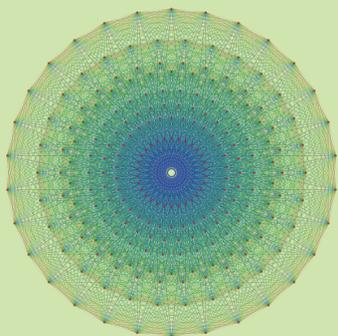


# Physique théorique

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,

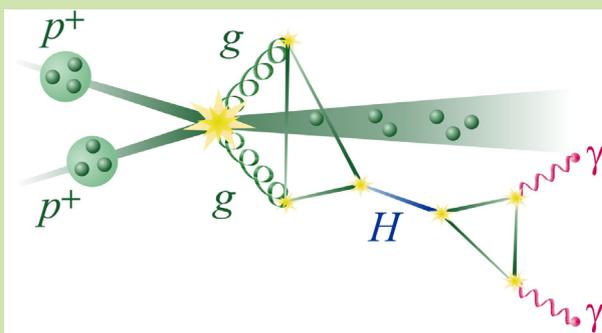
et gravitationnelles, sont de portée infinie car dues à l'échange de particules sans masse : gluons, photons, et gravitons. Jusqu'en 1969, le modèle de Fermi était utilisé pour décrire l'interaction faible. Bien qu'en parfait accord avec l'expérience, ce modèle ne satisfaisait pas les théoriciens. Il 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.

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

### 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 environ quatre chercheurs en CDD et autant d'étudiants en thèse.

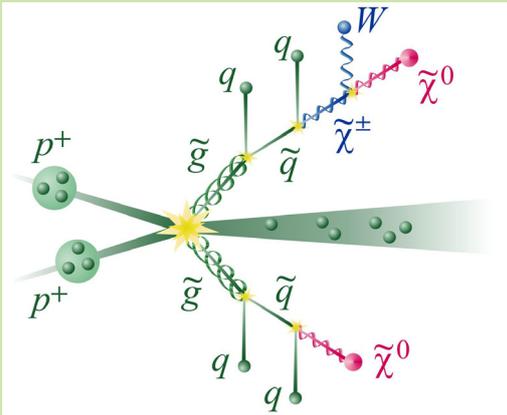


Comme nous le montrerons dans ce rapport d'activités, notre groupe contribue aux avancées dans les domaines les plus actifs et compétitifs de la physique des particules d'aujourd'hui. Grâce à ce dynamisme, à la fiabilité et au sérieux de nos travaux, notre groupe bénéficie d'une excellente

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 actuellement :

- 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 attendus 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.

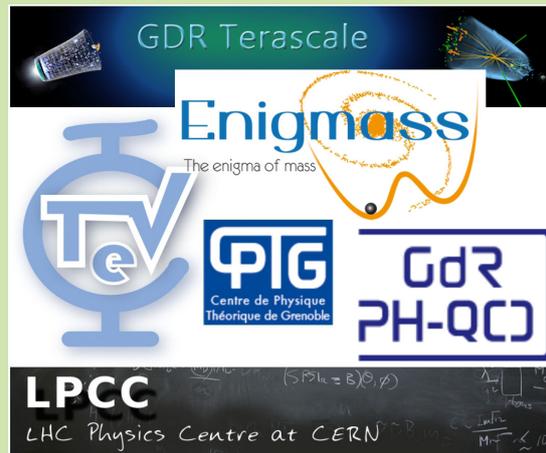
Ces thématiques sont étroitement liées aux programmes expérimentaux du LPSC. Par exemple, l'étude du boson de

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*, et l'organisation au LPSC des *Rencontres de Physique des Particules 2013* et de la série d'ateliers *Implications of the 125 GeV Higgs boson*.

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

*I. Schienbein, M. Mangin-Brinet, T. Stavreva, T. Ježo, F. Lyonnet  
LAPTh Annecy, LLR Palaiseau, Hamburg univ., Mainz univ., Karlsruhe univ., Münster univ.,  
Dallas univ.  
nCTEQ Collaboration : Dallas univ., JLab, Hampton univ., Fermilab, Florida State univ.  
European Twisted Mass Collaboration : CEA Saclay, LPT Orsay, LPC Clermont, DESY,  
P. de Olavide univ., Huelva univ.*

*The research carried out in QCD spans a wide range of topics including a global analysis of nCTEQ nuclear parton distribution functions (PDFs) with uncertainties, theoretical work on the ACOT heavy flavor scheme extending it to next-to-next-to leading order (NNLO) accuracy and beyond and generalizing it to include explicitly the dependence on the number of active flavors in the PDFs, a study on the experimental constraints on the strange quark PDF and the influence of the strange quark PDF uncertainty on W/Z boson production at the LHC, a next-to-leading order (NLO) study of inclusive charmed meson production in p-p collisions at the LHC, and predictions for the production of a photon in association with a heavy quark jet at NLO QCD for both p-p and Pb-Pb collisions. In the case of Pb-Pb collisions, a particular focus has been placed on the energy lost by the heavy quark during the propagation through the hot and dense medium (the quark gluon plasma) formed in the heavy ion collisions. In addition to the work in perturbative QCD, we have carried out research in non-perturbative QCD where we have studied non-perturbative renormalisation, and we have performed a determination of the strong coupling constant on the lattice.*

## QCD perturbative: Distributions de partons

L'une de nos activités principales de recherche concerne la détermination des distributions de partons (PDF) dans les protons et noyaux complexes.

Les PDF sont d'une importance primordiale pour la physique moderne des hautes énergies. Elles encodent des informations fondamentales sur la structure des hadrons et sont indispensables à la détermination d'une large classe d'observables mesurées par les collisionneurs de haute énergie utilisant des hadrons dans l'état initial. En particulier, ce sont des outils essentiels pour pouvoir prédire les sections efficaces des collisions p-p, p-A, A-A (ainsi que  $\gamma$ -p et  $\gamma$ -A) au LHC, indispensables au succès de son ambitieux programme de physique. 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 cruciale de la QCD ; elles font en particulier l'objet d'études par calculs sur réseau, ou via des théories effectives.

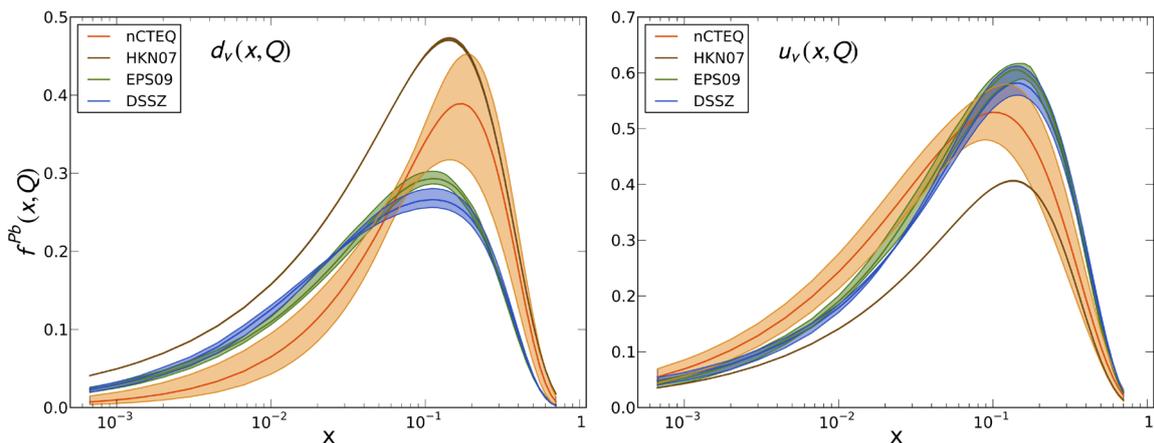
Les PDF sont déterminées par des ajustements globaux des données d'une grande variété de processus durs en utilisant le cadre théorique nCTEQ, qui a été développé par notre groupe au LPSC avec quelques membres de la collaboration CTEQ. Cette approche représente une extension du cadre théorique de la 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.

### ***Incertitudes des PDF***

Notre groupe a investi un effort tout particulier dans la détermination des PDF nucléaires nCTEQ et de leurs incertitudes. Les premiers résultats préliminaires ont été présentés à la conférence DIS 2013. Par exemple, dans la figure ci-dessous sont représentées les PDF des quarks de valence dans un noyau de plomb et leurs incertitudes, à une énergie de 10 GeV, comparées aux résultats obtenus par différents groupes nPDF (HKN07, EPS09, DSSZ). Ce travail devrait aboutir prochainement.

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.



### ***PDF du quark étrange et implication sur la production de W/Z***

Les analyses globales des PDF fournissent des contraintes fortes sur les composantes u et d du proton, mais contraindre les autres degrés de liberté de saveur est plus délicat. Les prédictions théoriques aux ordres supérieurs et les nouveaux ensembles de données ont contribué à de récentes améliorations. Cependant, en dépit de ces efforts, la fonction de distribution du quark étrange est encore entachée d'amples incertitudes, particulièrement dans la région de faible fraction d'impulsion. Nous avons examiné les contraintes expérimentales et théoriques et cherché à comprendre l'impact de ces incertitudes sur les observables du LHC. En particulier, nous avons étudié la production de W/Z pour déterminer comment ces incertitudes dues au quark étrange se propagent aux observables. Nous avons de plus regardé dans quelle mesure les résultats précis obtenus au LHC pourraient fournir des informations additionnelles sur la structure en saveur du proton.

### ***Schémas de saveurs lourdes***

Un traitement théorique approprié et consistant des quarks lourds (charme et bottom) est crucial pour une détermination précise des PDF. En pratique, lorsque

l'on atteint l'ordre NNLO (next-to-next-to-leading order), il est donc essentiel de formuler le schéma des quarks lourds au moins au même ordre.

Pour la production de quarks lourds, la collaboration nCTEQ emploie le schéma ACOT, qui a été le premier traitement des saveurs lourdes discuté dans la littérature et qui reste probablement le schéma le plus utilisé. Nous avons utilisé les résultats du schéma de renormalisation  $\overline{\text{MS}}$  à masse nulle, à l'ordre NNLO et NNNLO pour les fonctions de structure  $F_2$  et  $F_L$  dans la diffusion profondément inélastique avec courant neutre, pour estimer les corrections d'ordre supérieur aux résultats à masse non nulle donnés par le schéma ACOT, en imposant sur l'espace de phase des contraintes dues à la masse des quarks. La combinaison des résultats exacts du schéma ACOT à l'ordre NLO avec les expressions ainsi obtenues devrait fournir une bonne approximation du calcul ACOT complet aux ordres NNLO et NNNLO.

Dans un autre travail, nous avons introduit un schéma hybride avec un nombre variable de saveurs de quarks lourds, dénoté H-VFNS, qui incorpore les avantages du schéma traditionnel à nombre de saveurs variable (VFNS) et de celui à nombre de saveurs fixe (FFNS). En incluant explicitement une dépendance dans le nombre de saveur dans les PDF et la constante de couplage forte, nous avons généré des ensembles de PDF et de valeurs de couplage pour 3,4,5,6 saveurs, à une échelle quelconque de renormalisation, reliés analytiquement par les conditions de raccordement  $\overline{\text{MS}}$ . Le schéma H-VFNS resomme les contributions des quarks lourds et laisse la liberté de choisir le nombre de saveurs optimal pour chaque ensemble de données. Cette généralisation du schéma ACOT traditionnel permet d'ajuster les données de HERA sélectionnées dans le schéma FFNS, tout en conservant les bénéfices du schéma VFNS pour analyser celles du LHC à des échelles d'énergie plus grandes.

### **QCD perturbative: Production de saveurs lourdes**

La production de saveurs lourdes dans les collisions hadroniques fournit des tests importants de notre compréhension de la QCD. Dans les collisions p-p et p-A, ces processus permettent de contraindre les PDF des quarks charmés et beaux. Concernant les collisions A-A, la production de saveurs lourdes fournit des observables clés pour étudier le milieu chaud et dense formé dans les collisions d'ions lourds. Dans ce contexte, les résultats obtenus en collisions p-p et p-A constituent des références nécessaires pour interpréter les observables dans les collisions d'ions lourds.

#### **Production de mésons D**

Nous avons appliqué le GM-VFNS (General-mass variable-flavor-number scheme) pour obtenir des prédictions à l'ordre NLO pour la production de mésons charmés ( $D^*$ ,  $D^+$ ,  $D^0$ ,  $D_s$ ,  $\Lambda_c$ ) dans les collisions p-p au LHC. Nos résultats ont été présentés sous une forme qui permet une comparaison facile avec les données expérimentales des collaborations ALICE, ATLAS, CMS et LHCb. Nous avons trouvé que la section efficace de production à grande rapidité est très sensible à la présence d'une composante non-perturbative dans la PDF du quark c, appelé charme intrinsèque. Des mesures à grande rapidité devraient ainsi être utiles pour dépister ou contraindre ces effets prédits par la QCD.

### **Production d'un photon direct en association avec un quark lourd**

La production d'un photon direct en association avec un quark lourd est un processus aux multiples facettes. Nous avons mené une étude de ce processus à l'ordre NLO dans les collisions p-p au LHC. Il s'avère que la distribution en impulsion transverse du photon à grande rapidité est prometteuse pour découvrir ou contraindre l'existence du charme intrinsèque dans la structure du proton.

Dans un autre travail, nous avons présenté une étude phénoménologique exploratoire de ce processus dans les collisions Pb-Pb au LHC. Nous avons considéré plusieurs observables qui peuvent être utiles pour estimer la quantité d'énergie perdue par le quark lourd durant sa propagation à travers le milieu dense et chaud produit dans les collisions d'ions lourds. Les calculs ont été effectués à l'ordre NLO en utilisant pour les quarks lourds des probabilités de perdre une certaine énergie formulées par Armesto-Salgado-Wiedemann (basées sur le cadre théorique de Baier-Dokshitzer-Mueller-Peigne-Schiff et Zakharov, BDMPS-Z). Généralement, on s'attend à une certaine hiérarchie dans la perte d'énergie des partons, avec la perte la plus grande pour les gluons, suivis par les quarks légers et ensuite les quarks lourds. En supposant une telle hiérarchie dans les probabilités de perte d'énergie (quenching weights), nos résultats montrent que le quenching des spectres inclusifs en impulsion transverse du jet de quark lourd suit raisonnablement cette hiérarchie. Par contre, le spectre en  $p_T$  du photon est seulement modifié à petite impulsion, où moins de jets de quarks lourds arrivent à passer les coupures cinématiques. En plus des spectres inclusifs d'une particule, l'état final avec deux particules fournit une gamme d'observables (l'impulsion de la paire photon-jet, l'asymétrie de jet, etc.) que nous avons étudiée en détail. La comparaison de l'impulsion de la paire photon-jet dans les collisions p-p et Pb-Pb est sensible à la quantité d'énergie perdue par le quark lourd et pourrait donc être utilisée pour mieux comprendre la perte d'énergie dans le secteur des quarks lourds.

### **Calculs sur réseau**

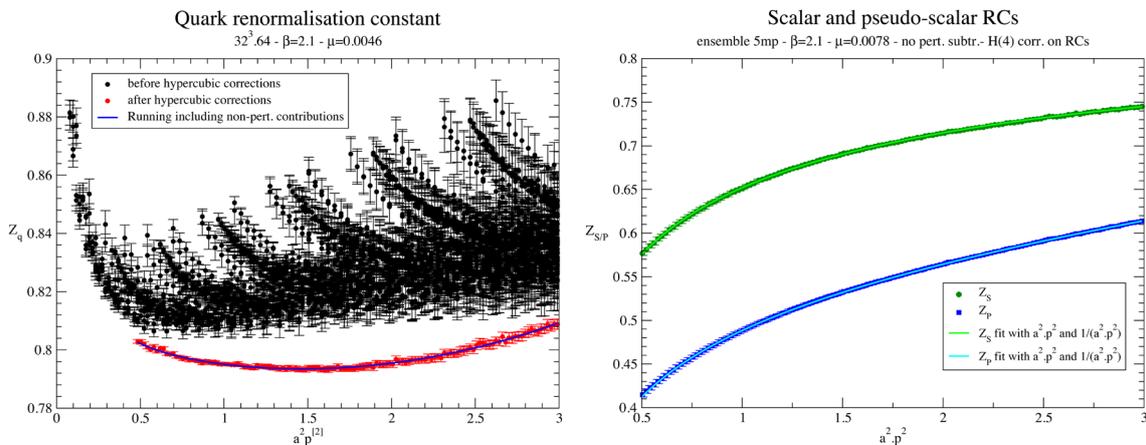
La QCD sur réseau représente à l'heure actuelle la seule méthode systématique et rigoureuse permettant d'effectuer des calculs *ab-initio* et non perturbatifs de QCD.

#### **Renormalisation non perturbative**

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 coupure naturelle la maille du réseau, dénotée  $a$ . Mais toute comparaison avec des résultats physiques nécessite un contrôle précis de la limite du continu, c'est-à-dire lorsque  $a \rightarrow 0$ . 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.

Nous avons ainsi réalisé une étude systématique des constantes de renormalisation des opérateurs fermioniques bilinéaires, i.e. de type  $\bar{q}_a(x)O(x,y)q_b(y)$  avec quatre saveurs de quarks dynamiques. 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 (PDF, GPD, etc.).

La technique de renormalisation que nous utilisons fait appel à la méthode RI-MOM. Nous avons cependant développé une stratégie plus élaborée permettant un traitement approprié des artefacts hypercubiques. La discrétisation sur réseau brise en effet la symétrie de rotation de l'espace-temps en son sous-groupe  $H(4)$ . Cela induit des artefacts réseau qui, dans le cas des constantes de renormalisation, sont très prononcés. La figure de gauche ci-dessous montre la structure typique en arêtes de poisson de ces artefacts pour la constante de renormalisation du quark (représentée en fonction de l'impulsion en unité de maille du réseau (courbe noire), ainsi que le résultat obtenu après corrections hypercubiques (courbe rouge). L'évolution non perturbative est aussi parfaitement décrite, comme le montrent les exemples ci-dessous pour les constantes de renormalisation (RC) du quark.



Afin de contrôler au mieux les divers artefacts réseau (limite du continu, chirale, etc.), nous avons calculé les constantes de renormalisation pour plusieurs ensembles de paramètres réseau. Une publication à venir présentera de façon complète les résultats pour quatre saveurs de quarks dynamiques.

## Détermination de la constante de couplage fort

La constante de couplage forte  $\alpha_S$  est un paramètre fondamental du MS. Elle intervient dans tous les processus où la QCD joue un rôle, par exemple dans le canal dominant de production du boson de Higgs par fusion de gluons. Les prédictions théoriques de ces processus sont donc toutes sensibles à l'incertitude sur sa valeur. De plus, tester la dépendance en énergie de ce paramètre sur un large intervalle fournit un test de la QCD, et sonde les effets potentiels d'une éventuelle nouvelle physique.

Nous avons calculé  $\alpha_S$  sur réseau, avec quatre saveurs de quarks dynamiques. Cette approche est complémentaire aux analyses globales (voir la section sur les PDF), et constitue la première détermination tenant compte des effets de polarisation du vide par le quark charmé. L'un des intérêts majeurs de notre approche est le traitement non perturbatif du seuil du charme. Notre procédure fait appel au formalisme d'expansion en produits d'opérateurs pour analyser les propagateurs de gluon et de fantôme, et au schéma MOM de Taylor. Les effets hypercubiques ont été éliminés en utilisant la même méthode que pour les constantes de renormalisation, et nous avons montré que les corrections en puissance de l'impulsion ne peuvent pas être négligées dans le développement d'opérateurs.

# Physique au-delà du Modèle Standard

S. Kraml, I. Schienbein, C. Smith, G. Chalons, S. Kulkarni, A. Wingerter, J. Bernon, B. Dumont, T. Ježo, Q. Le Boulc'h, F. Lyonnet, J. Proudome  
LAPTh Annecy, IPHC Strasbourg, CERN, LPT Orsay, Vienna univ., Münster univ., Würzburg univ., Bonn univ., DESY, univ. Louvain-la-Neuve, Ljubljana univ., Bangalore univ., Sao Paulo univ., UC Davis, Oklahoma univ.

*New Physics models are one of our main topics of research. In 2012-13, driven by the experimental results, our efforts were geared towards interpreting the Higgs boson signal at 125 GeV, the ever increasing bounds on SUSY particles, and the yet inconclusive searches for dark matter. In these contexts, our works tackle theoretical questions, often related to supersymmetry breaking or GUT scénarios, as well as phenomenological aspects, in particular the collider signatures.*

## 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.

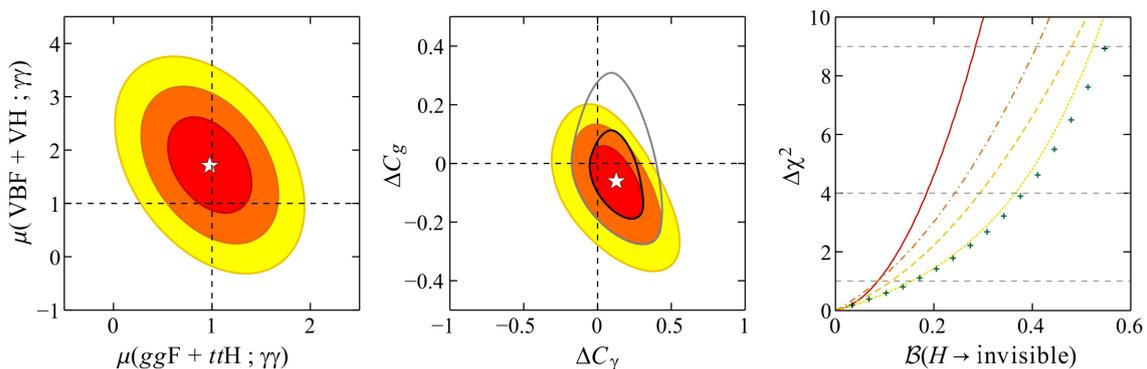
Ce problème de hiérarchie peut se résoudre par l'extension du MS dès l'échelle d'énergie du TeV. Toutes les extensions proposées introduisent de nouvelles particules, qu'elles soient fermioniques (matière), vectorielles (interaction), ou scalaires (similaires au boson de Higgs). N'étant pas toutes beaucoup 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, etc.), ou les modèles plus génériques ayant un groupe de jauge étendu, un secteur de Higgs élargi, ou de nouvelles générations de matière.

Notre groupe s'est fortement impliqué dans cette problématique. Nous organisons d'ailleurs chaque année un atelier sur ce thème. En pratique, il y a essentiellement deux façons de l'appréhender: soit via une analyse générique et globale, suivant une stratégie effective ou phénoménologique, soit via l'étude précise des prédictions d'un modèle spécifique de nouvelle physique.

### Études effectives: Ajustements aux mesures de couplages du boson de Higgs

Comme indiqué plus haut, les valeurs mesurées des couplages du boson de Higgs sont proches de celles attendues dans le MS. En vue d'exploiter cette observation et d'en déduire des contraintes sur une large classe de modèles de nouvelle physique, cette assertion se doit d'être quantifiée dans un contexte statistique. Combinant les données d'ATLAS, CMS et Tevatron, nous avons donc établi les contours de vraisemblance dans l'espace des intensités de signaux de productions via fusion de gluons, productions associées..., et ce pour chaque canal de désintégration actuellement mesuré (voir figure de gauche ci-dessous pour le canal  $\gamma\gamma$ ).

Indirectement, ces ellipses de vraisemblance permettent de contraindre les couplages du boson de Higgs à d'autres particules. D'abord, à celle du MS, les quarks, leptons, et bosons de jauge, et ensuite à celles de nouvelle physique. Dans ce dernier cas, il n'est pas nécessaire de préciser leur nature. Plutôt, il suffit d'inclure comme variable dans l'analyse statistique tous les couplages susceptibles d'être modifiés par leur présence. Par exemple, nous avons considéré les couplages  $H\gamma\gamma$  et  $Hgg$ , qui n'apparaissent pas à l'ordre de l'arbre dans le MS (voir figure du milieu ci-dessous). Alternativement, la largeur totale du boson de Higgs, trop petite pour être mesurée directement au LHC, peut être contrainte. Cette observable permet de tester la présence d'une nouvelle particule légère couplée au boson de Higgs, puisqu'elle ouvrirait de nouveaux canaux de désintégration et donc augmenterait d'autant la largeur totale. Par exemple, comme illustré par la figure de droite ci-dessus, nous avons prouvé que le taux de désintégration maximum en particules invisibles, c'est à dire neutres et suffisamment stables, varie entre 20% et 38% suivant les hypothèses (les aspects liés à la matière noire sont discutés plus loin). Enfin, nous avons illustré la puissance de notre analyse en l'appliquant à une série de modèles ayant un secteur scalaire élargi (deux doublets, doublet inerte, et triplet).



### Études effectives: Un ou plusieurs scalaires à 125 GeV?

Le signal observé à 125 GeV pourrait provenir non d'un seul mais de plusieurs bosons scalaires presque dégénérés. Les sections efficaces résonneraient, c'est-à-dire exhiberaient un pic d'intensité, lorsque l'énergie incidente coïncide avec la masse de chaque scalaire. Toutefois, ces pics ne sont pas si faciles à distinguer expérimentalement. Ils peuvent être trop proches, en deçà de la résolution en énergie, ou ne pas avoir des forces égales dans chaque canal de désintégration. Par exemple, le premier scalaire pourrait contribuer majoritairement dans le canal

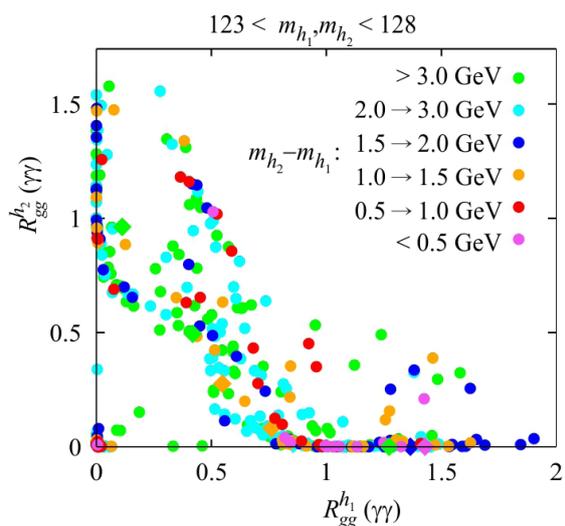
diphoton, et le second dans celui en paire de quarks bottom. Pour contourner cette difficulté, nous avons proposé des outils de diagnostic puissants basés sur la comparaison des différents taux de production et de désintégration (voir ci-dessous pour un cas concret). Cette stratégie est en cours d'implémentation autant par ATLAS que par CMS.

### Études de modèles: Conséquence pour la supersymétrie

Les motivations pour introduire la supersymétrie (SUSY) sont rappelées plus tard. Ici, nous ne discuterons que des conséquences de l'existence d'un boson scalaire de 125 GeV ayant des couplages proches de ceux attendus dans le MS. Rappelons que cette masse n'est pas un paramètre libre en SUSY, et que ces couplages peuvent être très différents en présence de sparticules légères.

En particulier, l'extension supersymétrique minimale du MS, le MSSM, prédit un boson de Higgs trop léger à l'ordre de l'arbre. Les corrections radiatives ont en charge de l'alourdir jusqu'à 125 GeV, mais ce n'est pas trivial: soit le stop est très lourd, dans les multi-TeV, soit le mélange entre les stops droit et gauche est maximal. Nous avons étudié cette dernière possibilité, en particulier son comportement sous le groupe de renormalisation. L'objectif était de voir dans quelle mesure elle peut se réaliser partant de l'échelle de grande unification, et de comparer les conditions nécessaires à cette échelle avec ce qui est attendu dans différents scénarios de médiation de la brisure de supersymétrie.

Plutôt que d'alourdir le boson de Higgs grâce aux corrections radiatives, une autre stratégie est d'introduire de nouvelles particules capables de l'alourdir dès l'ordre de l'arbre. Le scénario le plus simple, appelé Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model ou NMSSM, adjoint un singlet de jauge au MSSM, et fut l'objet d'une série d'analyses de notre groupe. Plus précisément, ce modèle prédit l'existence de trois bosons scalaires neutres. Si plusieurs d'entre eux sont légers, l'interprétation du signal à 125 GeV peut être profondément modifiée. Pour commencer, nous avons prouvé qu'une telle situation émerge naturellement si des conditions d'unification sont imposées. Ensuite, nous avons regardé deux cas particuliers: celui où les deux bosons les plus légers sont presque dégénérés et où le signal à 125 GeV est une superposition de leurs contributions (voir figure ci-contre), et le cas où le signal à 125 GeV correspond en fait au boson de masse intermédiaire. Le boson le plus léger expliquerait alors le petit excès observé à 98 GeV au LEP dans le canal  $e^+e^- \rightarrow Z [h \rightarrow bb]$ . Finalement, nous avons discuté de la validation de ces scénarios, et plus généralement du NMSSM, lors des recherches à 14 TeV au LHC.



### Recommandations: Présentation des résultats sur le boson de Higgs

Notre groupe a mené les discussions visant à établir le format sous lequel les mesures relatives au secteur scalaire devraient être présentées pour optimiser

leur utilité pour la communauté de physique des particules. L'importance de ces recommandations peut se comprendre au vu de la discussion ci-dessus : la présence de nouvelle physique peut altérer individuellement chaque taux de désintégration ou de production, et plus insidieusement les efficacités de sélection ou les acceptantes. Nos recommandations identifient les informations indispensables pour comparer et combiner les résultats expérimentaux, et pour permettre à chacun de réinterpréter ces résultats dans le modèle de son choix.

### **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.

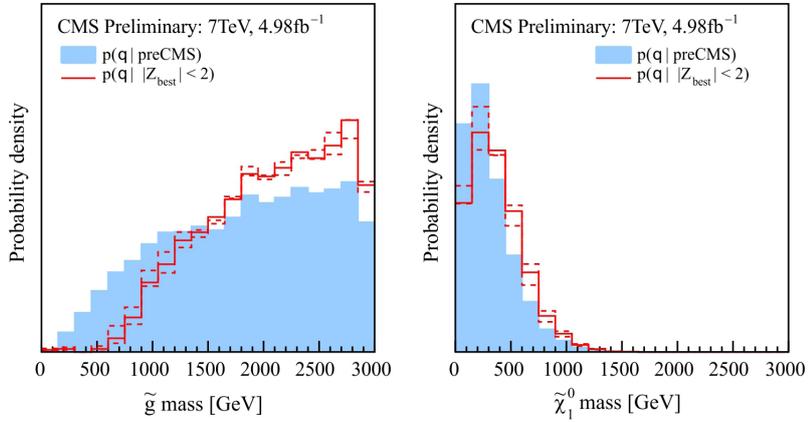
Le contexte supersymétrique couvre une large partie de nos activités. Comme pour l'étude du boson de Higgs, celle de la SUSY peut se faire de façon effective, c'est-à-dire en tentant de couvrir aussi largement que possible ses réalisations concrètes, ou de façon spécifique en se concentrant sur un modèle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

### **Études effectives: Contraintes LHC sur le MSSM phénoménologique**

En l'absence de contraintes théoriques spécifiques de brisure de la SUSY ou d'unification à une très haute énergie, la description la plus générale du MSSM à l'échelle électrofaible nécessite plus d'une centaine de paramètres libres, et n'est donc pas adaptée à une analyse numérique. Évidemment, tous ces paramètres n'ont pas un impact égal sur la phénoménologie. Ne gardant que les 19 paramètres les plus importants, le MSSM phénoménologique ou pMSSM offre une

paramétrisation simple mais réaliste du MSSM complet. Cette approche permet de dépasser le cadre très restrictif des prescriptions de type *constrained MSSM* ou *mSUGRA*. Une telle souplesse est importante pour interpréter les contraintes expérimentales et en tirer des conclusions sur la viabilité du modèle.

En particulier, nous avons analysé différentes recherches effectuées par CMS et en avons tiré les distributions de probabilité des paramètres du pMSSM, et donc aussi par exemple celles des masses des sparticules (voir figures ci-contre pour

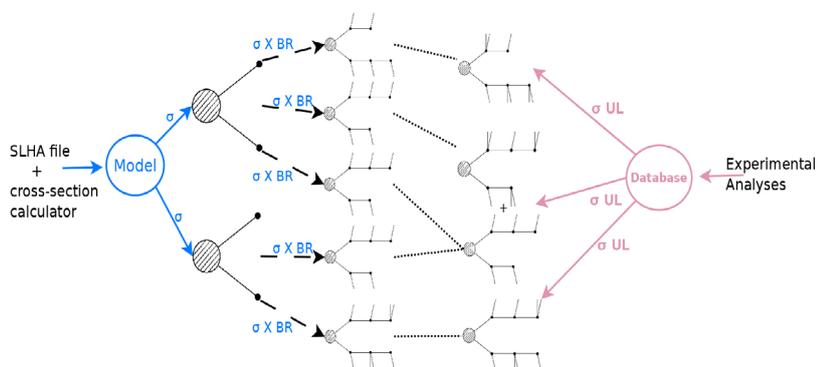


celles du gluino et du neutralino le plus léger). De cela, nous avons pu obtenir des renseignements génériques sur le secteur scalaire et la recherche de matière noire supersymétrique. Ce travail fut d'abord basé sur les premiers 1 fb<sup>-1</sup> de données à 7 TeV, puis étendu à la totalité des 5 fb<sup>-1</sup>, et devrait être prochainement complété par celles à 8 TeV. Un de nos résultats principaux est d'avoir identifié les scénarios qui, tout en ayant de grands taux de production, parviennent à passer au travers des recherches expérimentales.

**Études effectives: De SUSY aux modèles simplifiés grâce à SModelS**

ATLAS et CMS présentent leurs résultats de recherche de nouvelle physique en termes de limites sur les sections efficaces prédites par des modèles simplifiés. Ces Simplified Model Spectra (SMS) sont des descriptions effectives ne rendant compte que des déviations par rapport au MS induites par un petit nombre de nouvelles particules. De telles analyses sont utiles pour tester en toute généralité la présence de nouvelle physique, mais leur interprétation dans un cadre théorique réaliste est difficile.

Nous avons donc développé une procédure permettant de décomposer les signatures de modèles de nouvelle physique en termes de ces SMS, et ainsi de directement les confronter aux contraintes expérimentales. Nous



avons ensuite appliqué cette méthode pour réinterpréter les limites SMS obtenues dans les canaux avec énergie manquante en termes de contraintes sur la SUSY. Une fois automatisée, tester la compatibilité d'un modèle SUSY avec les résultats du LHC en sera simplifié. Cet outil sera rendu publique sous le nom de code SmodelS.

## **Études de modèles: Conditions d'unification et Théorie Unifiées**

Un des attraits principaux de la SUSY est de rendre l'hypothèse de grande unification viable. Grâce aux corrections quantiques dues aux sparticules, les trois constantes de couplage de jauge convergent précisément à haute énergie. De plus, comme mentionné plus haut, la SUSY élimine le problème de hiérarchie: elle stabilise l'échelle électrofaible par rapport à l'échelle d'unification. Inversement, les théories de grande unification requièrent, en plus de l'unification des couplages de jauge, celle d'autres paramètres, par exemple les masses (couplages de Yukawa). Après évolution, ces conditions aux frontières contraignent les paramètres du MSSM à basse énergie, et donc la phénoménologie aux collisionneurs. C'est une des voies d'étude que nous poursuivons intensément.

Par exemple, nous avons étudié une réalisation concrète de la théorie de grande unification basée sur le groupe de jauge  $SO(10)$ , imposant de plus l'unification des couplages de Yukawa du top, bottom et tau. Ces contraintes d'unifications peuvent être combinées à celles venant de mesures d'observables à basse énergie, fournissant ainsi un cadre théorique précis dont nous avons étudié la phénoménologie. En particulier, ce cadre prédit un gluino relativement léger, en dessous de 2,8 TeV, et donc a priori accessible au LHC à 14 TeV. Nous avons confirmé cela en montrant que les limites SMS à 8 TeV imposent déjà une borne inférieure de 1 TeV pour la masse du gluino dans ce modèle.

## **Études de modèles: Sur l'utilité de la polarisation du quark top**

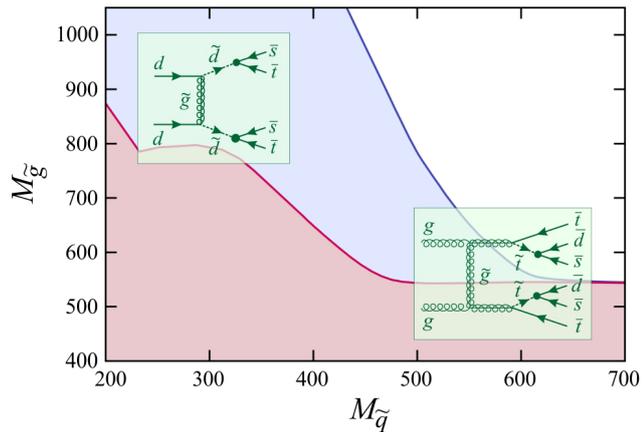
Dans le MS, le quark top est la particule fermionique la plus lourde, c'est-à-dire celle qui se couple le plus au boson de Higgs. En SUSY, ses partenaires scalaires, les stops, héritent de ce couplage fort, mais la conséquence s'inverse: le squark le plus léger est en général un stop. De ce fait, le top et ses partenaires stops jouent un rôle phénoménologique particulier dans la recherche de la SUSY.

Une abondance excessive de tops, due par exemple aux désintégrations de stops ou sbottoms, n'est pas le seul indicateur de la présence de la SUSY. Leur polarisation peut aussi servir car elle dépend du processus de production, c'est-à-dire de la nature des particules A et B dans  $A \rightarrow B + \text{top}$ . Dans le MS, un quark top isolé est parfaitement polarisé puisque seul le top gauche subit l'interaction faible. En SUSY, au contraire, tous les états de polarisation sont possibles: sa polarisation dépend des masses des sparticules, en particulier des mélanges gauche-droit dans le secteur des squarks et des mélanges gauginos-higgsinos dans celui des neutralinos et charginos. Nous avons donc étudié cette dépendance de la polarisation aux paramètres SUSY, et montré comment elle peut améliorer la sensibilité du LHC dans certains scénarios, par exemple ceux où les higgsinos sont légers.

## **Études de modèles: Nombre baryonique et paires de quark tops**

Dans le MS, les nombres baryonique et leptonique sont automatiquement conservés, ce qui garantit la stabilité du proton. Cet accident ne se reproduit pas en SUSY. À la place, une nouvelle symétrie, la parité R, est souvent invoquée pour exclure les couplages dangereux. Mais, cette symétrie n'est pas inoffensive: elle impose aux sparticules d'être produites par paires, et de se désintégrer vers la sparticule la plus légère qui doit donc être stable. Comme une telle particule n'a pas été découverte, le plus simple est de la supposer neutre donc invisible (elle est alors un candidat naturel pour la matière noire, voir plus loin): les événements SUSY s'accompagnent d'énergie manquante.

La parité R n'est pas la seule solution. Au lieu d'être interdits, les couplages dangereux peuvent être petits. En fait, imposant une hypothèse de naturalité, seuls les couplages violant le nombre baryonique et impliquant le (s)top sont grands. Ils ne peuvent donc directement induire la désintégration du proton, mais modifient profondément la phénoménologie: les sparticules ne doivent plus être produites par paires ni forcément générer de l'énergie manquante. Vu que ces caractéristiques sont supposées expérimentalement, cela pourrait expliquer pourquoi la SUSY n'a pas encore été découverte.



Nous avons donc étudié les signatures attendues en présence d'une telle violation du nombre baryonique. La production de paires de quarks top de même charge est apparue comme la plus symptomatique, et la plus sensible car un tel état final est très rare dans le MS. De plus, elle peut s'observer relativement clairement grâce à son produit de désintégration en paires de leptons de même signe. Nous avons montré que les recherches de nouvelle physique dans ces canaux leptoniques poussent déjà les limites sur les masses des squarks et du gluino au-delà de 500 GeV, voir ci-contre.

Dans ce cadre de la parité R brisée, d'autres travaux sont en cours, par exemple sur leur comportement sous le groupe de renormalisation (stage master 2 accompli en 2013), ou sur les effets de polarisation.

### **Recommandations: Présentation des recherches de nouvelle physique**

La recherche de nouvelle physique est un projet collaboratif, incluant théoriciens et expérimentateurs du monde entier. En effet, comparer les prédictions d'un modèle spécifique, partant de ses règles de Feynman, aux mesures du LHC où sont observés des jets hadroniques, des leptons, des photons... nécessite une chaîne d'analyse longue et complexe. Standardiser et pérenniser les informations nécessaires pour chacune des étapes de cette chaîne sont les objectifs des recommandations « Les Houches » pour le LHC. Plus précisément, ces recommandations portent sur la description de l'analyse expérimentale, en particulier ses variables cinématiques, les informations nécessaires pour modéliser les détecteurs, l'accès et le stockage des données, leurs erreurs, corrélations, etc., et les outils statistiques utilisés pour les interpréter. Nous avons collaboré activement à l'élaboration de ces recommandations, qui permettront d'exploiter au mieux le LHC aujourd'hui comme dans le futur.

### **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 (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.

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 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.

### **Études effectives: Les portails de Higgs**

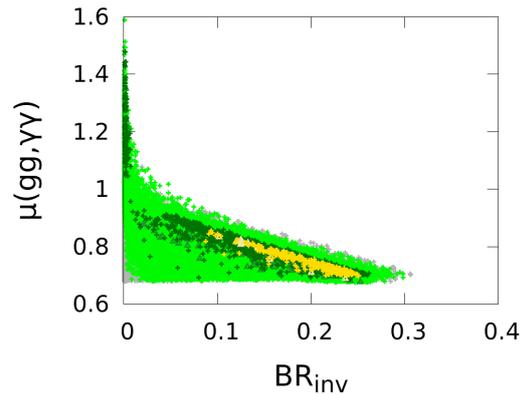
Si l'on considère tous les couplages possibles d'une nouvelle particule à celles du MS, ceux impliquant le boson de Higgs sont les plus simples car c'est la seule particule scalaire dans le MS. Ayant une dimension de masse minimale, et tant qu'un modèle explicite de nouvelle physique n'est pas adopté, ces couplages peuvent donc être supposés dominants : ils sont appelés portails de Higgs.

Dans cette optique, la DM interagit avec le MS principalement à travers ces portails. Bien qu'attractive, cette hypothèse ne tient pourtant pas. La densité relique mesurée requiert des couplages trop grands, inconciliables avec l'absence de signal dans les recherches expérimentales de la DM. Également, lorsque la DM est suffisamment légère, de tels couplages permettraient au boson de Higgs de se désintégrer en DM avec un taux qui est exclu expérimentalement (voir première section). Nous avons montré que cette conclusion reste valide pour tous les couplages effectifs Higgs-DM, même au-delà des portails. En conséquence, la seule manière de coupler la DM au MS via le boson de Higgs est de supposer que le formalisme effectif ne tient pas, c'est-à-dire que la DM ne peut pas être la seule nouvelle particule légère. Nous avons illustré ce résultat par quelques modèles explicites.

### **Études de modèles: Le neutralino léger comme matière noire**

Comme mentionné plus haut, la SUSY avec parité R a un candidat naturel de DM. Dans le MSSM, c'est le neutralino le plus léger qui remplit ce rôle. Nous avons analysé cette possibilité, et en particulier les scénarios où ce neutralino est si léger que le boson de Higgs peut se désintégrer en DM.

À cette fin, nous avons sondé l'espace des paramètres du MSSM satisfaisant aux contraintes expérimentales de différents types. D'abord, celles imposées par la densité relique, qui demandent des staus autour de 100 GeV. Les autres sleptons peuvent également être légers, auquel cas les charginos sont proches des limites inférieures obtenues au LEP. Ensuite, nous avons inclus les contraintes venant des recherches directes et indirectes de la DM, ainsi que celles d'ATLAS et CMS sur les jauginos et les sleptons (utilisant leurs SMS, voir plus haut). Finalement, nous avons introduit les contraintes venant du boson de Higgs, en particulier sa masse et son taux de branchement invisible (voir plus haut également). Le résultat principal de cette analyse est qu'un neutralino aussi léger que 15 GeV peut être un candidat viable de DM. Dans ce cas, les couplages du boson de Higgs sont affectés (voir la figure ci-dessus pour ceux en deux gluons ou photons), et sont donc de bons indicateurs, exploitables au LHC à 14 TeV.



### **Études de modèles: Prédire la coannihilation neutralino-stop**

Grâce aux mesures de WMAP, la densité de matière noire est connue précisément, à moins de 2% près, et sera encore mieux mesurée par Planck prochainement. Reproduire un tel niveau de précision au niveau théorique est un challenge. En effet, son calcul nécessite l'évaluation précise des sections efficaces d'annihilation de la particule de DM en celles du MS, car ces processus déterminent l'évolution de sa densité lors du refroidissement de l'univers. Ces processus d'annihilation peuvent être directs,  $DM + DM \rightarrow$  particules du MS, ou catalysés par d'autres particules de nouvelle physique de masses proches de celle de DM, les coannihilations de type  $DM + X \rightarrow$  particules du MS. Vu le niveau de précision à atteindre, lorsque ces processus contribuent significativement et impliquent des particules colorées, les corrections radiatives fortes doivent être prises en compte.

Nous avons donc calculé les corrections fortes à une boucle pour la coannihilation neutralino-stop dans le MSSM. Numériquement, dans le cadre du pMSSM (voir section précédente), nous avons montré que ces corrections sont importantes, en particulier dans le secteur de l'espace des paramètres permettant au boson de Higgs d'atteindre 125 GeV. En fait, leur impact sur la densité relique de neutralino peut même être plus grand que les incertitudes expérimentales actuelles.

### **Études de modèles: Le sneutrino léger comme matière noire**

Lorsque le MSSM est étendu en y incluant des neutrinos droits, des masses de Dirac très petites pour les neutrinos peuvent être obtenues à travers la brisure de la SUSY. Pour la DM, ce scénario est intéressant car au lieu du neutralino, un sneutrino principalement droit peut être un excellent candidat.

Nous avons effectué une analyse globale de ce scénario utilisant la méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov et incluant toutes les contraintes venant des

collisionneurs et des recherches de la DM. Deux cas peuvent être distingués, en fonction de la masse du sneutrino le plus léger. Lorsque sa masse est entre 3 et 6 GeV, toutes les contraintes sont satisfaites exceptées celles venant du boson de Higgs à 125 GeV. Lorsqu'il est plus lourd, autour de 100 GeV, même ces dernières sont satisfaites. Les conséquences de ce dernier scénario pour les recherches directes et indirectes de DM, et pour celles de nouvelle physique aux collisionneurs, ont été et sont encore en cours d'étude.

### Modèles alternatifs de nouvelle physique

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 SMS, 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 leptarquarks pour celles sur la violation du nombre baryonique. En plus de ces études effectives, nous avons également travaillé sur les questions ou modèles spécifiques décrit ci-dessous.

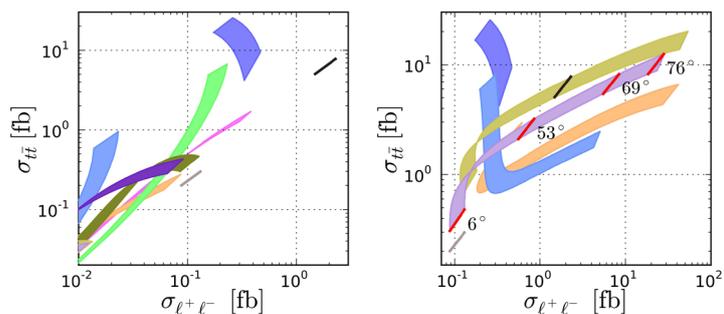
#### PyR@TE: Python Renormalization group equations @ Two-Loop for Everyone

Les équations du groupe de renormalisation (RGE) décrivent l'évolution des couplages d'une théorie en fonction de l'énergie. Elles sont cruciales non seulement pour tester une théorie, vu que toutes les mesures ne sont pas forcément faites à la même échelle, mais également pour identifier une possible dynamique sous-jacente, par exemple une théorie de grande unification.

Même si les RGE à deux boucles d'une théorie de jauge générale sont connues depuis longtemps, appliquer ces résultats à un modèle donné reste une tâche difficile. Nous avons donc développé un code, PyR@TE, fournissant les RGE de tous les paramètres d'un modèle directement à partir de son Lagrangien, son groupe de jauge, et son contenu en particules. Ces RGE sont automatiquement consignées dans un document LaTeX, ou bien sauvegardées pour une utilisation ultérieure.

#### Phénoménologie de bosons de jauge Z' et W' auprès des collisionneurs

Nous avons travaillé sur la phénoménologie des modèles ayant un groupe de jauge étendu, basé sur le groupe SU(2) x SU(2) x U(1). Ceux-ci apparaissent dans divers cadres théoriques, et ont pour caractéristique commune d'avoir trois nouveaux bosons de jauge, dénotés Z', W<sup>+</sup> et W<sup>-</sup>.



Par contre, les propriétés de ces bosons dépendent du scénario considéré. Nous avons montré qu'une stratégie

prometteuse pour les différencier au LHC est d'étudier les corrélations entre les sections efficaces dans les canaux impliquant des quarks top et des leptons. Ce résultat est illustré dans la figure page suivante, où chaque couleur représente un scénario particulier.

Un des canaux sensibles à la présence d'un boson  $Z'$  est la production de paires de quarks top par fusion de quark et antiquark, où le boson  $Z$  et le photon contribuent également. Ce canal non leptonique est sujet à d'importantes corrections radiatives fortes, que nous avons donc estimées. Notre résultat a également été implémenté dans le générateur Monte Carlo POWHEG, permettant d'inclure les effets de « parton showering ».

### ***Symétries discrètes et mélanges entre saveurs de neutrinos***

Outre qu'elle est inexplicquée, l'existence de trois familles de particules de matière multiplie le nombre de paramètres libres. Déjà deux tiers des paramètres du MS ne servent qu'à spécifier les masses et les mélanges entre fermions, et cette situation empire en SUSY ou en présence de masses pour les neutrinos. En plus, les valeurs de ces paramètres semblent suivre un schéma précis, mais dont la dynamique nous échappe encore. Dans ce contexte, une solution possible est d'imposer une nouvelle symétrie. Nos travaux se sont concentré sur les groupes discrets et leurs conséquences pour les mélanges des neutrinos, en particulier au vu des résultats récents des collaborations Daya Bay et Reno.