

Physique théorique

Les activités du groupe de physique théorique du LPSC se déploient autour de trois axes principaux, qui ont des interfaces évidentes: «Au-delà du Modèle Standard et QCD perturbative», «Calcul sur réseau (LQCD)» et «Physique hadronique pour des systèmes à peu de particules» (modèle de quarks, équations relativistes, méthodes de calcul).

Une des caractéristiques des travaux de ce groupe a toujours été leur lien étroit avec la phénoménologie, en particulier avec les programmes expérimentaux de l'IN2P3.

Noyaux, Hadrons, Systèmes à petit nombre de corps

B. Desplanques, J.-M. Richard, B. Silvestre-Brac

CERN, LAPP/TH Annecy-le-Vieux, IPNL, U. de Nancy, IHEP Beijing, U. d'Oran, U. d'Oslo, U. Rockefeller N.Y., U. de Bonn, U. de Santander, U. de Mons, U. de Melbourne, Temple U., Dubna, U. Harvard Cambridge

Form factors of few-body systems are considered within the framework of relativistic quantum mechanics with a particular attention to some fundamental properties such as asymptotic behaviors or covariance under transformations of the Poincaré group.

A new insight on the pseudo-spin symmetry in nuclei is proposed.

A review is proposed of the spectroscopy of light and heavy baryons, with focus on the recent results provided by beauty factories and photoproduction experiments.

A new model of confinement, with a minimal Steiner tree of gluon flux-tube linking the quarks and the antiquarks is shown rigorously to bind the tetraquark systems in the limit of large quark-to-antiquark mass ratio.

The possibility of binding a dodecaplet (six top quarks and six top antiquarks) through the Yukawa interaction mediated by Higgs exchange is revisited with a serious treatment of the few-body problem.

The spectroscopy of glueballs is studied with a relativistic potential model.

The basis of correlated Gaussians is adapted to handle spin-dependent operators.

The method of auxiliary field is developed and applied to a variety of problems.

The scattering length and effective-range parameter are defined for the low-energy regime of two-dimensional scattering.

We analyse the positivity constraints among observables in exclusive and inclusive reactions.

Facteurs de forme et mécanique quantique relativiste

Facteurs de forme du pion

Le comportement asymptotique du facteur de forme de charge du pion a été considéré dans une approche mécanique quantique relativiste. Celui-ci ne pouvant être obtenu à partir d'un courant à un corps, la contribution de courants à deux corps a été considérée dans les approches du front de lumière et du front instantané. Leur expression a été obtenue à partir d'une analyse des diagrammes impliquant l'échange d'un gluon. Il est montré que leur contribution permet de reproduire le comportement asymptotique attendu d'une approche de théorie des champs, y compris des corrections non-triviales. Contrairement à ce qui est parfois affirmé, une approche de mécanique quantique relativiste peut donc reproduire le comportement asymptotique du facteur de forme de charge du pion. Quantitativement, la contribution spécifique qui en est responsable ne semble pas devoir beaucoup affecter l'interprétation des mesures expérimentales disponibles.

Rôle des translations d'espace-temps

Le rôle des translations d'espace-temps est peu connu en mécanique quantique relativiste au-delà de la conservation globale de l'énergie-impulsion qui est évidemment admise. La prise en compte de contraintes liées à ces translations, restées ignorées jusqu'ici, a permis de montrer l'équivalence de différentes appro-

ches appliquées au calcul des facteurs de forme. Ces contraintes restaurent en fait l'égalité des moments transférés aux constituants et au système global, qui est généralement violée dans une approche de mécanique quantique relativiste basée sur un courant à un corps mais est vérifiée dans une approche de théorie des champs. Ces résultats ont été étendus à des constituants de spin 1/2 et de masses différentes.

Symétrie de pseudo-spin dans les noyaux

La symétrie de pseudo-spin dans les noyaux a été proposée pour rendre compte de la dégénérescence approximative d'états à une particule, et dans la couche $N=2$ par exemple. La seule justification à ce jour est basée sur la considération des petites composantes dans l'approche du champ moyen relativiste. L'argument a été mis en défaut cependant. Par ailleurs, certains états n'ont pas de partenaire, d'où un problème d'états manquants. Des modèles qui permettent de passer continûment du spectre habituel à un spectre vérifiant la symétrie de pseudo-spin ont été construits. Cette continuité assure qu'il n'existe aucun état manquant mais suggère une association des partenaires de pseudo-spin différente de celle habituellement proposée. Voir le spectre sur la figure 1. Ce choix est supporté par l'analyse des fonctions d'onde.

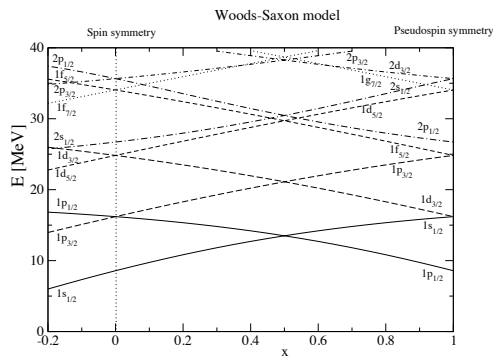


Fig. 1 : Spectre des états à une particule montrant les cas avec symétrie de spin et de pseudo-spin ($x=0$ et $x=1$ respectivement) et la transition continue entre eux. On peut y voir que les doublets de pseudo-spin associent les états $1s_{1/2}$ et $1d_{3/2}$, ou $1p_{3/2}$ et $1f_{5/2}$, alors que l'interprétation habituelle (faite à $x \sim 0,2$) associe les états $2s_{1/2}$ et $1d_{3/2}$, ou $2p_{3/2}$ et $1f_{5/2}$.

Spectroscopie hadronique

Spectroscopie des baryons

Une revue est présentée de la spectroscopie des baryons lourds et légers, à la lueur notamment des résultats récents des usines à B et des expériences de photoproduction. Les descriptions théoriques sont comparées entre elles et confrontées aux expériences.

Modèle d'arbre de Steiner pour le confinement

Le potentiel linéaire confinant un quark et un antiquark dans un méson est interprété comme la configuration minimale d'un tube de flux de gluons de section constante. Sa généralisation aux systèmes de trois quarks ou aux multi-quarks est fait de réseaux non connexes liant des sous-systèmes (flip-flop) ou d'un arbre de Steiner connexe (voir Fig. 2), et non pas de potentiels à deux corps avec des facteurs de couleur comme dans la phénoménologie traditionnelle. Une inégalité nouvelle sur les arbres de Steiner à quatre corps permet de démontrer rigoureusement la stabilité des tétraquarks (Q, Q, \bar{q}, \bar{q}) dans la limite de grand rapport de masse M/m . Ce résultat conforte une étude antérieure basée sur une résolution numérique du problème à quatre corps, qui montre la stabilité pour toute valeur de M/m , et qui elle-même infirme les résultats d'une étude américaine qui concluait à l'absence d'exotiques dans ce modèle.

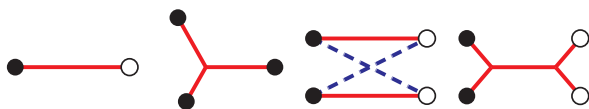


Fig. 2 : Confinement pour les mésons, les baryons et les tétraquarks, par flip-flop ou par arbre de Steiner.

À propos des amas de quarks et antiquarks top

Il a été suggéré que l'attraction produite par l'échange de boson de Higgs entre quarks ou antiquarks pour-

rait produire des amas de quarks et antiquarks top, en particulier le « dodecatoplet ». Nous présentons un traitement rigoureux du problème en combinant pour l'énergie des bornes supérieures variationnelles et une borne inférieure de type Hall-Post. Avec des valeurs plausibles pour la masse et le couplage du Higgs, ce système est très loin de la liaison.

Les boules de glu à 2 et 3 gluons

Les boules de glu sont des systèmes hadroniques, a priori observables (singlet de couleur), constitués exclusivement de gluons. Les systèmes les plus simples sont constitués de 2 ou 3 gluons.

Les boules de glu à 2 gluons ont forcément une C -parité positive, tandis que les boules de glu à 3 gluons ont une C -parité quelconque. Nous avons mené l'étude de ces systèmes en utilisant un modèle de potentiel avec une cinématique relativiste et un confinement de type tube de flux. Au départ les gluons ont une masse courante nulle, mais l'habillage par le confinement leur confère une masse constituante non nulle. Pour le potentiel à courte portée, nous avons introduit les termes habituels coulombien et dépendant du spin (spin-spin, spin-orbite) mais convolués par l'habillage du gluon.

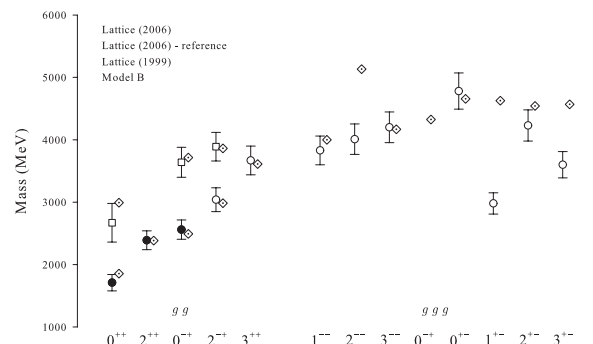


Fig. 3 : Comparaison des résultats du modèle avec quelques calculs sur réseau.

Nous avons comparé nos résultats avec ceux provenant d'études de QCD sur réseau. Nous trouvons un accord excellent, sauf pour les états 2^- et 1^{+-} pour lesquels le désaccord est très important (voir Fig. 3). Une explication possible de ce désaccord pourrait venir du fait que pour les particules de masse nulle, il faut utiliser le formalisme d'hélicité à la place du formalisme de spin.

Méthodes pour le problème à N corps

Base de Gaussiennes corrélées

En vue de tenir compte proprement du mouvement du centre de masse, la fonction d'onde d'un système constitué de N particules s'exprime à l'aide de $N-1$ variables de Jacobi, chacune étant une combinaison linéaire des positions de chaque particule.

Cette fonction d'onde est développée sur une base, non orthogonale, de gaussiennes corrélées. Dans celle-ci le

moment angulaire orbital intervient à travers une harmonique solide ayant pour argument une combinaison linéaire des variables de Jacobi fois une exponentielle dont l'argument est une forme quadratique des variables de Jacobi. Le gros avantage de ce type de base est sa rapide convergence, alliée à la possibilité de calculer de façon analytique les éléments de matrice de l'énergie cinétique, des opérateurs à 1 et 2 corps.

Cette base fut très utilisée par le passé. Nous avons remis cette méthode au goût du jour en y apportant des améliorations notables: d'abord nous avons calculé la transformée de Fourier de la fonction d'onde, ce qui permet le calcul analytique des éléments de matrice d'une énergie cinétique semi-relativiste, et nous avons trouvé une nouvelle formulation pour exprimer les éléments de matrice d'un potentiel central à 2 corps, ce qui améliore grandement la vitesse du calcul numérique. De plus, nous avons calculé les éléments de matrice d'un potentiel à 2 corps de type spin-orbite ou tenseur.

Le grand avantage de notre méthode est qu'elle est applicable quel que soit le nombre N de particules considéré, et qu'elle fait appel à des fonctions géométriques universelles donc calculables préalablement une fois pour toute.

La méthode des champs auxiliaires

Nous avons adapté la méthode des champs auxiliaires pour obtenir des formules analytiques approchées, mais remarquablement précises, pour les énergies propres d'une équation de type Schrödinger ou Salpeter d'un problème à 2 corps.

Nous désirons obtenir les énergies propres d'un Hamiltonien de la forme $H = T + V(r)$. Choisissons une fonction $P(r)$ telle que le Hamiltonien $\tilde{H}(v) = T + vP(r)$ conduise à des valeurs propres $E(v)$ analytiques. La quantité v est un champ auxiliaire. Nous introduisons une fonction $g(v)$, dépendant à la fois de $V(r)$ et $P(r)$, et considérons le Hamiltonien modifié $H'(v) = \tilde{H}(v) + g(v)$. La valeur de l'opérateur \hat{v} qui minimise $H'(v)$ implique alors $H'(\hat{v}) = H$. Notre méthode consiste à considérer v comme une constante. Les énergies propres de $H'(v)$, soit $E'(v) = E(v) + g(v)$, sont connues exactement. Nous cherchons alors la valeur v_0 qui minimise $E'(v)$ et nous estimons que $E'(v_0)$ donne une valeur approchée des énergies propres du Hamiltonien original.

Nous avons d'abord montré que cette méthode est équivalente à la méthode des enveloppes, une méthode abondamment utilisée par le passé. Nous avons d'abord étudié les propriétés générales de cette méthode (invariance, lois d'échelles...). Nous avons en particulier montré qu'en choisissant une fonction $P(r)$ de type puissance, les résultats obtenus avec $P(r) = r^2$ et $P(r) = -1/r$ sont identiques sauf pour l'expression du nombre quantique principal, respectivement $N = 2n + l + 3/2$ et $N = n + l + 1$. Nous profitons de cette propriété d'universalité pour améliorer notablement les résultats en imposant une forme de type $N = an + l + c$.

Nous avons proposé des expressions analytiques très précises (la précision est souvent inférieure à 10^{-3}) pour les énergies propres d'un grand nombre de potentiels V : potentiel puissance, potentiel logarithmique, potentiel de type exponentiel, potentiel de type «funnel» (entonnoir), etc.

Cette méthode est très prometteuse et nous comptons l'adapter pour des équations de type Salpeter (énergie cinétique relativiste) ou pour les problèmes à N corps.

Système à deux électrons

Nous présentons une revue historique et pédagogique des atomes, ions et molécules à deux électrons, en insistant sur les systèmes comme l'ion H^- dont la stabilité n'est pas évidente, surtout pour son excitation de parité non naturelle, et sur la molécule de positronium.

Ces systèmes donnent l'occasion d'initier les étudiants aux calculs perturbatifs et aux méthodes variationnelles associées ou non au théorème du viriel, de présenter les approximations de champ moyen et d'en montrer les limites pour les états très peu liés.

Diffusion à deux dimensions

La diffusion à deux dimensions réserve des surprises à la limite de très basse énergie. Le déphasage de l'onde S présente un comportement universel $\delta(k) \approx \pi/(2 \ln k)$ en fonction de l'impulsion k . L'étude plus poussée permet de définir une longueur de diffusion a et une portée effective r_e .

Les conditions de validité sont précisées, ainsi que les modifications de la formule précédente pour certaines classes de potentiel à longue portée. Cette étude est l'occasion de préciser plus rigoureusement les conditions de validité des développements de basse énergie et le cas des potentiels de longue portée pour la diffusion à trois dimensions.

Observables de spin

Ce travail, déjà présenté partiellement dans le rapport précédent, récapitule les contraintes de positivité sur les observables de spin des réactions exclusives et inclusives et sur les fonctions de distributions de partons dépendant du spin. L'accent est mis sur la différence entre les contraintes classiques et celles qui sont spécifiquement quantiques.

Le formalisme a été appliqué en particulier aux expériences de photoproduction et a permis de comparer les données de GRAAL à Grenoble et de CLAS à Jlab.

QCD sur réseau

J.-C. Anglès D'Auriac (CRTBT/LPSC), J. Carbonell, V. Drach, P.-A. Harraud, M. Mangin-Brinet
Z. Liu (mars-août 2008), M. Papinutto (à partir de février 2009), F. de Soto (U. Sevilla)

We report progress on lattice QCD, within a collaboration with other groups, and the European network ETMC (European Twisted Mass Collaboration).

The mass spectrum of the ground state for the baryon octet and decuplet have been computed using $N_f = 2$ dynamical light quarks. Relying on this mass value obtained for the proton, we have computed the elastic electromagnetic form factors as well as the first momentum of parton distribution function and some generalized form factors.

Using the lattice technique, we have obtained the full quantum field solution for the Yukawa model, which constitutes the basis of the nuclear forces.

In the framework of the ANR "PetaQCD" ("Cosinus" program), we investigate, with other specialists on computer science, the scalability properties of LQCD algorithms and programs.

L'activité «calcul sur réseau» du groupe Théorie du LPSC s'inscrit au niveau national dans une collaboration que nous poursuivons depuis 2005 avec les groupes du LPT d'Orsay, du SPhN Saclay et du LPC Clermont ayant pour but l'utilisation des techniques «réseau» dans la Physique des Particules, Hadronique et Nucléaire.

Nous avons abordé plusieurs thématiques. Nous avons commencé par résoudre la QCD «unquenched» où des paires q de saveurs différentes sont virtuellement produites à partir des gluons. Ce travail, démarré début 2007, se réalise dans le cadre de la collaboration européenne ETMC (European Twisted Mass Collaboration, <http://www-zeuthen.desy.de/kjansen/etmc/>) utilisant une discrétisation particulière de l'action QCD et regroupant les calculateurs dédiés de différents pays (Italie, Allemagne, Hollande, France, Espagne). Ces ordinateurs génèrent des configurations de jauge avec $N_f=2$ et $N_f=2+1+1$ quarks dynamiques qui sont mises en commun parmi les membres de la collaboration et utilisées pour des projets de physique spécifiques, comme c'est le cas dans les grosses collaborations expérimentales. En ce qui concerne le LPSC, ce travail est pour l'instant consacré à l'étude des propriétés des baryons : masses, facteurs de forme, distributions de quarks, distributions de partons généralisées (GPD). Les masses de pions accessibles actuellement sont $m \approx 250$ MeV.

Étude des Baryons

Un premier travail a été consacré à l'étude du Nucléon (N), du Delta (Δ) ainsi qu'au calcul des distributions de partons. Les premiers résultats ont fait l'objet de deux contributions à la conférence Lattice 07, ainsi que de nombreux séminaires (Centre Galileo de Florence, Univ. de Valencia, Univ. Chypre, Meeting Flavianet, IHEP Pékin, Université de Pékin, Univ. Glasgow). Une publication détaillée sur les masses du N et du Δ est parue en 2008. Un deuxième article sur les masses des baryons étranges (octet et décuplet) est en cours de publication (voir Fig. 1). Un intérêt spécial a été porté à l'étude du contenu étrange du N , qui ne

peut résulter que d'un calcul «unquenched», et se fait tout naturellement en comparant les résultats $N_f=2$ et $N_f=2+1+1$.

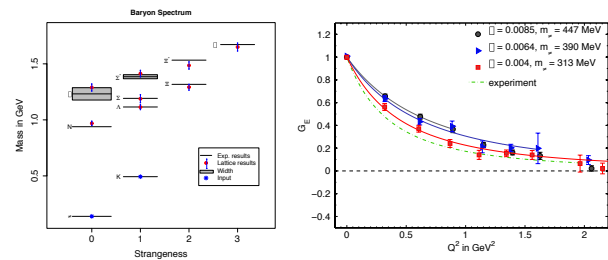


Fig. 1: Spectre des baryons avec $N_f=2$ (à gauche) et facteur de forme électrique du proton (à droite).

À partir de 2008, un effort important a été fait pour obtenir les facteurs de forme du nucléon. Les premiers résultats ont été présentés à la conférence Lattice08. Nous avons montré sur la figure 1 le facteur de forme électrique du proton en fonction du moment transféré. La tâche principale pendant l'année 2009 consistera à obtenir des résultats concluants sur les facteurs de forme élastiques ainsi que les premiers moments des GPD.

Forces nucléaires

Une seconde thématique aborde les «forces nucléaires» en utilisant les techniques de calculs sur réseau. L'utilisation de ces techniques en Physique Nucléaire a pour application naturelle l'obtention des paramètres de l'interaction nucléon-nucléon à partir du lagrangien QCD. Toutefois la complexité de la QCD «in its full glory» limite l'application de cette approche aux systèmes nucléaires les plus simples et n'ira jamais au-delà du deuton. Une autre approche est possible. Elle 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 amputa-

tion sévère de l'interaction surtout dans le domaine des grandes constantes de couplage. L'application des méthodes « Réseau » à ce problème constitue une nouvelle approche de la physique nucléaire en termes des champs de nucléons et de mésons qui incorpore toute la complexité de l'interaction – à deux comme à plusieurs corps – tout en évitant la notion même de potentiel.

Les résultats obtenus ont fait l'objet de publications et de séminaires. Ce travail, interrompu après départ de F. de Soto, boursier PostDoc Marie Curie au laboratoire, continue avec l'arrivée de J.-C. Anglès d'Auriac, théoricien de la physique du solide qui s'est joint à notre groupe de calcul sur réseau pour ce projet. Les conclusions obtenues jusqu'à présent 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 ». Un calcul « unquenched » s'avère nécessaire et est en cours.

Vers la PetaQCD

Une troisième thématique – complémentaire des deux précédentes – s'est ouverte depuis le début de 2009, avec l'obtention d'une ANR du programme « Cosinus » (PetaQCD) impliquant des laboratoires de physique, d'informatique (INRIA) et des entreprises privées intéressées par le Calcul de Haute Performance (HPC), un des défis des années à venir. Il mobilise les grands constructeurs (IBM, Fujitsu, Bull) ainsi que des groupes industriels de premier plan (EDF, EADS, Total) pour tirer profit de cette révolution qui s'annonce dans le calcul scientifique intensif. Le calcul sur réseau a été dès son origine au berceau de ces développements techniques, soit en construisant ses propres ordinateurs dédiés, comme les APE, soit en inspirant les architectures des supercalculateurs, comme la BG/P issue de la collaboration anglo-américaine QCDOC. Le but de l'ANR « PetaQCD » est d'étudier le changement d'échelle des algorithmes et des architectures (Cell, GPU) à l'échelle pétaflopique en prenant comme paradigme les programmes de LQCD.

QCD perturbative et supersymétrie

R. Bonciani, J. Debove, S. Fichet, B. Herrmann, T. Jezo, M. Klasen, K. Kovarik, S. Kraml, I. Schienbein, T. Stavreva, C. Weydert

IPN Lyon, LAPTH Annecy, Cambridge U., MIT, IPPP Durham, DESY, U. de Barcelone, U. de Strasbourg, Bonn U., Heidelberg U., U. de Hambourg, RWTH Aachen et DESY, U. de Karlsruhe, U. Catholique de Louvain, SINP Moscow, Cambridge U., METU Ankara, U. de Mayence, Florida State U.

The research carried out in perturbative QCD includes a global analysis of fragmentation functions for D-mesons; studies of D-meson production in photon-hadron and hadron-hadron collisions in a general-mass variable flavor-number scheme using the improved fragmentation functions and testing the sensitivity of the processes to the intrinsic charm content of the nucleon; the analysis of quarkonium production in polarized hadron collisions; the study of factorization breaking in jet photoproduction; and a survey of physics opportunities in photon collisions at the LHC. The physics potential of a future high-energy and high-statistics neutrino experiment has also been investigated.

The research carried out in supersymmetry concerns the study of supersymmetric (SUSY) particle production in polarized and unpolarized hadron collisions and of scenarios with non-minimal flavor violation (NMFV), in particular in models with gauge-mediated SUSY breaking (GMSB); the calculation of QCD corrections to the dark matter relic density; its possible determination through measurements at a future International Linear Collider (ILC); and the study of charged or singlino relic particles and of the implications of particular models of supersymmetric grand unification for collider physics and cosmology. The Supersymmetry Les Houches Accord (SLHA) provides a universal set of conventions for interfacing computational tools such as RGE spectrum codes, decay packages and event generators.

Production de jets et saveurs lourdes

Fonctions de fragmentation de mésons D

Nous avons évalué la production inclusive de mésons D dans l'annihilation e^+e^- à l'ordre suivant l'ordre dominant (NLO) de la QCD dans le schéma GM-VFNS (general-mass variable flavor-number scheme). Nous avons déterminé les fonctions de fragmentation non-perturbatives pour les mésons D^0 , D^+ et D^{*+} par ajustement global aux données des collaborations Belle, CLEO, ALEPH et OPAL en prenant en compte les corrections électro-faibles dominantes dues à l'émission de photons dans l'état initial.

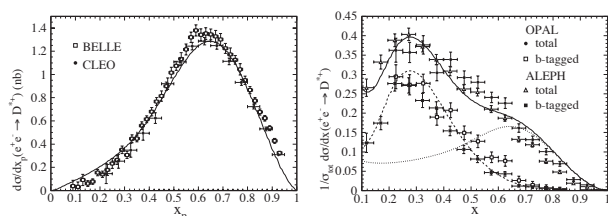


Fig. 1 : Distribution en x_p du méson D^{*+} de Belle et CLEO (à gauche) et distribution normalisée en x du méson D^{*+} de ALEPH et OPAL (à droite) comparées au résultat d'un ajustement global. À droite, les lignes pointillée, brisée et continue se réfèrent aux contributions initiées par un quark c , b et à la contribution totale, respectivement.

Nous avons calculé l'effet des masses par comparaison avec une analyse similaire dans le schéma ZM-VFNS (zero-mass variable-flavor-number scheme). Aux conditions expérimentales de Belle et CLEO, les effets liés à

la masse du méson D sur l'espace de phase s'avèrent être appréciables, tandis que les effets de la masse du quark charmé sur les éléments de matrice partoniques sont moins importants.

Photoproduction de mésons $D^{*\pm}$ à NLO de la QCD dans le GM-VFNS

Nous avons étudié la production inclusive de mésons dans les collisions photon-proton auprès du collisionneur HERA à DESY basée sur le calcul NLO dans le GM-VFNS. Dans cette approche, la soustraction dans le schéma de factorisation $\overline{\text{MS}}$ est appliquée de manière à ce que les grandes corrections logarithmiques soient resommées en des distributions de partons et fonctions de fragmentation universelles. En même temps les termes de masses finis sont pris en compte. Nous avons présenté des résultats numériques détaillés pour la comparaison avec les données obtenues à HERA et discuté des diverses sources d'incertitude théorique.

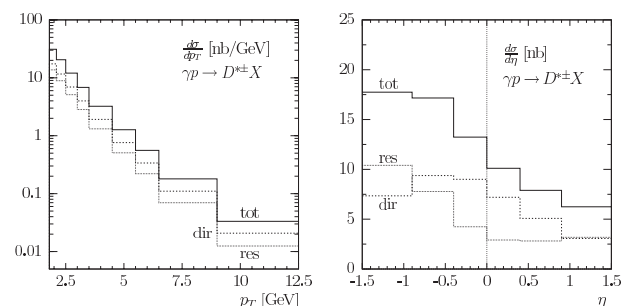


Fig. 2 : Sections efficaces différentielles (a) $d\sigma/dp_T$ et (b) $d\sigma/d\eta$ pour $ep \rightarrow D^{*\pm} X$ via photoproduction directe (dir) et résolue (res) et leur somme (tot) à NLO dans le GM-VFNS.

Production de mésons D et charme intrinsèque du proton

Nous avons étudié la production inclusive de hadrons charmés dans les collisions hadroniques comme laboratoire pour tester le contenu charmé intrinsèque (IC) à l'intérieur des hadrons en collision. En travaillant à NLO dans le GM-VFNS avec les fonctions de fragmentation décrites ci-dessus, nous avons d'abord examiné la sensibilité des données du Tevatron sur la production inclusive de mésons D^0 , D^+ et D^{*+} , en utilisant les paramétrisations IC fournies par la collaboration CTEQ. Ensuite, nous avons discuté dans quelle mesure les données analogues du collisionneur pp RHIC auraient la faculté de discriminer entre différents modèles IC sous réserve d'atteindre d'assez grandes impulsions transverses.

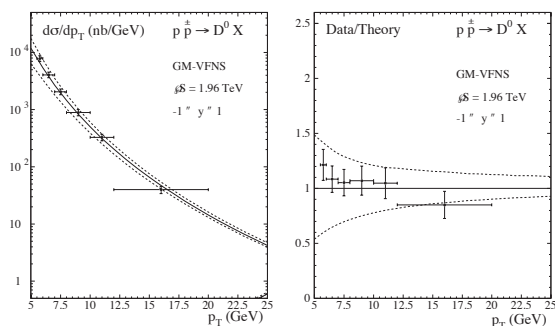


Fig. 3: La section efficace $d\sigma/dp_T$ en fonction de p_T pour le processus $p+\bar{p}\rightarrow D^0+X$ à $\sqrt{s}=1,96$ TeV et $|y|<1$ évaluée à NLO dans le GM-VFNS en utilisant les nouvelles fonctions de fragmentation décrites ci-dessus. Les lignes continues représentent les prédictions par défaut pour $\xi_R=\xi_F=1$ et les lignes brisées indiquent les déviations maximales pour des variations indépendantes dans la plage $1/2 < \xi_R, \xi_F < 2$.

Production de charmonia dans les collisions polarisées à haute énergie

Dans un article précédent, nous avons analysé la production de mésons J/ψ dans les collisions de hadrons ou photons polarisés dans le cadre de la QCD non-relativiste, et donné des résultats analytiques compacts pour la double asymétrie longitudinale A_{LL} . Par commodité, nous avons utilisé une expression simplifiée pour le produit tensoriel du quadri-vecteur de polarisation de gluons avec son conjugué complexe, au prix de l'introduction de fantômes en tant que particules extérieures. Tandis que ces contributions s'annulent dans l'asymétrie A_{LL} et étaient donc omises dans notre article précédent, elles apparaissent dans les sections efficaces absolues et sont données explicitement dans un article supplémentaire.

Brisure de factorisation dans la photoproduction diffractive de dijets

Après publication des analyses finales des collaborations H1 et ZEUS pour la photoproduction diffractive de dijets, nous avons recalculé ces sections efficaces au premier ordre au-delà de l'ordre dominant (NLO) de

la QCD perturbative et vérifié qu'elles peuvent être interprétées de façon cohérente. Les résultats de ces calculs sont comparés aux données des deux collaborations. Nous mettons en évidence qu'à NLO les sections efficaces sont en désaccord avec les données, ce qui montre que la factorisation est brisée à cet ordre. Si les contributions des photons directs et résolus sont toutes deux supprimées, le facteur de suppression global dépend de la coupure sur l'énergie transverse et est 0,42 pour l'analyse de H1 et 0,71 pour l'analyse de ZEUS. Par contre, si on ne supprime que la contribution des photons résolus par un facteur unique de trois, on trouve un accord satisfaisant avec toutes les données. La taille des effets brisant la factorisation pour les photons résolus est en bon accord avec les prédictions des modèles avec absorption.

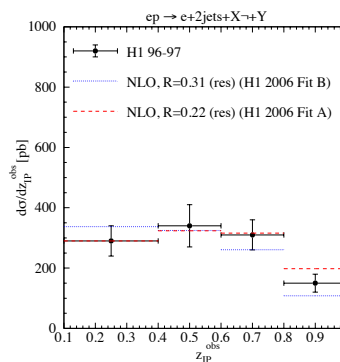


Fig. 4: Section efficace différentielle pour la photoproduction diffractive de dijets mesurée par H1 et comparée à la QCD à NLO avec suppression des photons résolus et deux densités de partons diffractives.

Collisions de photons à haute énergie auprès du LHC

Après l'arrêt des collisionneurs LEP et HERA et bientôt du Tevatron et en l'absence d'ILC, le LHC fournira un environnement presque unique pour étudier des collisions de photons à haute énergie, en concurrence seulement avec les usines à mésons B et le collisionneur RHIC à plus basse énergie. Les événements du LHC seront en fait dominés par la diffusion vers l'avant et vont contenir beaucoup d'événements élastiques et de faible excitation nucléaire. L'identification des protons (et neutrons) sera cruciale pour une exploitation de ces événements à cette fin, et plusieurs détecteurs sont actuellement en cours d'installation aux côtés d'ALICE, ATLAS et CMS. Le premier atelier sur les collisions des photons à haute énergie auprès du LHC a démontré qu'il existe un fort potentiel de physique très intéressante.

Diffusion de neutrinos

Dans deux articles est discutée la physique accessible par une expérience de diffusion de neutrinos à haute énergie et haute statistique, NuSonG. L'étude considère un faisceau de neutrinos produit au Tevatron dans le but d'obtenir une statistique d'un ordre de

grandeur plus élevée que ce qui est accessible à présent pour les processus faibles purs $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ et $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_e + \mu^-$. On pourrait obtenir un échantillon d'événements de diffusion profondément inélastique (DIS) de deux ordres de grandeur plus grand que la totalité de données DIS existantes. En conséquence, NuSOnG serait unique parmi les expériences existantes ou projetées pour sa capacité à sonder les couplages du neutrino dans la physique au-delà du modèle standard, et aussi pour réaliser des mesures de précision en QCD.

Supersymétrie

SUSY Les Houches Accord 2

L'Accord de Supersymétrie des Houches (Supersymmetry Les Houches Accord, SLHA) définit un ensemble universel de conventions sur les propriétés du spectre et des désintégrations. Cela a pour but de simplifier les interfaces entre différents programmes comme les calculateurs de spectre, les calculateurs de désintégrations, les générateurs Monte Carlo, etc. Différentes généralisations ont été incluses: le modèle minimal supersymétrique avec violation de CP, R-parité, saveurs, et le modèle standard supersymétrique non minimal le plus simple.

Production de particules supersymétriques

Production de paires de jauginos par hadrons polarisés

Nous présentons une première étude de la production de paires de jauginos dans les collisions de hadrons polarisés et non-polarisés en nous focalisant sur la corrélation de la polarisation du faisceau et du mélange jaugino/higgsino dans le modèle minimal supersymétrique (MSSM) général. Les sections efficaces dépendant de l'hélicité et induites par les courants électro-faibles neutres/chargés et les échanges de squarks sont calculées analytiquement en termes de charges généralisées.

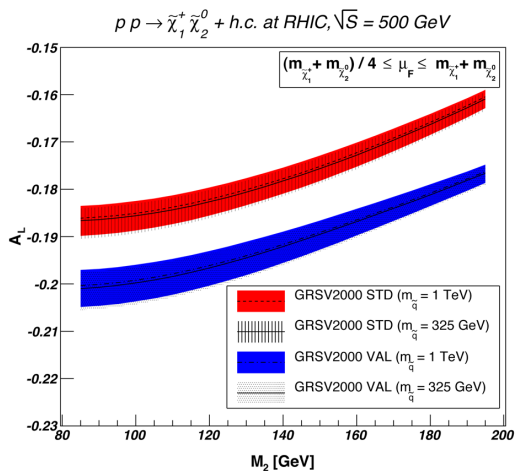


Fig. 5: Asymétrie longitudinale simple pour la production associée de charginos et neutralinos avec $m_{\tilde{\chi}_2^0} = m_{\tilde{\chi}_1^+} = 80 \text{ GeV}$ dans les collisions pp au RHIC avec $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$ en utilisant les densités de parton LO de GRV et GRSV. Nous choisissons $\tan\beta = 10$, $\mu > 0$ et fixons $M_1 = \frac{2}{3} \tan 2\theta_W M_2$.

En supposant que la masse du chargino le plus léger est connue, nous montrons numériquement que les mesures de la simple asymétrie longitudinale au collisionneur RHIC, ainsi qu'au Tevatron ou au LHC qui seraient dotés de polarisation, permettraient de déterminer les fractions de jaugino/higgsino des charginos et neutralinos. L'incertitude théorique provenant des variations d'échelle, de la masse des squarks et de l'erreur expérimentale sur la masse du chargino le plus léger est généralement plus petite que celle induite par les densités de partons polarisées, si bien que plus d'information sur ces dernières améliorerait beaucoup cette analyse.

Violation de la saveur non-minimale en supersymétrie

Nous présentons une analyse détaillée de modèles de supersymétrie brisée par interaction de jauge avec violation de la saveur minimale et non-minimale. Nous montrons d'abord que les contraintes à basse énergie, venant des données précises électro-faibles et cosmologiques, excluent des grandes régions de l'espace minimal de paramètres accessible auprès des collisionneurs. Nous discutons ensuite plusieurs possibilités pour que la violation de la saveur, bien que supprimée naturellement, puisse toujours apparaître dans des modèles avec médiation de jauge. Nous montrons que l'introduction de la violation de saveur non-minimale à l'échelle électro-faible peut relaxer les contraintes expérimentales strictes, de façon à pouvoir définir des points de référence compatibles aussi par la cosmologie et à étudier la production de squarks et jauginos avec violation de la saveur non-minimale auprès du LHC.

	Λ [TeV]	M_{mesl} [TeV]	N_{mes}	$\tan\beta$	$\text{sgn}(\mu)$	λ_{LL}	NLSP	SPS
E	65	90	1	15	+	[0,14; 0,20]	$\tilde{\chi}_1^0$	8
F	30	80	3	15	+	[0,12; 0,18]	$\tilde{\tau}_1$	7
G	100	110	1	30	+	[0,14; 0,20]	$\tilde{\tau}_1$	—
H	45	100	3	30	+	[0,12; 0,18]	$\tilde{\tau}_1$	—
I	130	140	1	50	+	[0,14; 0,20]	$\tilde{\tau}_1$	—
J	60	100	3	50	+	[0,14; 0,20]	$\tilde{\tau}_1$	—

Table 1: Points de référence en GMSB admis avec une violation non-minimale de la saveur dans les secteurs chiraux de squarks gauche-gauche ($\lambda_{RR} = 0$) ou gauche-gauche et droit-droit ($\lambda_{RR} = \lambda_{LL}$). Nous indiquons aussi la région admise du paramètre violant la saveur λ_{LL} , l'identité de la deuxième particule SUSY la plus légère (NLSP) et le point de référence SPS le plus proche (s'il existe).

Matière noire

Annihilation de neutralinos en quarks lourds

Nous avons calculé les corrections d'ordre α_s en QCD supersymétrique, pour l'annihilation des neutralinos en quarks lourds due à l'échange de bosons de jauge, de Higgs ou de squarks dans le modèle minimal supersymétrique (MSSM), en tenant compte de la resommation connue des termes logarithmiques. L'impact numérique des corrections sur l'extraction des paramètres de

masse à partir des données cosmologiques est analysé pour des scénarios de brisure de SUSY par la gravitation et s'avère très significatif. Ces corrections doivent être prises en compte de façon récurrente dans les outils d'analyse habituels comme micrOMEGAs.

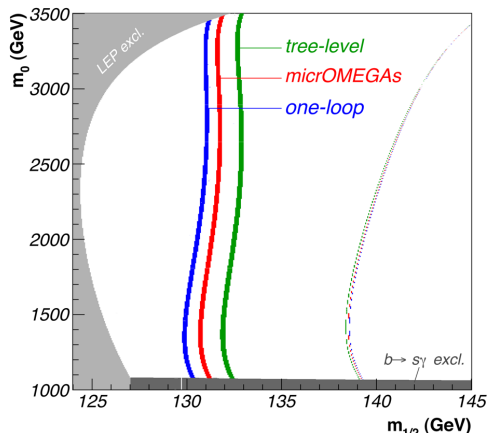


Fig. 6: Effets des corrections radiatives sur les régions favorisées par la cosmologie dans le plan $m_0 - m_{1/2}$ pour $\tan\beta=10$, $\mu > 0$ et $A_0 = -1500$ GeV avec annihilation dominante des neutralinos en quarks de beauté.

Densité d'une relique chargée

Nous avons examiné des scénarios où une particule scalaire à grande durée de vie se découple du plasma primordial au début de l'Univers. Nous avons calculé la densité au moment du gel («freeze-out»), en considérant les cas abéliens et non-abéliens, et en incluant l'effet Sommerfeld à basse vitesse initiale. Nous avons aussi discuté comme cas extrême la section efficace maximale compatible avec la borne d'unitarité. Nous avons comparé ces densités avec la recherche de noyaux exotiques pour les reliques stables et les contraintes de la nucléosynthèse (BBN) sur les reliques instables. Des contraintes ont été dérivées dans les cas où la seconde particule supersymétrique la plus légère (NLSP) est le stau ou le stop, et la plus légère (LSP) est le gravitino ou l'axino.

Découvrir la matière noire singlino par des leptons mous au LHC

Nous avons discuté d'un scénario de type Modèle Standard Supersymétrique Non Minimal (NMSSM), motivé par les contraintes sur la matière noire, qui pourrait se confondre avec un scénario de type supergravité minimale au LHC. Nous avons montré que sa nature non minimale pourrait être révélée, et la différence de masse bino-singlino mesurée, par l'étude des leptons mous. En particulier, nous avons démontré qu'en abaissant le seuil de quantité de mouvement transverse dans la recherche standard de di-leptons, des propriétés inattendues pourraient se dévoiler. Avec notre méthode, ce scénario NMSSM devrait être détectable jusqu'à une différence bino-singlino $\Delta m = m_{\tilde{\chi}_2^0} - m_{\tilde{\chi}_1^0} \simeq 0,8$ GeV; cette différence de masse devrait être mesurable avec une bonne précision.

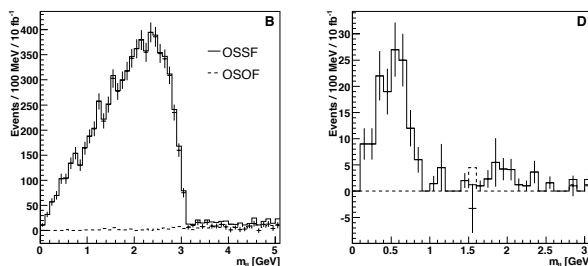


Fig. 7: Distribution invariante de masse de dileptons dus à une transition bino-singlino, $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 l^+ l^-$, pour les points de référence B (à gauche) et D (à droite), qui ont $\Delta m = 3$ GeV et $0,9$ GeV, respectivement.

Densité de neutralinos reliques par des mesures auprès d'un ILC

Dans le modèle standard supersymétrique minimal, de nouvelles phases de violation de CP peuvent avoir une influence importante sur la phénoménologie de la physique auprès des collisionneurs, sur la densité relique du neutralino, ainsi que sur les sections efficaces de détection directe et indirecte de matière noire. Nous avons donc étudié la précision avec laquelle on pourrait déterminer les paramètres fondamentaux et la densité relique du neutralino auprès d'un collisionneur linéaire international (ILC) dans le modèle standard supersymétrique avec violation de CP (CPV-MSSM). Nous avons démontré, pour un scénario de neutralinos et staus légers, que les observables conservant CP permettent de contraindre les paramètres du modèle avec une bonne précision, à l'exception des paramètres μ et $\tan\beta$ qui sont fortement corrélés. La densité relique Ωh^2 pourrait être contrainte dans l'intervalle $0,116 < \Omega h^2 < 0,19$ à 95% CL. Les observables impaires en CP donneraient un signal direct de la violation de CP, mais ne permettent pas d'affiner les paramètres du modèle ni d'affiner Ωh^2 . De plus, nous avons discuté les corrélations avec la détection directe et indirecte de la matière noire, et les mesures de moments dipolaires électriques.

Phénoménologie de la grande unification supersymétrique

Phénoménologie de l'unification dans le secteur Yukawa

Des modèles simples de grande unification supersymétrique basés sur le groupe de jauge SO(10) requièrent, outre l'unification dans les secteurs de jauge et de matière, l'unification des couplages de Yukawa t-b- τ . Cependant cette dernière n'apparaît que pour des valeurs très particulières des paramètres de brisure supersymétrique. Nous avons utilisé une technique de «Markov Chain Monte Carlo» (MCMC) pour parcourir efficacement l'espace des paramètres de ces modèles. Nous avons ainsi trouvé que les scénarios valables sont caractérisés par trois échelles de masse: première et deuxième génération de scalaires dans le domaine multi-TeV, troisième génération de scalaires dans le domaine du TeV, et jauginos dans le domaine de la centaine de GeV.

La plupart des solutions donnent une trop grande abondance de matière noire neutralino, ce qui peut être corrigé de différentes façons: 1) permettre une désintégration du neutralino en axino et photon, 2) renoncer à l'universalité des masses de juginos; 3) ou à l'universalité des générations. Grâce à la méthode MCMC nous avons aussi trouvé les solutions suivantes: 4) un compromis où les scalaires ne sont pas trop lourds, et l'annihilation apparaît via une résonance de Higgs légère h et 5) des cas avec μ et m_A légers où l'annihilation des neutralinos apparaît via une résonance A légère, bien que cette solution semble exclue par les mesures de CDF/D0 sur le rapport de branchement $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$.

Les exigences combinées d'unification des couplages de Yukawa et de l'abondance de matière noire mesurée par WMAP donnent des prédictions particulières pour le LHC. Les gluinos ont une masse de 350-450 GeV, et leur production par paires est dominante. Les événements sont caractérisés par une grande multiplicité des jets de b et une masse invariante de dileptons autour de $m_{\tilde{\chi}_2^0} - m_{\tilde{\chi}_1^0} \approx 50-75$ GeV. La première étude phénoménologique de SO(10) avec unification des couplages de Yukawa a été suivie d'une analyse détaillée des perspectives de découverte au LHC. Enfin, nous avons analysé les conséquences pour la cosmologie, avec un mélange de matière noire axion/axino tiède et froide. Nous étudions en ce moment l'influence du mécanisme de «see-saw» sur cette classe de modèle.

Phénoménologie de l'unification supersymétrique jauge-Higgs

L'unification supersymétrique des secteurs de jauge et Higgs est un scénario bien motivé de nouvelle physique, à la fois par les modèles de cordes «hétérotiques» et par les théories de grande unification à dimensions supplémentaires. Combiné à la brisure de supersymétrie par «radion», ce type de modèle induit des prédictions très particulières pour les paramètres du MSSM. Nous avons implémenté cette classe de modèle dans SuSpect. Cela a permis de dériver les prédictions à basse énergie, qui peuvent être testées au LHC. Le succès phénoménologique de ce type de modèle provient du terme de Chern-Simons 5D, qui n'avait pas été pris en compte dans les études antérieures.

