ $E_{T\text{miss}}$ est effectuée. Avec une luminosité intégrée de 1 fb^{-1} , et en utilisant l' $E_{T\text{miss}}$ plus un grand nombre de jets de b, le LHC devrait pouvoir découvrir la SUSY avec Yukawa unifiés pour $m(\text{gluino})$ jusqu'à 630 GeV .

Les recherches de SUSY avec Yukawa unifiés avec les données de la première année du LHC devraient donc être suffisantes soit pour prétendre à une découverte du gluino, soit pour exclure presque entièrement cette classe de modèles, étant donné que de plus grandes valeurs de $m(\text{gluino})$ mènent à une moins bonne unification des Yukawa.

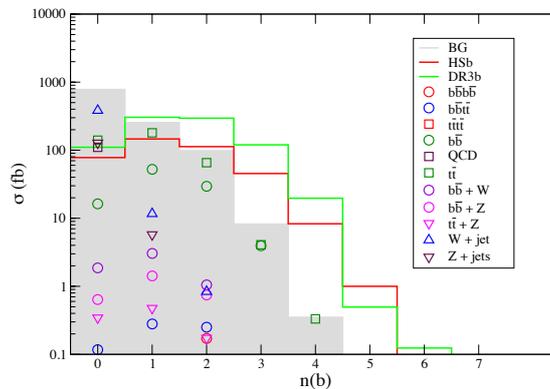


Fig 2: Nombre de jets de b après coupures pour des « benchmark » scénarios HS et DR3, ainsi que le bruit de fond.

La Supersymétrie Effective au LHC

Nous étudions la phénoménologie des modèles de Supersymétrie Effective (ESUSY), dans lesquels les jauginos électrofaibles et la troisième génération de scalaires ont des masses allant jusqu'à environ 1 TeV , tandis que les scalaires de première et de deuxième génération ont des masses de plusieurs TeV . De tels modèles améliorent les problèmes de saveur et de CP en SUSY via une solution de découplage, tout en maintenant la naturalité. Dans notre analyse, nous supposons des paramètres de masse à l'échelle de GUT indépendants pour la troisième et la première/deuxième génération de scalaires et pour les Higgs scalaires, en plus de $m_{1/2}$, $\tan\theta$ et A_0 , et exigeons comme d'habitude la brisure radiative de la symétrie électrofaible. Nous analysons l'espace des paramètres qui est en accord avec les contraintes actuelles, au moyen d'un balayage par Markov Chain Monte Carlo. La particule la plus légère du MSSM (LMP) est le plus souvent, mais pas toujours, le neutralino le plus léger; de plus la densité relique thermique du neutralino LMP est souvent très grande. Ces modèles peuvent être parfaitement viables phénoménologiquement si, avant la nucléosynthèse, la LMP se désintègre en axino plus des particules du SM. La matière noire est alors un mélange axion/axino. Au LHC, les mécanismes de production les plus importants sont la production de gluinos (pour $m_{1/2} < 700 \text{ GeV}$) et la production de squarks de la troisième génération, tandis que les évènements SUSY riches en jets de b sont la caractéristique distinctive du scénario ESUSY. Nous présentons un ensemble de points de références de ESUSY ayant des particularités caractéristiques, et discutons de leur phénoménologie au LHC.

Flavour Les Houches Accord: interface de codes en lien avec la saveur

Nous étions fortement impliqués dans le développement du «Flavour Les Houches Accord (FLHA)», qui spécifie un unique ensemble de conventions pour les paramètres et observables liés à la saveur. Le FLHA utilise la structure de fichiers générique du SUSY Les Houches Accord (SLHA). Il définit les masses pertinentes du Modèle Standard, coefficients de Wilson, constantes de désintégration, paramètres «bag», observables de saveur, etc. L'accord fournit une interface universelle et indépendante des modèles entre des codes évaluant et/ou utilisant des observables liées à la saveur.

Implications du «fine-tuning» pour les recherches complémentaires de matière noire et de SUSY au LHC

La nécessité que la SUSY résolve le problème de hiérarchie sans ajustement fin excessif pose des contraintes sérieuses sur les nouveaux états supersymétriques. Avec le spectre du MSSM et la brisure de la SUSY provenant de masses universelles pour les scalaires et jauginos à l'échelle de Grande Unification, nous montrons que les régions faiblement ajustées se répartissent en deux classes qui demandent des recherches complémentaires de matière noire et en accélérateur pour être explorées dans un futur proche. La première classe a des gluinos ou squarks relativement légers, qui devraient être trouvés par le LHC à son premier run. Nous identifions le signal multijet plus E_T^{miss} comme étant le canal optimal et déterminons le potentiel de découverte au premier run. La seconde classe a des gluinos et des squarks plus lourds mais la LSP a une composante Higgsino significative et devrait être détectée par la prochaine génération d'expériences de détection directe de la matière noire. Les informations combinées du run à 7 TeV du LHC et de la prochaine génération d'expériences de détection directe de matière noire permettent de sonder presque tout l'espace des paramètres du CMSSM en accord avec les contraintes électrofaibles et les contraintes sur la matière noire, correspondant à un ajustement fin d'au plus 1:100. Couvrir complètement la région faiblement ajustée, par les recherches de SUSY au LHC nécessiterait une énergie de 14 TeV au CM; par ailleurs cela pourrait être testé indirectement par les recherches de Higgs pour des masses inférieures à 120 GeV.

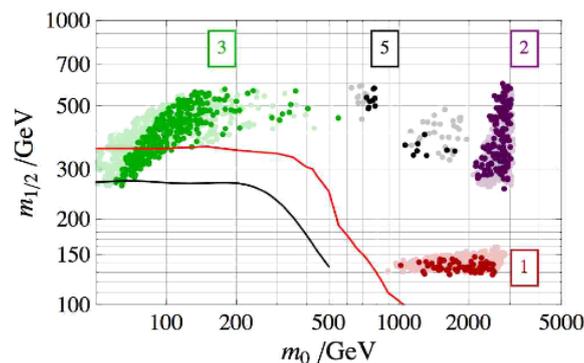


Fig. 3: Régions faiblement ajustées dans le CMSSM.

La matière noire sous forme de sneutrinos légers au LHC

Dans les modèles supersymétriques (SUSY) avec des masses de Dirac pour les neutrinos, un terme trilineaire A qui n'est pas proportionnel aux faibles couplages de Yukawa des neutrinos peut induire un important mélange entre les sneutrinos de chiralité gauche et droite. L'état propre de masse le plus léger du sneutrino peut alors devenir la particule SUSY la plus légère (LSP) et un candidat à la matière noire viable. En particulier, il peut être un excellent candidat pour la matière noire légère, avec une masse de l'ordre ou en dessous de ~ 10 GeV. Un tel sneutrino léger LSP a un effet très important sur les signatures de la SUSY au LHC, étant donné que les charginos se désintègrent principalement en un sneutrino léger plus un lepton chargé, et que les neutralinos se désintègrent de façon invisible en un neutrino plus un sneutrino. Nous procédons à une étude détaillée du potentiel du LHC à déterminer ce scénario de matière noire sous forme de sneutrinos légers au moyen de trois points benchmark représentatifs, ayant différentes hiérarchies de masse pour les gluinos et les squarks. Nous étudions en particulier la détermination de la masse de la LSP (le sneutrino) à partir de désintégrations en cascade impliquant des charginos, en utilisant la variable m_{T2} . De plus, nous abordons les mesures des sparticules invisibles additionnelles, dans notre cas le neutralino léger, et la question de la discrimination avec le MSSM.

Implications des bornes de stabilité et de trivialité du Modèle Standard avec trois et quatre générations chirales

Nous revisitons les bornes de stabilité et de trivialité à la masse du boson de Higgs dans le contexte du Modèle Standard avec trois et quatre générations (SM3 et SM4, respectivement). À la lumière des résultats récents du LHC, la borne de trivialité du SM3 est devenue obsolète, et la borne de stabilité implique, pour une masse du Higgs par exemple de $m_H = 115$ GeV, l'apparition d'une nouvelle physique avant 650 TeV, alors qu'il n'y a pas de limite

pour $m_H > 133$ GeV. Pour le SM4, les courbes de stabilité et de trivialité se croisent et bornent une région finie. En conséquence, les fermions de la quatrième génération posent des limites théoriques fortes sur la masse du Higgs, et il existe une échelle maximale au-delà de laquelle la théorie ne peut plus être valide perturbativement. Nous trouvons que la masse du Higgs ne peut excéder 700 GeV quelles que soient les masses des fermions de quatrième génération. En renversant l'argument, l'absence de signal de Higgs pour $m_H < 600$ GeV exclut une quatrième génération avec des masses de quarks en dessous de 300 GeV et des masses de leptons en dessous de 350 GeV. En particulier, les bornes des quarks restent valides pour les scénarios à faible mélange pour lesquels les limites directes du Tevatron et du LHC ne s'appliquent pas, et les bornes sur les leptons que nous obtenons sont plus fortes que les limites des collisionneurs. Si un boson de Higgs plus léger que 700 GeV n'est pas observé, une quatrième génération de fermions chiraux avec des couplages de Yukawa perturbatifs sera par conséquent exclue pour l'ensemble de l'intervalle des paramètres.

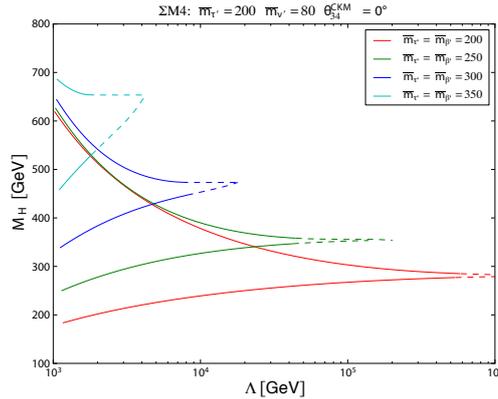


Fig. 4: Limite de stabilité et de trivialité pour le SM4, en fonction de l'échelle de coupure Λ . Les courbes en pointillés indiquent le domaine à partir duquel au moins l'un des couplages de Yukawa devient non perturbatif.

Interprétation des recherches de SUSY au LHC dans le MSSM « phénoménologique »

Nous interprétons dans le cadre du MSSM phénoménologique (pMSSM) les résultats des recherches de SUSY publiées par la collaboration CMS, basés sur un premier ~ 1 fb⁻¹ de données acquises pendant le run à 7 TeV du LHC en 2011. Le pMSSM est une paramétrisation à 19 dimensions du MSSM qui contient la plupart de ses aspects phénoménologiques. Il inclut une large gamme de modèles SUSY davantage contraints, et va au-delà. En procédant à une analyse bayésienne globale, nous obtenons les densités de probabilité des paramètres, masses et observables. Contrairement aux contraintes dérivées pour un schéma de brisure de SUSY particulier, comme le CMSSM, nos résultats fournissent des conclusions assez génériques sur les contraintes apportées au MSSM par les données disponibles à ce jour. Ils permettent aussi de voir comment les limites dépendent des relations entre les masses des particules supersymétriques.

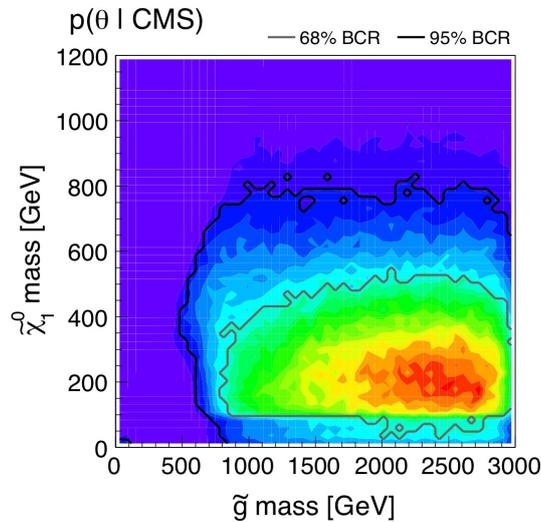


Fig. 5: Densités 2D postérieures marginalisées pour la masse du gluino en fonction de la masse du neutralino. Les contours gris et noir délimitent respectivement les régions de confiance bayésienne de 68% et 95%.

Théories de Grande Unification

Théories de Grande Unification supersymétriques avec matrice de Higgs dégénérée

Certaines théories de Grande Unification supersymétriques prédisent que la matrice de masse des Higgs devrait être dégénérée à l'échelle de Grande Unification. Nous étudions quelques réalisations de tels modèles, et analysons les implications de cette condition particulière pour la phénoménologie du MSSM à basse énergie. À cette fin, nous explorons l'espace des paramètres en accord avec les contraintes expérimentales avec une analyse par chaîne de Markov.

Génération du mélange tribimaximal par les petits groupes

Les données expérimentales actuelles sur les neutrinos sont en bon accord avec l'hypothèse de mélange tribimaximal, et pourraient indiquer la présence d'une symétrie de famille. Pour 76 des groupes de saveurs, nous procédons à un balayage systématique pour des modèles ayant comme contenu en particules celui du Modèle Standard avec jusqu'à trois champs flavons, avec un Lagrangien effectif contenant tous les termes de dimension de masse ≤ 6 . Nous trouvons que 44 de ces groupes peuvent être en accord avec les données à 3σ , et que 38 groupes peuvent être basés sur des modèles tribimaximaux. Pour un groupe particulier, nous étudions les corrélations entre angles de mélange et faisons une prédiction pour θ_{13} vérifiable dans un futur proche. Nous présentons les détails d'un modèle avec $\theta_{12} = 33,9$; $\theta_{23} = 40,9$; $\theta_{13} = 5,1$ pour montrer qu'il est facilement possible de s'accommoder des timides indices récents en faveur d'un θ_{13} différent de zéro. Le plus petit groupe avec mélange tribimaximal est T7. Nous affirmons que T7 et T13 sont aussi appropriés que A4 pour produire un mélange tribimaximal, et devraient donc être mis sur un pied d'égalité. Nous présentons dans les appendices quelques méthodes et résultats mathématiques qui pourraient être utiles à l'avenir pour la construction de modèles.

Le problème de saveur supersymétrique dans les théories de Grande Unification en 5D et ses conséquences pour la phénoménologie au LHC

Nous étudions des modèles supersymétriques avec une dimension supplémentaire à l'échelle de GUT, dans lesquels les champs de Higgs et le secteur caché de brisure SUSY sont tous deux localisés sur une brane 4D. La localisation exponentielle des fonctions d'ondes permet de donner une structure hiérarchique aux fonctions d'ondes et aux termes de brisure. Une telle structure permet à la fois d'expliquer naturellement la hiérarchie des masses et des angles de mélange du Modèle Standard et le problème de saveur supersymétrique. Nous étudions deux sources naturelles de brisure SUSY – la médiation par radion et par champs de branes – et effectuons une étude numérique détaillée, tenant rigoureusement compte de la prolifération des coefficients d'ordre 1 qui apparaissent dans ce genre de modèle. Il apparaît que des hypothèses supplémentaires sont nécessaires pour échapper aux contraintes de violation de saveur. Les régions favorables de l'espace des paramètres sont ensuite analysées en terme de phénoménologie au LHC. De façon générique, les gluinos et les squarks sont au-delà des limites actuelles du LHC dans ces régions.

Phénoménologie de la Matière Noire

Les sneutrinos légers mélangés comme candidat à la matière noire thermique

Dans les modèles supersymétriques avec des masses de Dirac pour les neutrinos, un sneutrino mélangé entre état gauche et droit peut être un candidat viable à la matière noire. Nous étudions la portion de l'espace des paramètres MSSM+ ν_R où c'est le cas, en nous intéressant plus particulièrement aux sneutrinos légers, avec des masses en dessous de 10 GeV. Nous examinons les implications pour les recherches directe et indirecte de matière noire, en prenant en compte les incertitudes appropriées, ainsi que les conséquences pour la phénoménologie en accélérateur (voir aussi ci-dessus).

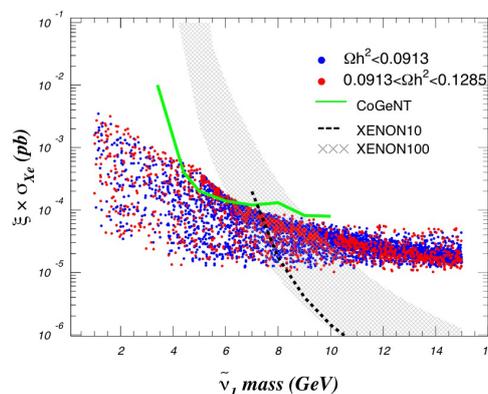


Fig. 6: Section efficace de diffusion de la matière noire sneutrino sur Xe, remise à l'échelle, dans la gamme de masse 1-15 GeV. Les points rouges (bleus) représentent les modèles qui ont une densité relicue à l'intérieur (au-dessous) de l'intervalle donné par WMAP. Les limites provenant de CoGeNT (en vert), Xenon10 (en pointillés), et Xenon100 (croix, avec la variation due à l'incertitude de L_{eff}).

Réconcilier la leptogénèse thermique avec le problème des gravitinos dans les modèles SUSY avec une matière noire mélangée axion/axino

Réussir l'implémentation de la leptogénèse thermique demande une température de réchauffement post-inflation T_R supérieure à $\sim 2 \cdot 10^9$ GeV. Une valeur aussi haute de T_R conduit généralement à une surproduction de gravitinos dans l'univers primordial, ce qui est problématique principalement vis-à-vis des contraintes de la nucléosynthèse primordiale (Big Bang Nucleosynthesis, BBN). Nous montrons que, dans le contexte du MSSM augmenté par Peccei-Quinn (PQMSSM), une matière noire mélangée axion/axino peut réconcilier la leptogénèse thermique avec le problème des gravitinos.

Dans une première étape, nous étudions des modèles où $m(\text{gravitino}) \geq 30$ TeV. Nous calculons la production de matière noire sous forme d'axions et axinos depuis quatre sources, et imposons les contraintes de la BBN sur les gravitinos et neutralinos ayant une longue durée de vie. De plus, nous étudions plusieurs modèles SUSY qui ont naturellement des masses de gravitino de l'ordre de quelques dizaines de TeV. Il est nécessaire d'avoir une échelle de brisure de la symétrie Peccei-Quinn plutôt haute et un angle de désalignement initial $\theta_i < 1$. Nous trouvons néanmoins que la réconciliation est difficile en SUSY avec Yukawa unifiés et en AMSB avec un neutralino le plus léger principalement wino. Cependant, $T_R \sim 10^{10} - 10^{12}$ GeV peut facilement être réalisé en «SUSY effective» et dans les modèles basés sur la médiation mélangée anomalie/modules.

Asaka et Yanagida (AY) ont proposé que ces deux résultats puissent être réconciliés dans le contexte du MSSM augmenté par Peccei-Quinn (PQMSSM) si nous adoptons une hiérarchie de masse $m(\text{sparticle}) > m(\text{gravitino}) > m(\text{axino})$, avec $m(\text{axino}) \sim \text{keV}$. Nous calculons l'abondance relique du mélange axion/axino de matière noire dans le scénario AY, et nous étudions sous quelles conditions nous pouvons générer une valeur de T_R suffisante pour la leptogénèse thermique. Il est nécessaire d'avoir une grande valeur de l'échelle de brisure PQ f_a pour éviter la surproduction d'axinos, tandis qu'un petit angle de désalignement du vide θ_i est nécessaire pour éviter la surproductions d'axions. La grande valeur de f_a conduit à des désintégrations tardives de neutralinos. Pour éviter les contraintes de la BBN, le scénario AY demande une faible abondance thermique de neutralinos et des neutralinos assez massifs. Nous incluons la production d'entropie provenant de la désintégration tardive de saxions, et trouvons que le saxion doit être en général au moins plusieurs fois plus lourd que le gravitino.

Dans ce scénario, les conséquences incluent :

- le fait que l'éventuelle découverte de la SUSY par le LHC devrait être en accord avec les modèles de SUSY dans lesquels le gravitino a une grande masse,
- une densité relique apparente de neutralinos $\Omega h^2 > 1$ si le gravitino est lourd, mais assez faible dans le scénario AY,
- pas de détection de WIMP par détection directe ou indirecte, et
- la masse de l'axion devrait être inférieure à $\sim 10^{-6}$ eV, quelque peu en dessous de l'intervalle conventionnel exploré par les expériences de détection d'axions par cavités micro-ondes.

Impact de la violation de la saveur sur la matière noire

Nous étudions l'influence sur la densité relique de matière noire de nouvelles sources de violation de saveur dans le secteur des squarks des modèles supersymétriques. Nous montrons que la présence de termes de violation de saveur non minimale dans les matrices de masse des squarks peut avoir un impact important sur la moyenne thermique de la section efficace de (co)annihilation des neutralinos, et peut en conséquence modifier leur densité relique prédite. Les différents effets présents sont discutés et une étude numérique de l'annihilation et de la coannihilation des neutralinos dans ce contexte est présentée. Nous discutons également la phénoménologie au LHC des scénarios correspondants.

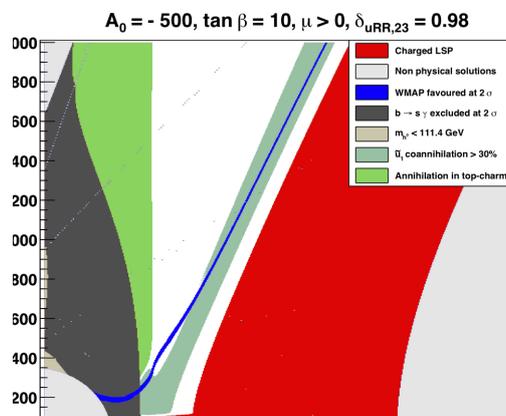


Fig. 7: Différentes contraintes (y compris la mesure de la densité relique de matière noire par l'expérience WMAP7) représentées dans le plan $(m_0, m_{1/2})$ du CMSSM avec violation de saveur non minimale. La violation de saveur entraîne l'apparition de nouvelles régions dans lesquelles la densité relique est correcte, grâce à des processus de coannihilation neutralino-stop, et d'annihilation de neutralino en quarks top et charm.

Calculs sur réseau

J.-C. Anglès-d'Auriac, J. Carbonell, V. Drach, X. Du, P.-A. Harraud, M. Mangin-Brinet, M. Papinutto
 European Twisted Mass Collaboration, DESY Zeuthen, Université de Chypre, CEA/Saclay, LPT/Orsay, LPC/Clermont,
 Universidad P. de Olavide (Séville), Universidad de Huelva

We report the progress in the study of hadron physics and nuclear forces by using lattice QCD and other lattice field theory approaches. Part of this studies have been performed in collaboration with other members of the European Twisted Mass Collaboration (ETMC). Thanks to the new program of simulations with $N_f=2+1+1$ dynamical flavours (degenerate up and down quarks + strange and charm quarks) developed by ETMC, we have computed the spectrum of light and heavy-light pseudoscalar mesons and of light baryons ($SU(3)$ octet and decuplet). We have also started the study of charmed/strange baryons with $N_f=2$ dynamical simulations (where the strange and charm quarks are considered only as valence quark). A considerable effort has been dedicated to the study of the structure of the nucleon (electromagnetic and axial form factors, moments of generalized parton distributions). This effort has led to three Physical Review D publications. Non perturbative renormalisation of matrix elements involved in particular in the computation of nucleon structure, has also been performed with four dynamical quarks. Furthermore, in the framework of the "PetaQCD" ANR, we have worked on the adaptation of lattice QCD algorithms to petaflop computing scale. Finally, a traditional model of nuclear physics where nucleon-nucleon interaction is being mediated through the exchange of a meson has been studied for the first time with a lattice field theory approach.

L'activité «calculs sur réseau» en 2010-2011 comporte essentiellement quatre thématiques, très liées: l'étude des propriétés des baryons en QCD sur réseau (LQCD), la renormalisation non perturbative, l'adaptation des algorithmes de LQCD à l'échelle du pétaflop, et l'étude des forces nucléaires en utilisant les techniques de théorie des champs sur réseau.

La partie LQCD a démarré début 2007 et s'est toujours développée dans le cadre de la collaboration européenne ETMC (European Twisted Mass Collaboration, <http://www-zeuthen.desy.de/~kjansen/etmc/>). Cette collaboration a été créée dans le but d'utiliser une discrétisation particulière de l'action QCD et regroupe les calculateurs dédiés de différents pays (Italie, Allemagne, Hollande, France, Espagne). D'autres laboratoires français sont également impliqués: LPT Orsay, SPhN Saclay, LPC Clermont-Ferrand.

Spectre des hadrons et structure du nucléon

Le travail effectué pendant la période 2010-2011 a été consacré à l'étude du spectre des hadrons ainsi qu'au calcul des fonctions de structure du nucléon. Il a donné lieu à deux thèses (V. Drach et P.A. Harraud) soutenues en 2010.

Les résultats concernant le spectre des baryons avec des quarks u, d, s de valence et avec 2 quarks dynamiques u, d ont été déjà publiés en 2009. De nouveaux résultats concernant le spectre des mésons légers et lourd-légers et le spectre des baryons légers (composés par des quarks u, d, s) ont été obtenus pendant cette période en incluant les quarks s, c dans la mer (simulations avec $2+1+1$ saveurs dynamiques). De plus, nous avons commencé l'étude des baryons charmés en considérant les quarks s, c dans le secteur de valence.

Les résultats sur les fonctions de structure ont été publiés dans trois articles Phys. Rev. D. Ils contiennent les facteurs de forme électromagnétiques (axiaux et vectoriel) ainsi que les premiers moments des distributions de partons généralisées du nucléon. Les simulations numériques ont été faites avec une discrétisation de $a = 0,09; 0,070; 0,056$ fm et des volumes allant de 2,1 à 2,8 fm. La masse des pions obtenus descend jusqu'à 270 MeV. Elle est toutefois encore loin de sa valeur physique, ce qui rend difficile l'extrapolation des résultats. En particulier, les valeurs obtenues pour le rayon de charge du proton sont loin des valeurs expérimentales, et traduisent soit une forte dépendance en volume de cette observable, soit un manque dans notre description théorique.

Renormalisation non perturbative

Une étude systématique des constantes de renormalisation a été initiée en 2010. La renormalisation non perturbative est un ingrédient indispensable des calculs sur réseau. La discrétisation de la QCD sur un réseau d'espace-temps fournit une régularisation évidente de la théorie, en introduisant comme cut-off naturel la maille du réseau a . Mais toute comparaison avec des résultats physiques – en particulier en ce qui concerne les fonctions de structure du nucléon, voir section précédente – nécessite un contrôle précis de la limite du continu. C'est la renormalisation qui permet, à partir de quantités «nues» calculées à maille finie, d'obtenir des observables physiques (donc indépendantes de a) avec des précisions raisonnables.

Le calcul des constantes de renormalisation des opérateurs fermioniques bilinéaires, i.e. de la forme $q_i(x)O(x,y)q_j(y)$ avec quatre saveurs de quarks dynamiques, a ainsi débuté au cours de l'année 2010. L'opérateur O n'est pas nécessairement local, et peut contenir des dérivées, par exemple dans le cas des éléments de matrice utilisés pour l'extraction des fonctions de structure du nucléon (PDFs, GPDs...).

La technique de renormalisation que nous utilisons fait appel à la méthode RI-MOM mais nous avons développé cependant une stratégie plus élaborée, qui permet un traitement approprié des artefacts hypercubiques. Le calcul des propagateurs pour plusieurs paramètres réseau est en cours et l'analyse a débuté depuis quelques mois. Ce travail a donné lieu à une publication dans Phys. Rev. D et à trois contributions à des conférences internationales.

Algorithmes

Dans le cadre de l'ANR PetaQCD, un travail algorithmique concernant l'application de la déflation de Luescher aux fermions de Wilson twistés est en cours depuis septembre 2010. Cette méthode a montré son efficacité pour des fermions de Wilson purs, mais il n'est pas clair qu'elle soit aussi intéressante lorsqu'un terme de masse twistée est ajouté. Le but de notre étude est d'effectuer une investigation poussée de la déflation appliquée aux fermions twistés et d'explorer les améliorations possibles de cette méthode.

Nombreux sont les paramètres impliqués dans cet algorithme de déflation et un point clef de notre travail a consisté à trouver les combinaisons optimales. Nous avons réalisé de nombreux tests et implémenté certaines optimisations dans le code tmLQCD de la collaboration ETMC. Nous avons montré que la déflation s'avère plusieurs fois plus rapide qu'un solveur traditionnel dans le cas où les réseaux considérés ne sont pas trop grands (typiquement $32^3.64$) et pour des masses de pions de l'ordre de 300 MeV. Cependant, pour de grands réseaux ($64^3.128$) et des masses de pion proches de la masse physique – objectif des calculs sur réseau – la déflation ne s'avère pas aussi efficace.

Nous avons exploré des améliorations possibles de cette méthode, qui pourraient permettre d'augmenter son efficacité dans le cas de grands réseaux, comme par exemple l'utilisation d'un opérateur de Dirac modifié. Il a été suggéré par l'un de nos collaborateurs du LPT (Ph. Boucaud), que le solveur mCR («modified Conjugate Residue») pourrait être un bon choix pour résoudre des opérateurs de la forme $H+im$, où H est un opérateur hermitien et m un nombre réel. Pour les fermions twistés, l'opérateur $i\gamma_5 D$ (où D représente l'opérateur de Dirac) est justement de ce type. Nous avons implémenté ce solveur dans le code tmLQCD et montré qu'il fonctionnait correctement. L'un des intérêts majeurs du solveur mCR est de posséder des récurrences courtes, et donc de réduire l'utilisation de la mémoire ainsi que les communications MPI.

Forces nucléaires

Une autre thématique développée vise à étudier les «forces nucléaires» en utilisant les techniques de calculs sur réseau. L'utilisation de ces techniques en Physique Nucléaire a comme application naturelle l'obtention des paramètres de l'interaction nucléon–nucléon à partir du lagrangien QCD. Toutefois la complexité de la QCD limite l'application de cette approche aux systèmes nucléaires les plus simples. Une autre approche consiste à résoudre exactement les modèles d'échange de mésons. Ces modèles constituent, depuis Yukawa, la base de la physique nucléaire conventionnelle *ab initio* et ont été régulièrement développés. Ils n'ont cependant jamais été étudiés en tant que théorie quantique des champs mais utilisés pour obtenir des «potentiels», ce qui constitue une amputation sévère de l'interaction surtout dans le domaine des grandes constantes de couplage. L'application des méthodes de théorie de champ sur réseau à ce problème constitue une nouvelle approche de la physique nucléaire en terme des champs de nucléons et de mésons qui incorpore toute la complexité de l'interaction – à deux comme à plusieurs corps – tout en évitant l'utilisation de «potentiel».

Ce travail a démarré en 2005 en collaboration avec le LPT d'Orsay, le CPTH de l'Ecole Polytechnique et l'Université de Sevilla. Il a fait l'objet de différentes publications et communications à des congrès. Les derniers résultats ont été publiés dans [10]. Les conclusions obtenues sont assez surprenantes : elles indiquent la non existence d'états liés dans les modèles considérés, lorsqu'ils sont traités comme théories quantiques des champs à l'approximation «quenched».

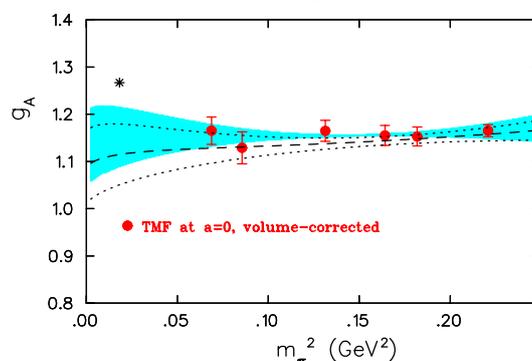


Fig. 8: Charge axiale du nucléon, obtenue en prenant la limite du continu des données extrapolées à volume infini. Les valeurs de masses du pion s'étendent de 270 à 500 MeV. La zone cyan montre le fit chirale optimal aux données représentées sur ce graphique. En accord avec tous les autres résultats de calculs sur réseau, le comportement plat observé pour la gamme de masses de quarks disponibles ne permet pas de reproduire la valeur expérimentale. Il est donc essentiel d'atteindre des masses de pion proches de la valeur physique pour pouvoir déterminer si la dépendance en masse est capable d'expliquer ce désaccord.

Noyaux, Hadrons, Systèmes à petit nombre de corps

B. Silvestre-Brac

UMons Univ.

Claude Semay, Fabien Buisseret, Fabian Brau

La méthode du champ auxiliaire

La méthode du champ auxiliaire (AFM pour « auxiliary field method ») est une méthode originale pour obtenir des valeurs analytiques assez proches des énergies exactes d'un système quantique. Elle peut être utilisée dans le cadre d'une cinématique non-relativiste ou semi-relativiste, pour des problèmes à deux corps ou à N corps. Cette théorie a été développée entièrement au laboratoire et a donné lieu à une dizaine d'articles acceptés dans des revues diverses et a conduit à l'écriture d'un article de revue sur le sujet.

Bien qu'on puisse utiliser AFM pour un nombre important de situations, l'obtention de résultats analytiques se restreint au cas de particules identiques. Pour présenter brièvement cette méthode nous partons d'un système à 2 particules de masse m , interagissant par un potentiel $V(r)$. Ainsi le Hamiltonien régissant le système est $H(p,r) = T(p) + V(r)$, où $T(p)$ représente soit une cinématique non-relativiste ($T(p) = p^2/m$) ou semi-relativiste ($T(p)^2 = p^2 + m^2$). Supposons que l'on sache résoudre l'équation d'onde avec un potentiel $V(r) = v P(r)$. Le Hamiltonien correspondant est donc $H(p,r;v) = T(p) + v P(r)$. Si v est un champ déterminé par une procédure de minimisation $v = v(r)$, alors le Hamiltonien modifié s'identifie au Hamiltonien original $H(p,r;v(r)) = H(p,r)$ et les deux approches sont équivalentes. AFM consiste à considérer v non plus comme un champ mais comme une variable réelle donnant une expression analytique de l'énergie $E(v)$. La détermination de la valeur v_0 minimisant cette énergie conduit à une expression analytique approchée $E(v_0)$ de l'énergie exacte.

Dans tous les cas, on peut écrire $E(v_0) = T(p_0) + V(r_0)$, où $p_0 = Q/r_0$ est une espèce d'impulsion moyenne et r_0 est un rayon moyen déterminé à l'aide d'une *fonction universelle* ne dépendant que de la forme du potentiel. On en déduit que l'énergie AFM s'exprime aussi à l'aide d'une *fonction universelle*. Q est le nombre quantique principal dépendant des nombres quantiques radial n et orbital l . La forme explicite de Q dépend de la forme du potentiel $P(r)$ choisie au départ. Une propriété remarquable de AFM est que la forme de l'expression $E(v_0)$ en termes de (n,l) ne dépend que du terme $Q(n,l)$. Cette propriété permet d'utiliser une forme $Q(n,l)$ qui permet de donner des valeurs remarquablement proches des valeurs exactes.

AFM a été appliquée d'abord à un potentiel puissance $V(r) = ar^\lambda$. Un choix astucieux de $Q(n,l)$ conduit à des valeurs analytiques du spectre proches des valeurs exactes à moins de 10^{-6} , et cela pour un grand nombre d'états du spectre. On a obtenu aussi des valeurs analytiques pour des potentiels aussi différents que le potentiel en racine carré, le potentiel de Yukawa, Coulomb+linéaire, et bien d'autres.

AFM peut aussi être utilisée pour traiter une cinématique semi-relativiste à partir du problème équivalent régi par une cinématique non-relativiste. Nous avons été capables d'étudier dans ce cadre les énergies de l'équation de Salpeter sans spin pour un grand nombre de potentiels, notamment le potentiel Coulomb+linéaire, d'emploi fréquent en physique hadronique de basse énergie. Le cas ultra-relativiste ($m=0$) donne lieu à des formules analytiques particulièrement simples.

Le gros intérêt de AFM est qu'elle est adaptée aussi pour l'étude des systèmes comprenant N particules avec une cinématique quelconque et interagissant par des potentiels à un corps et à deux corps. La grande puissance de AFM est qu'elle permet d'avoir une expression analytique pour ce système exprimée en terme d'un rayon moyen r_0 , lui-même déterminé par une équation transcendante. Ainsi, l'obtention d'une valeur approchée de ce système très complexe, ne demande que la résolution d'une seule équation transcendante, procédure très facile numériquement. Dans un certain nombre de cas intéressants, même cette résolution est analytique. Nous avons appliqué cette méthode dans deux directions.

Nous avons calculé, dans le cas de potentiels attractifs tendant vers 0 à l'infini (comme le potentiel de Yukawa), les constantes critiques de l'interaction (à partir desquelles on ajoute un état lié). Nous avons montré que celles-ci ont une dépendance en Q^2 .

Nous avons découvert de riches relations de dualité entre un système à N corps et un système à 2 corps. En principe, nous sommes capables d'exprimer un état quelconque (nombres radiaux et orbitaux quelconques) d'un système quelconque (nombre de particules arbitraire) à l'aide d'une *fonction universelle* $f(m)$ qui est en fait la courbe en fonction de la masse de l'énergie de l'état fondamental à deux corps, quantité aisément calculable.