

# Quarks, Leptons et Interactions fondamentales

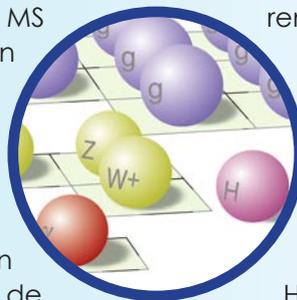
La théorie des particules élémentaires appelée Modèle Standard (MS) s'est élaborée au cours des 30 dernières années. Selon cette description, de la matière sont les leptons et les quarks; ceux-ci sont classés en trois générations, à l'intérieur desquelles les particules ont des propriétés similaires, à l'exception de leur masse. Les interactions entre ces particules sont décrites comme résultant de l'invariance par rapport au groupe de symétrie  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ . Elles sont portées par une autre classe de particules, les bosons de jauge, dont le couplage aux particules de « matière » définit l'intensité de l'interaction.



L'interaction forte est ainsi représentée par le groupe de symétrie de couleur  $SU(3)_C$ , qui décrit les interactions liant les quarks à l'intérieur des protons et neutrons. C'est une symétrie conservée dont les bosons médiateurs sont les gluons, sans masse. L'intensité du couplage fort varie avec l'énergie à laquelle se déroule l'interaction, et se réduit lorsque cette dernière s'accroît. Les deux conséquences notables sont qu'aux faibles énergies les quarks ne peuvent apparaître que dans un état lié à un autre quark, comme c'est le cas à l'intérieur du noyau. En revanche, à de hautes énergies, ces fermions se comportent comme des particules quasi-libres. L'électromagnétisme est porté par un boson de masse nulle, le photon, qui couple les particules de charge électrique non nulle. L'intensité de ce couplage n'est pas constante mais, à l'opposé de l'interaction forte, s'accroît avec l'énergie de l'interaction. Enfin, l'interaction faible, responsable par exemple de la radioactivité  $\beta$ , est portée par des bosons neutre et chargé, les bosons Z et W observés pour la première fois en 1983 au CERN, après la mise en évidence de l'existence du courant neutre faible par l'expérience Gargamelle dix ans auparavant. Ces bosons étant très massifs, la force faible n'opère qu'à de courtes distances, contrairement à l'électromagnétisme, de portée infinie. Les deux interactions électromagnétique et faible sont réunies dans l'interaction électrofaible décrite par le groupe  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ . Cette symétrie est cependant spontanément brisée à une énergie de l'ordre de  $\sim 200$  GeV et ne conserve que le groupe  $U(1)_{EM}$  de l'électromagnétisme comme symétrie résiduelle. Ce mécanisme de brisure de symétrie est l'élément central de toute théorie prétendant décrire le secteur électrofaible et n'est à ce jour pas encore identifié.

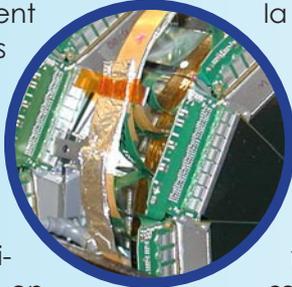


Dans le MS, le mécanisme de brisure de symétrie est le mécanisme de Higgs. Techniquement, il nécessite l'introduction d'un doublet de champs scalaires dont une composante neutre développe une valeur moyenne non nulle dans le vide. Trois composantes sont absorbées sous forme de degrés de liberté longitudinaux des bosons W et Z, leur permettant d'acquérir une masse. La dernière survit sous la forme d'une particule scalaire neutre, le boson de Higgs. Les autres particules du MS acquièrent leur masse par un couplage de type particulier au champ de Higgs, le couplage de Yukawa. À ce jour, le MS rend compte de tous les phénomènes de hautes énergies, à l'exception notable, sous sa forme actuelle en tout cas, de la masse non nulle des neutrinos. Élaboré selon une théorie renormalisable, le MS permet de décrire de manière précise l'ensemble des observables à tous les ordres de correction, à partir d'un ensemble fini de paramètres. Ce pouvoir prédictif s'est révélé notamment dans l'annonce de l'existence du 6<sup>ème</sup> quark, (FNAL, Chicago), dans la gamme de masse prévue. Toutefois le boson de Higgs n'a toujours pas été mis en évidence: les recherches directes conduites auprès des collisionneurs  $e^+e^-$  au LEP (CERN, Genève) et à SLAC (Stanford, USA) ont permis d'établir une limite inférieure sur sa masse à  $114$  GeV/ $c^2$ ; les recherches indirectes, utilisant la mesure précise de quantités mesurables bien déterminées conduisent à une limite supérieure de  $260$  GeV/ $c^2$  pour sa masse.



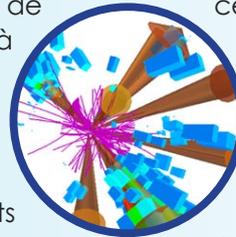
L'importance de la recherche indirecte apparaît dans le choix des activités des groupes DØ (TeVatron) et ATLAS (LHC) du LPSC, fortement impliqués dans les mesures de précision associées au W et au top.

Si le MS est actuellement il n'apparaît toutefois valide (aux basses énergies) les constantes semblent converger à trois interactions  $10^{16}$  GeV. Les corrections à cette échelle d'unification nécessitent la mise en œuvre de mécanismes de compensation sur plus de 20 ordres de grandeurs: c'est le problème de hiérarchie de jauge. Plusieurs approches permettent de résoudre ces problèmes, et sont étudiés par les groupes DØ et ATLAS du LPSC.



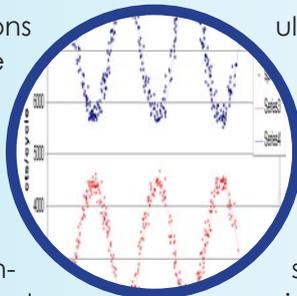
la théorie de référence pour le secteur électrofaible, aujourd'hui que comme une description effective (à très haute énergie, suggérant une unification des interactions radiatives (quadratiques) à la masse du Higgs) d'une théorie plus fondamentale. En de couplage introduites précédemment sembleraient très haute énergie, suggérant une unification des interactions radiatives (quadratiques) à la masse du Higgs sont dès lors remarquablement élevées et nécessitent la mise en œuvre de mécanismes de compensation sur plus de 20 ordres de grandeurs: c'est le problème de hiérarchie de jauge. Plusieurs approches permettent de résoudre ces problèmes, et sont étudiés par les groupes DØ et ATLAS du LPSC.

L'extension la plus répandue du MS repose sur une nouvelle symétrie, la supersymétrie (SUSY). Intégrant le secteur électrofaible dans sa description standard, la SUSY en offre un cadre étendu en prédisant le doublement du nombre de particules. Aucune de ces particules n'ayant à ce jour été mise en évidence, la SUSY est brisée à notre échelle, mais les mesures de précision et des considérations théoriques permettent cependant d'établir une limite supérieure de quelques TeV sur leur masse. Le groupe DØ du LPSC est impliqué dans la recherche de certaines de ces particules, les s-quarks et les gluinos. Dans le cadre SUSY, le secteur de Higgs est enrichi: nécessitant l'introduction de deux doublets scalaires, le modèle prévoit la présence de cinq bosons de Higgs, trois neutres (h, H et A) et deux chargés ( $H^+$ ,  $H^-$ ). Le spectre en masse de ces bosons est prédit et de fortes contraintes imposent que le Higgs neutre le plus léger soit de masse inférieure à  $150 \text{ GeV}/c^2$ . Le groupe ATLAS du LPSC est impliqué dans les recherches directe et indirecte des bosons de Higgs chargés.



D'autres théories au-delà du MS ont été élaborées depuis près de trente ans, et sont étudiées au LPSC: elles mettent en jeu soit une extension du groupe de symétrie interne – ce sont les modèles basés sur les théories des cordes ou sur la restauration de la symétrie droite/gauche, soit une extension du groupe de symétrie externe – par le biais de modèles à dimensions supplémentaires d'espace-temps. Ces modèles ont en commun de prédire l'existence de nouveaux bosons de jauge neutres supplémentaires, appelés  $Z'$ , dont les propriétés, fixées par la structure du groupe de symétrie sous-jacent dépendent du modèle considéré. Le groupe du LPSC se propose ainsi, au-delà de la détection d'un boson  $Z'$ , d'en identifier l'origine par le développement d'analyses discriminantes.

Enfin, le groupe de recherche sur les neutrons explore des théories fondamentales de une approche distincte: la mesure du moment dipolaire non nul du neutron. Une violation conjointe de la symétrie de parité (P) et d'inversion du temps (T). La valeur attendue dans le cadre du MS est donc extrêmement faible, et probablement hors portée des mesures expérimentales. Cependant, certaines extensions du MS dont des modèles SUSY, prévoient de nouveaux mécanismes de violation de T qui engendrent des valeurs plus élevées du moment magnétique dipolaire du neutron. C'est dans ce cadre que s'insèrent les activités du groupe du LPSC au sein de l'expérience nEDM au PSI. ■



ultra-froids complète cette physique des particules par la mesure du moment dipolaire du neutron. Une violation conjointe de la parité (P) et d'inversion du temps (T) ne peut résulter que des extensions du MS est donc hors portée des mesures expérimentales. Cependant, certaines extensions du MS dont des modèles SUSY, prévoient de nouveaux mécanismes de violation de T qui engendrent des valeurs plus élevées du moment magnétique dipolaire du neutron. C'est dans ce cadre que s'insèrent les activités du groupe du LPSC au sein de l'expérience nEDM au PSI. ■

## L'expérience DØ

*G. Sajot, Y. Arnaud, F. Chevallier (th.), S. Crépe-Renaudin, A.-M. Magnan (th.), B. Martin dit Latour (th.), J. Stark, C. Yu (vis.).*

*The DØ experiment is a general purpose experiment located at the Fermilab's high energy accelerator, the Tevatron collider. Since the beginning of 2000, the experiment has been recording proton-antiproton collisions at 1.96 TeV and at a rate 10 times higher than what was achieved during the first phase of running which lead to the discovery of the top quark in 1995. The Tevatron thus presently offers a unique opportunity to search for new physics signs at high energies. In this context, the LPSC group has been involved in the search for supersymmetry and top quark physics. These activities have been driven by a significant implication in technical tasks devoted to the understanding and the improvement of the calorimeter performance, the design of software tools to identify electromagnetic objects, and the improvement of simulation tools.*

L'expérience DØ (Figure 1) est l'une des deux expériences de physique des particules installées sur le Tevatron, le collisionneur du laboratoire Fermi près de Chicago (USA). DØ est une collaboration internationale d'environ 600 physiciens répartis dans 83 institutions appartenant à 19 pays. Le Tevatron produit des collisions entre des faisceaux de protons et d'anti-protons à une énergie dans le centre de masse de 1,96 TeV, et est de fait le collisionneur le plus puissant au monde. C'est au Tevatron qu'a été mis en évidence le quark le plus lourd, le top, par les collaborations DØ et CDF en 1995.

Depuis le démarrage de sa deuxième phase de fonctionnement (Run II), le Tevatron a accumulé un nombre impressionnant de collisions: fin octobre 2005 l'expérience DØ a ainsi passé le seuil de  $1 \text{ fb}^{-1}$  de données enregistrées avec une luminosité instantanée de  $1,5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Cette prise de données se poursuivra jusqu'au printemps 2006, période à laquelle le Tevatron s'arrêtera pour permettre une amélioration du complexe d'accélération ainsi que des expériences.

Avec une telle luminosité et une telle énergie, les expériences du Tevatron sont actuellement un lieu idéal pour étudier les particules élémentaires et mettre à l'épreuve avec une grande précision le Modèle Standard (MS) qui les décrit ainsi que leurs interactions. Ainsi le groupe de Grenoble est impliqué dans l'étude du quark top, le plus lourd des quarks et le dernier à avoir été mis en évidence. Une étude débute également sur la mesure de la masse du W, boson de l'interaction électrofaible. Nous recherchons aussi des particules supersymétriques, prédites par des théories qui permettent de combler certains points faibles du Modèle Standard.

Cependant avant de pouvoir étudier la physique des particules élémentaires, il faut avant tout comprendre et maîtriser les détecteurs qui ont été construits dans ce but, mais aussi construire les outils logiciels nécessaires à l'exploitation des centaines de téraoctets de données qu'ils produisent. C'est pourquoi ce rapport commence par décrire les contributions techniques du groupe avant de détailler les analyses de physique en cours.

### ◆ Contributions techniques

Les contributions techniques du groupe sont centrées sur la calorimétrie. Le calorimètre de DØ est un détecteur à échantillonnage (argon liquide pour la partie active et uranium, cuivre ou acier pour la partie « absorbeur ») qui permet de reconstruire les particules électromagnétiques: électrons, photons, mais aussi les jets de particules issus de la production des quarks. Les contributions du groupe vont du suivi et de l'amélioration des performances du calorimètre, à la mise en place d'algorithmes d'identification d'objets particuliers tels que les jets issus des quarks b.



*Figure 1: L'expérience DØ: vue générale du détecteur (au premier plan: les scintillateurs des détecteurs de muons) lors de sa mise en place en vue du Run II. Le détecteur mesure environ 10 m de hauteur.*

### *Calorimétrie et reconstruction des objets électromagnétiques*

Pour le Run II, DØ utilise les mêmes calorimètres que pour le Run I. Cependant, l'électronique de lecture a été partiellement repensée pour tenir compte du taux d'événements beaucoup plus élevé. Les performances des calorimètres étaient excellentes au Run I. Le groupe de Grenoble a joué un rôle important dans la remise au point des calorimètres dans l'environnement plus complexe du Run II.

#### ▪ *Contributions à la mise au point de la nouvelle électronique de lecture*

Au début du Run II, divers problèmes avec la nouvelle électronique de lecture ont affecté la qualité des données des calorimètres. Quelques exemplaires des nouveaux circuits ont, par exemple, lu la moyenne de l'énergie dans deux cellules, au lieu de l'énergie d'une cellule donnée. D'autres exemplaires ont stocké de l'information incorrecte sur le choix événement par événement du préamplificateur. Le groupe de Grenoble a élaboré des algorithmes qui sont inclus dans le programme de reconstruction hors ligne des données, pour corriger ces erreurs de lecture. Ceci concerne environ les premiers  $300 \text{ pb}^{-1}$  du Run II. Le groupe a également mis au point des programmes de monitoring qui mettent en évidence de tels problèmes dès qu'ils se produisent.

#### ▪ *Étalonnage des calorimètres*

La précision mécanique de la fabrication des modules des calorimètres était adaptée pour le Run I, mais avec le temps d'intégration du signal beaucoup plus court au Run II, les imprécisions mécaniques résiduelles donnent lieu à des variations jusqu'à 20% entre les gains des différentes cellules. Ces variations limitent la précision des calorimètres dans les premières publications du Run II. Depuis, une méthode mise au point à Grenoble a été utilisée pour étalonner toutes les cellules des calorimètres de DØ avec une grande précision. La méthode est basée sur des données de collision qui sont enregistrées à l'aide d'un déclenchement dédié, développé par notre groupe. Les constantes d'étalonnage finales ont été extraites par des experts sous la direction d'un membre de notre équipe. L'intégralité des données du Run II vient d'être reconstruite en utilisant le nouvel étalonnage des calorimètres.

#### ▪ *Correction des pertes d'énergie des électrons*

Le calorimètre ne reçoit pas toujours la totalité de l'énergie des électrons. En effet, différents facteurs géométriques comme les zones mortes entre le calorimètre central et le calorimètre avant, la présence d'espace non instrumenté entre les modules du calorimètre, la quantité de matière en amont du calorimètre, entraînent une perte d'énergie importante qui n'est pas prise en compte dans le code de reconstruction. Des corrections pour ces différents effets ont été mises au point à partir de simulation Monte-Carlo et sont utilisées par l'ensemble de la collaboration. L'accord entre données et Monte-Carlo est quantifié à l'aide d'études détaillées des échantillons  $Z \rightarrow e^+e^-$  et  $J/\Psi \rightarrow e^+e^-$ . Les événements  $J/\Psi$  sont enregistrés à l'aide d'un déclenchement dédié qui a été développé par le groupe et qui fait un usage extensif du nouveau système de déclenchement (utilisant les traces des particules chargées).

#### ▪ *Conclusion*

Les données reconstruites avec le nouvel étalonnage sont tout juste disponibles pour l'analyse, mais les bénéfices de ce travail de fond sont déjà visibles. Auparavant, l'incertitude systématique sur l'échelle en énergie des jets était significativement plus grande qu'au Run I, ce qui était un facteur limitant dans une partie des premières publications du Run II. Les études préliminaires sur ces données permettent déjà d'atteindre une incertitude quasiment identique à celle du Run I. Une précision supérieure à celle du Run I est donc attendue pour les études finales. L'effet positif du nouvel étalonnage est également visible dans les états finals avec électrons. Ainsi, si on prend aussi en compte les améliorations de la simulation (en particulier de la matière en amont des calorimètres), les performances nécessaires à une très bonne mesure de la masse du W sont à la portée de DØ.

### *Étiquetage des jets de quark b avec des électrons non isolés*

Une fois que le détecteur est correctement compris et étalonné, on peut utiliser des algorithmes permettant d'identifier et reconstruire des objets plus complexes comme les jets issus des quarks b. Le groupe DØ du LPSC est ainsi impliqué dans l'étiquetage des jets beaux, procédé particulièrement utile pour la recherche de processus rares et la réduction des bruits de fonds QCD notamment. Les hadrons beaux ont deux caractéristiques propres : un temps de demi-vie plus long que celui des autres quarks et un rapport d'embranchement en désintégrations semileptoniques d'environ 20%. Cette dernière propriété est mise à profit dans les « soft lepton tag », algorithmes qui recherchent la présence de leptons dans les jets hadroniques.

Le groupe a développé un « soft electron tag » qui est en cours de validation par la collaboration DØ. Cet outil permet l'identification d'électrons de faible énergie dans les jets par la coïncidence des informations provenant du calorimètre, du détecteur de traces et du détecteur de pieds de gerbe (non utilisé jusqu'alors). Cette combinaison permet seule d'améliorer suffisamment la discrimination électrons/pions. Les tests sur données réelles ont conforté l'analyse Monte-Carlo. Ainsi, sur 100 jets beaux énergétiques, 55 sont sélectionnés par l'algorithme, pour un taux de mauvais étiquetage de 6% (jets de saveurs légères identifiés comme jets de saveurs lourdes). À terme, le lot provenant de l'étiquetage des b par les électrons, non utilisé jusqu'alors, fera parti de la sélection officielle dans le cadre de la mesure des sections efficaces de production de quarks top.

## ◆ Activités d'analyse physique

### Recherche de particules supersymétriques

La supersymétrie est une théorie dans laquelle on définit une symétrie entre les bosons (particules de spin entier) et les fermions (particules de spin demi-entier). Chaque fermion (boson) du MS aura donc un partenaire boson (fermion) supersymétrique. On définit ainsi un nombre quantique multiplicatif, la R-parité, qui permet de distinguer les particules du MS ( $R_p = +1$ ) des particules supersymétriques ( $R_p = -1$ ). Si on considère que ce nombre est conservé, alors les particules supersymétriques ne peuvent être produites qu'en paires à partir d'une particule standard. La particule supersymétrique la plus légère (ou LSP) est alors nécessairement stable, ce qui en fait un bon candidat pour la matière noire de l'univers. Cependant, théoriquement, rien ne justifie cette hypothèse de conservation. Dans le cas de la violation de la R-parité, la désintégration de la LSP en particules du modèle standard est alors possible et introduit trois nouveaux couplages ( $\lambda$ ,  $\lambda'$ , et  $\lambda''$ ) entre les sfermions, partenaires supersymétriques des fermions du Modèle Standard et ces derniers. L'analyse du groupe porte sur le couplage  $\lambda$ , correspondant à la désintégration de la LSP en deux leptons chargés et un neutrino : les événements recherchés font état de particules supersymétriques produites par des mécanismes conservant la R-parité, et de la désintégration après cascade, de la LSP en particules standard, violant la R-parité. L'état final est alors composé d'au moins quatre leptons chargés et de deux neutrinos qui se manifestent par de l'énergie manquante. Peu d'événements de haute multiplicité leptonique étant attendus dans le MS, l'analyse est basée sur la recherche d'états finaux contenant au moins trois leptons chargés.

Pour des raisons d'antisymétrie, il existe seulement neuf couplages  $\lambda$ , notés  $\lambda_{ijk}$ . Les indices  $i, j$  et  $k$  valent entre 1 et 3 et se rapportent aux familles des leptons du Modèle Standard : 1 pour l'électron, 2 pour le muon, et 3 pour le tau. Seul le couplage  $\lambda_{121}$ , conduisant à une désintégration avec au moins deux électrons a été considéré par le groupe. Les simulations sont réalisées avec SUSYGEN dans le cadre du modèle mSUGRA. Dans ce modèle, on définit cinq paramètres indépendants :  $m_0$  est la masse commune des sfermions (partenaires supersymétriques des fermions) à l'échelle de grande unification,  $m_{1/2}$  est la masse commune des jauginos à cette même échelle,  $\tan\beta$  est le rapport des valeurs moyennes dans le vide des 2 doublets de Higgs,  $\mu$  est le signe du paramètre de mélange des Higgsinos (partenaires supersymétriques des bosons de Higgs), et enfin  $A_0$  est le couplage universel des sfermions et des Higgs à l'échelle de grande unification. Des simulations ont été aussi réalisées dans un modèle MSSM avec des masses de sfermions lourdes (1 TeV) et en laissant  $M_1$  et  $M_2$  (les masses des superpartenaires de  $SU(2)_L$  et de  $U(1)_Y$ ) indépendants.

L'analyse est basée sur les données accumulées entre avril 2002 et août 2004 correspondant à une luminosité intégrée de  $360 \text{ pb}^{-1}$ . L'application des critères de sélection ne conduit à la sélection d'aucun événement pour  $0,91 \pm 0,38$  attendus dans le cadre du modèle standard. L'étude, menée dans le cadre du modèle mSUGRA, a permis de mettre des limites supérieures sur la masse des jauginos (partenaires supersymétriques des bosons de jauge) les plus légers : 121 GeV et 234 GeV pour le neutralino1 et le chargino1 respectivement (pour  $\mu > 0$ ,  $A_0 = 0$ ,  $\tan\beta = 5$  et  $m_0 = 1000 \text{ GeV}$ ). Dans le cadre du modèle MSSM, un large domaine dans le plan – masse du chargino1 et masse du neutralino1 – est exclu (voir figure 2). Pour une masse de neutralino1 supérieure à

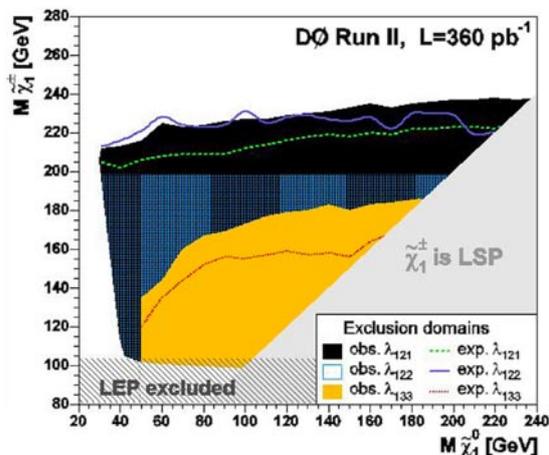


Figure 2: Zone d'exclusion observée et attendue à 95% de confiance pour les 3 couplages  $\lambda_{121}$ ,  $\lambda_{122}$  et  $\lambda_{133}$ . Le modèle considéré est le Modèle Standard Supersymétrique Minimal (MSSM) avec des sfermions lourds ( $\tan\beta = 5$ ,  $\mu = 1 \text{ TeV}$ ).

30 GeV, les masses du chargino1 inférieures à 215 GeV sont exclues. Ces limites sont plus contraignantes que celles obtenues par DØ, au Run I.

Cette étude est réalisée en partenariat avec le groupe DØ d'Aix-la-Chapelle (couplage  $\lambda_{122}$ ) et celui de l'IRES Strasbourg (couplage  $\lambda_{133}$ ). Les filtres d'événements développés pour chaque couplage et qui sélectionnent des topologies e-e-l ou mu-mu-l (l = e ou mu) et e-e-tau sont combinés pour améliorer l'efficacité de recherche pour chaque couplage. Le gain en masse sur les limites des jauginos est de l'ordre de 5-10 GeV pour le neutralino1 et de 10-20 GeV pour le chargino1. Chaque analyse ainsi que la combinaison des trois a donné lieu à des notes internes DØ (voir [1]) et une future publication PRL.

D'autre part, une recherche de production de squarks et de gluinos (en R-parité conservée) vient de démarrer. La topologie recherchée est deux électrons, de l'énergie transverse manquante et des jets. Cette analyse implique une excellente efficacité de reconstruction des jets. Des études ont démarré au sein du groupe afin de l'améliorer dans un environnement à haute luminosité.

## Mesure de la section efficace de production de paires de quarks top

Le top est le quark le plus massif, environ 175 GeV (soit la masse d'un atome d'or !!) et le dernier à avoir été découvert (en 1995) bien que son existence ait été prédite dès la mise en évidence en 1977 de son partenaire d'isospin faible, le quark b. Il s'agit donc d'un des composants du Modèle Standard le moins étudié et son analyse est des plus prometteuses.

En effet, le top est un quark particulier parce qu'il se désintègre très vite avant même d'avoir eu le temps de s'hadroniser. Cette propriété permet de remonter directement aux caractéristiques du top en mesurant les produits de sa désintégration. Mais l'intérêt qu'on porte à cette particule provient surtout de sa masse : d'abord parce qu'elle est un des paramètres fondamentaux du Modèle Standard mais surtout parce qu'étant très grande, le top se couple de façon privilégiée au boson de Higgs. Ainsi, la détermination de la masse du top couplée à celle du boson W permet de contraindre fortement la masse du boson de Higgs. De façon plus générale, la masse du quark top étant de l'ordre de l'échelle de la brisure de symétrie électrofaible, on peut penser qu'il joue un rôle important dans cette brisure. De plus, si ces phénomènes mettent en jeu de nouveaux processus non décrits par le Modèle Standard, le quark top ouvre une fenêtre d'exploration vers de la nouvelle physique.

Pour étudier le quark top il faut tout d'abord le mettre en évidence dans les données et étudier sa production. C'est ce que nous faisons ici en mesurant la section efficace de production des paires de quarks (top/anti-top). Au Tevatron, la production de paires de top se fait par l'annihilation d'un quark et d'un anti-quark dans 85% des cas ou par la fusion de gluons (voir figure 3). La probabilité qu'une telle interaction ait lieu est très faible, exactement  $10^{10}$  fois plus faible que la totalité des interactions inélastiques : pour 7 millions d'événements par seconde, une paire de quarks top est engendrée toutes les 24 minutes.

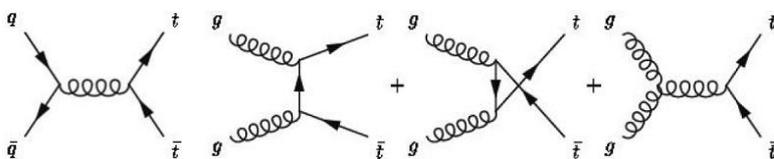


Figure 3: Modes de production des paires de top: par annihilation de quarks (85% des cas au Tevatron) illustrée par le diagramme de gauche, et par fusion de gluons (15% des cas) illustrée par les trois diagrammes de droite.

Le quark top est sélectionné à partir de ses produits de désintégration. Dans le cadre du MS, le top se désintègre dans quasiment tous les cas en un boson W et un quark b. On sépare les états finaux en fonction de la désintégration du W, soit en lepton (électron, muon, tau) et neutrino, soit en paires de quarks (qui donneront deux jets). On distingue ainsi les états finaux « multi-jets » pour lesquels les 2 W se désintègrent en quarks, des états « dileptons » pour lesquels les W se désintègrent en leptons, et du cas mixte « lepton+jet », pour lequel un des W se désintègre en leptons et l'autre en quarks. C'est cette dernière configuration (voir figure 4) que nous avons étudiée, dans laquelle on trouve donc un lepton (électron et muon) de grande impulsion transverse, de l'énergie manquante due au neutrino qu'on ne peut pas détecter et quatre jets dont deux sont issus de quarks b.

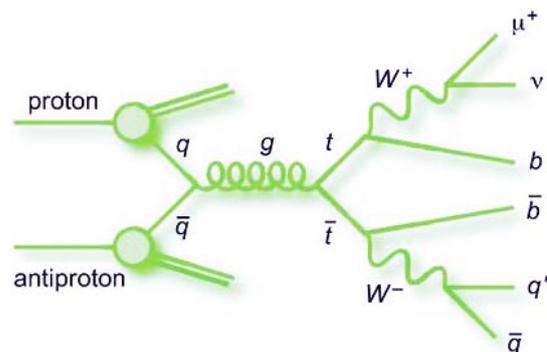


Figure 4: Diagramme de Feynman d'un exemple de production d'une paire top-antitop se désintégrant dans le canal lepton et jets.

D'autres types d'évènements peuvent cependant imiter cette signature. Tout d'abord les évènements W associés à des jets qui ont exactement le même état final, sauf que la probabilité qu'un des jets soit issu d'un b est assez faible. Les évènements multi-jets peuvent aussi ressembler aux évènements top à condition qu'un des jets soit mal reconstruit et soit pris pour un lepton. Les évènements Z associés à des jets et les évènements dibosons (WW, WZ et ZZ) peuvent aussi être pris pour des tops si l'une des particules issues de leur désintégration est mal reconstruite. Pour mieux différencier les évènements top, nous utilisons le fait que deux des jets sont issus de b et que dans 20% des cas ils se désintègrent de façon semi-leptonique. Cela signifie que, dans environ 40% des cas, il y a un muon (ou un électron) dans un jet. Pour l'instant seul l'étiquetage avec les muons est utilisé, en effet l'étiquetage avec les électrons décrit plus haut ne sera suffisamment discriminant que lorsque la nouvelle reconstruction utilisant le détecteur de pieds de gerbes sera en fonction (dès le début 2006).

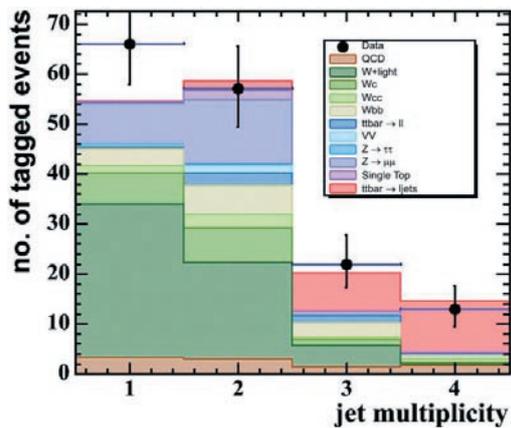


Figure 5: Nombre d'évènements sélectionnés dans le canal muons et jets après étiquetage des jets de b, pour 360 pb<sup>-1</sup> de données (cercles) et les différents bruits de fond et signal attendus.

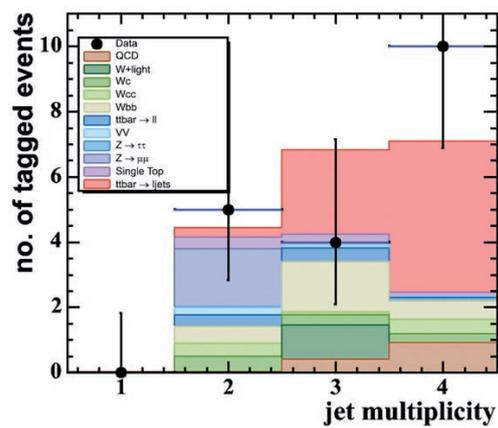


Figure 6: Nombre d'évènements sélectionnés dans le canal muons et jets après étiquetage des jets de b après ajout d'une coupure supplémentaire sur la topologie de l'évènement.

Cela n'est cependant pas suffisant pour éliminer l'ensemble des bruits de fond. Il est donc nécessaire d'évaluer le nombre d'évènements de fond restants. L'efficacité des évènements top, diboson et Z est évaluée avec le Monte-Carlo, ainsi que l'efficacité d'étiquetage des évènements W+jets, en fonction de la saveur des jets. Par contre, la normalisation du nombre d'évènements Z+jets est faite sur les données. De même, le nombre d'évènements W+jets avant étiquetage des b ainsi que le nombre de QCD est évalué directement à partir des données en utilisant la « méthode de la matrice » (voir encadré). Cette méthode repose sur le fait qu'un lepton a une plus grande probabilité de passer des coupures strictes d'identification qu'un jet mal reconstruit. Pour prouver que les fonds sont bien contrôlés, l'analyse est faite en fonction de la multiplicité en jets. Les nombres d'évènements sélectionnés dans les données sont comparés aux simulations des fonds et du signal (Figure 5).

### Méthode de la matrice

Si l'indice l représente les évènements passant une série de coupures lâches sur l'identification des leptons et l'indice s les évènements satisfaisant en plus une coupure stricte, et si  $N_{QCD}$  est le nombre d'évènements multi-jets et  $N_{lepton}$  le nombre d'évènements avec au moins un lepton réel, alors :

$$\begin{aligned}
 N_l &= N_{QCDl} + N_{leptonl} \quad (1) \\
 N_s &= N_{QCD/s} + N_{lepton/s} \\
 N_s &= p_{QCD} \cdot N_{QCDl} + p_{lepton} \cdot N_{leptonl} \quad (2)
 \end{aligned}$$

où  $N_l$  et  $N_s$  représentent respectivement le nombre total de données passant les coupures lâches et strictes et p représente la probabilité pour un type d'évènement de passer la coupure stricte quand il satisfait la coupure lâche.

Les probabilités p sont mesurées sur des lots de données indépendants, et  $N_l$  et  $N_s$  sont donnés par l'analyse. (1) et (2) forment donc un ensemble de deux équations à deux inconnues desquelles on peut facilement déduire  $N_{QCDl}$  et  $N_{leptonl}$ . On déduit de ce dernier chiffre le nombre d'évènements (obtenu par Monte-Carlo) provenant des bruits de fond contenant un lepton réel (Z, di-boson, top) pour obtenir finalement le nombre d'évènements W+jets.

Avant étiquetage des jets  $b$  et dans le cas où il n'y a qu'un ou deux jets, les bruits de fond dominent. La section efficace de production de paires de top est mesurée pour les cas où le nombre de jets est supérieur ou égal à 3. On peut aussi choisir d'ajouter une coupure supplémentaire sur la topologie de l'évènement pour augmenter le rapport signal sur fond (Figure 6). L'analyse actuelle est effectuée pour une luminosité d'environ  $360 \text{ pb}^{-1}$ .

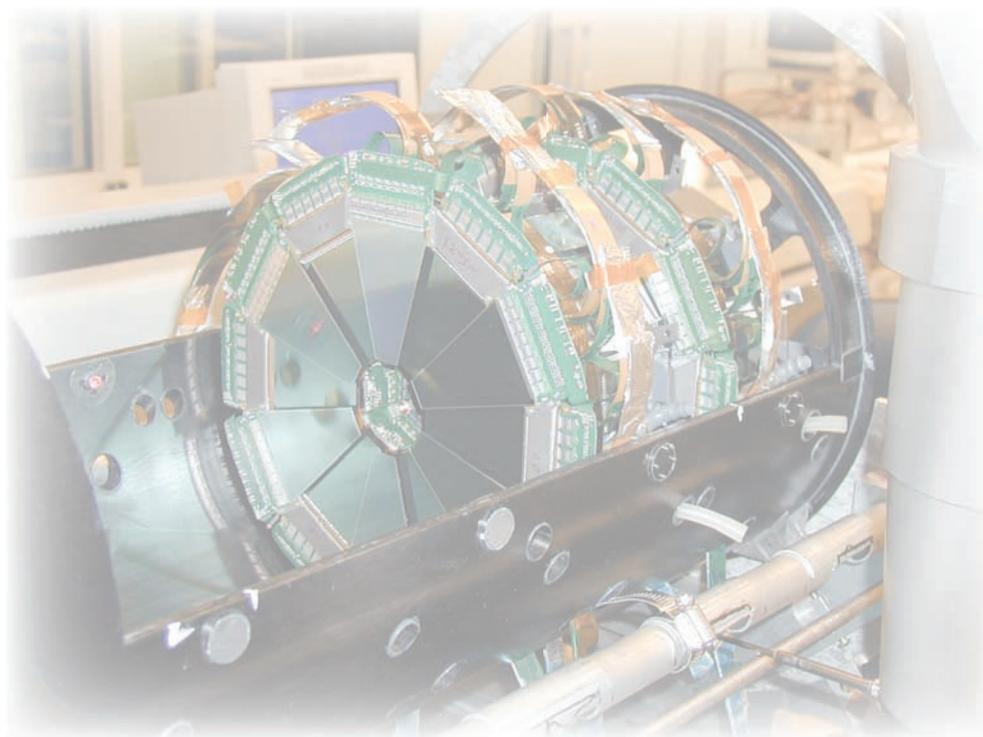
La mesure de la section efficace dans le canal lepton et jets avec étiquetage par les muons est en cours de finalisation. Elle sera comparée et combinée, s'il n'y a pas de désaccord, avec les autres mesures du même canal utilisant des techniques différentes. Ces mesures pourront alors être combinées avec les résultats des autres canaux de désintégrations, les canaux dilepton et totalement hadronique. Ces mesures bénéficieront aussi de l'augmentation de la statistique puisqu'actuellement plus de  $1 \text{ fb}^{-1}$  de données sont sur bande.

### ◆ Conclusions et perspectives

À l'arrêt du Tevatron au printemps 2006, environ  $1,3 \text{ fb}^{-1}$  de données seront sur les bandes de  $D\bar{0}$ , ce qui représente 10 fois la statistique du Run I. L'ensemble des mesures effectuées bénéficiera de l'augmentation de la statistique et la difficulté sera alors de contrôler les erreurs systématiques.

Le travail de fond du groupe sur la calorimétrie sera poursuivi et débouchera en particulier sur une analyse menant à la mesure de la masse du  $W$  qui vient de débuter. L'analyse sur la recherche de particules superymétriques en  $R$ -parité violée est terminée et est en voie de publication. Elle laisse la place à une analyse cherchant les partenaires supersymétriques des quarks et des gluons. Enfin la mesure de la section efficace de production de paires de top sera poursuivie et améliorée si possible, par l'utilisation de l'étiquetage des  $b$  avec les électrons.

[1] Note  $D\bar{0}$  4982: *Search for  $R$ -parity violating Supersymmetry via the LLE Coupling  $\lambda_{121}$  in Final States with  $e\ell$  ( $\ell=e$  or  $\mu$ ).*



# L'expérience ATLAS

*F. Malek, F. Chevallier (th.), J.-Y. Hostachy, F. Ledroit, A. Lleres, A. Lucotte, J. Morel (th.), B. Trocmé.*

*ATLAS is a general purpose detector located on the LHC proton-proton collider built at CERN near Geneva (Switzerland). Collisions will be produced at an unprecedentedly high energy of 14 TeV in the center of mass and at a rate two orders of magnitude higher than the current TeVatron performance. First collisions are expected in spring 2007. Since 1992, the LPSC group has taken a major role in the conception and construction of the pre-sampler detector until its completion and assembling in the center calorimeter in 2001. The group has endorsed also a leading role in installation of the cryogenic system that should be completed by the end of 2006. Since 2002, the LPSC group has also been actively involved in the core software development of the description of the LAr calorimeter. Preparing for the first data, the group also carried physics analyses in the search for signs of new physics: direct search for new neutral bosons, which are predicted in numerous theories beyond the Standard Model and precision measurements of top quark production which constitute a powerful probe for new charged Higgs bosons as predicted by supersymmetric models.*

## ◆ Introduction

ATLAS est l'une des deux expériences généralistes auprès du LHC du CERN. Le collisionneur proton-proton produira des collisions à une énergie de 14 TeV dans le centre de masse à des taux 100 fois plus élevés que ceux du TeVatron actuellement en service. Il devrait ainsi permettre de sonder un domaine d'énergie encore inexploré avec une grande précision.

Les activités techniques du groupe ATLAS du LPSC s'échelonnent sur plusieurs années et ont comporté au cours de la période 2004-2005 des implications techniques majeures en découlant. L'équipe du LPSC a ainsi eu en charge la construction et la validation de l'électronique de 48 des 64 secteurs du pré-échantillonneur d'ATLAS, qui se sont achevées durant l'été 2003. Après l'insertion dans les modules du calorimètre électromagnétique central, l'équipe du LPSC a conduit les tests de validation et de suivis. C'est dans ce cadre que s'insèrent les études réalisées sur l'élimination de courts-circuits in situ. Le groupe est également impliqué dans la cryogénie de proximité, sa construction, ses tests et son intégration dans le puits d'ATLAS. Les dernières réalisations en 2005 concernent l'installation des vases d'expansion et des boîtes à vannes, de la cryogénie de proximité pour les calorimètres bouchons et centraux ainsi que celle du système de vide et des lignes rigides. Cette activité devrait s'achever fin 2006.

Dans le domaine logiciel, depuis plus de 5 ans, le groupe de Grenoble est un acteur majeur de la construction du logiciel de l'expérience, en particulier dans celui de la description du calorimètre à argon liquide d'ATLAS. Plusieurs membres du groupe sont ainsi impliqués dans le développement et le maintien des classes de base d'identificateurs des cellules du calorimètre ainsi que celle des tours de trigger du calorimètre. Enfin, dans l'intervalle qui nous sépare des premières collisions du LHC, il est prévu un vaste programme de mesures, ayant pour objectif de se familiariser avec le fonctionnement du détecteur, de valider les procédures de contrôle et d'acquisition, d'opérer un premier étalonnage de la chaîne de lecture, etc. Le groupe du LPSC a pris part à cette campagne dès 2005.

En préparation aux prises de données, le groupe du LPSC s'est également impliqué dans l'analyse physique et a orienté sa contribution vers la recherche de signes de physique au-delà du Modèle standard, par le biais de deux approches distinctes et complémentaires.

La première concerne la recherche directe de nouvelles particules: les nouveaux bosons neutres. Les théories au-delà du MS mettent en jeu soit une extension du groupe de symétrie interne – ce sont les modèles basés sur les théories des cordes ou sur la restauration de la symétrie droite/gauche – soit une extension du groupe de symétrie externe – par le biais de modèles à dimensions supplémentaires d'espace-temps. Ces modèles ont en commun de prédire l'existence de nouveaux bosons de jauge neutres supplémentaires, appelés  $Z'$ , dont les propriétés, fixées par la structure du groupe de symétrie sous-jacent, dépendent du modèle considéré. Le groupe du LPSC se propose ainsi, au-delà de la détection d'un boson  $Z'$ , d'en identifier l'origine par le développement d'analyses discriminantes.

La seconde approche repose sur la mesure précise d'observables bien connues dans le cadre du MS, et dont toute déviation peut être interprétée comme le signe de nouvelle physique. Le groupe du LPSC s'est impliqué dans la mesure de sections efficaces de production du quark top: avec plus de 8 millions de paires de top produi-

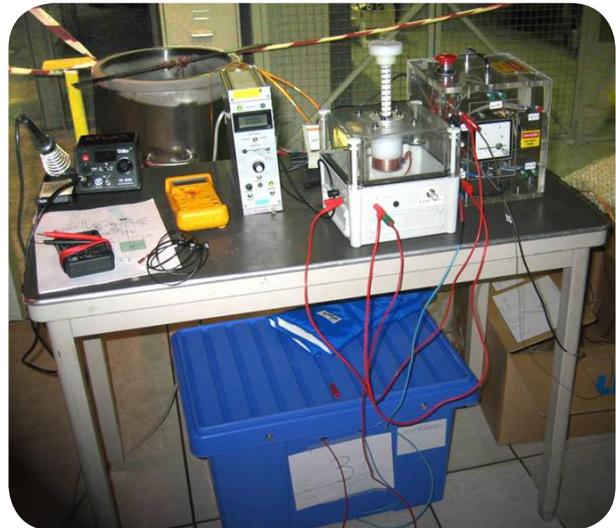
tes par an, et plus de 2 millions de quarks top en singlet, la physique du top bénéficie d'une statistique adéquate pour les mesures précises. Ces observables sont sensibles à la présence des bosons de Higgs chargés prédits par exemple dans toute extension supersymétrique du MS. Ces mesures devraient constituer un des canaux privilégiés de découverte d'un boson de Higgs chargé.

### ◆ Contributions techniques

#### *Suivi et élimination des courts-circuits du pré-échantillonneur*

Ce travail a été mené conjointement par le LPSC et un certain nombre de membres du Groupement de Recherche International (GDRI) « calorimétrie électromagnétique à argon liquide d'ATLAS ». Il a eu pour but de mettre au point une technique pour éliminer d'éventuels courts-circuits dans le pré-échantillonneur central d'ATLAS. Il est à noter que la technique est encore en cours de test afin de voir si elle pourrait être adaptée et généralisée au reste du calorimètre électromagnétique.

La méthode utilisée consiste à décharger brusquement de gros condensateurs HT à travers le système haute tension des modules du pré-échantillonneur, permettant ainsi soit de détruire un morceau de piste gravé sur nos anodes (servant donc de « fusible »), soit de « brûler la poussière » à l'origine du court-circuit. Cette technique est possible malgré la présence de câbles résistifs jouant un rôle d'isolation thermique dans le cryostat et malgré la très basse température (89 K) due à la présence de l'argon liquide servant de milieu actif dans le détecteur. La figure 1 représente le dispositif expérimental utilisé pour le test d'un prototype. Cette technique a déjà été testée avec succès sur un secteur du pré-échantillonneur installé dans le cryostat du test combiné au CERN ainsi que sur un secteur du pré-échantillonneur du futur détecteur ATLAS. Elle devrait être appliquée si cela s'avère nécessaire dès le début de l'année 2006, après le remplissage du tonneau électromagnétique par de l'argon liquide et pouvoir ainsi assurer un volume de détection correspondant à presque la quasi totalité du pré-échantillonneur. Ce travail a fait l'objet d'une note ATLAS [1].



*Figure 1 : Dispositif expérimental pour l'élimination d'éventuels courts-circuits dans le pré-échantillonneur d'ATLAS. Le dewar rempli d'argon liquide derrière la table contient un module du pré-échantillonneur. Par mesure de sécurité, les condensateurs HT ont été placés dans la boîte isolante bleue.*

#### *Commissioning du calorimètre d'ATLAS*

Après plusieurs mois de tests en surface, le tonneau du calorimètre électromagnétique d'Atlas, composé du calorimètre lui-même et du pré-échantillonneur, a été déplacé vers le hall expérimental souterrain à l'automne 2004. Au printemps 2005, a commencé l'installation des différentes cartes d'acquisition et de contrôle, situées aussi bien dans le voisinage proche du détecteur que dans les salles de comptage ; cette phase d'installation – et de test – devrait s'achever au printemps 2006, autorisant ainsi la première prise de données dans une configuration très proche de la configuration finale. Dans l'intervalle qui nous sépare des premières collisions du LHC, il est prévu un vaste programme de mesures, ayant pour objectif de se familiariser avec le fonctionnement du détecteur, de valider les procédures de contrôle et d'acquisition, d'opérer une première calibration de la chaîne de lecture, de procéder un alignement grossier en temps des différents canaux...

Pour atteindre cet objectif, il est notamment prévu d'utiliser les muons issus de rayons cosmiques qui parviennent jusqu'au détecteur ; étant donné leur très faible dépôt d'énergie dans le calorimètre électromagnétique, un déclenchement spécifique basé sur le signal déposé dans le calorimètre à tuiles scintillantes a dû être mis en place ; un tel système a été validé au cours d'une première campagne de mesures impliquant le seul calorimètre à tuiles au cours de l'été 2005. L'analyse de ces données, à laquelle nous avons participé, a permis de vérifier l'intérêt d'une telle configuration ; il a notamment été mesuré un taux de déclenchements suffisamment élevé (de l'ordre de quelques hertz) pour nos objectifs, un taux de déclenchements fortuits sous contrôle, une résolution en temps de l'ordre de la nanoseconde... Tous ces éléments nous confortent dans le grand intérêt d'exploiter au maximum les prises de données cosmiques. Cela passe notamment par un effort important dans

la mise en place des procédures de contrôle en temps réel de la qualité des données, tâche dans laquelle nous sommes également impliqués.

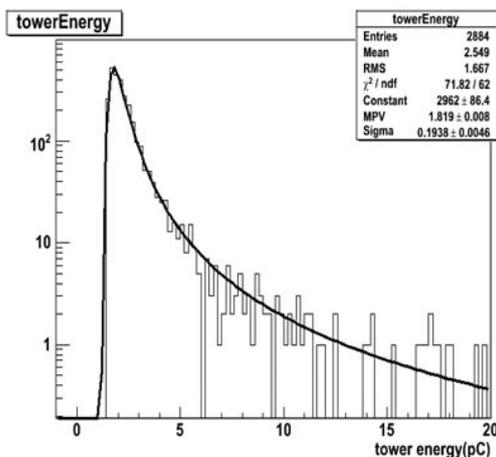


Figure 2 : Distribution de l'énergie déposée par un muon dans le calorimètre à tuiles.

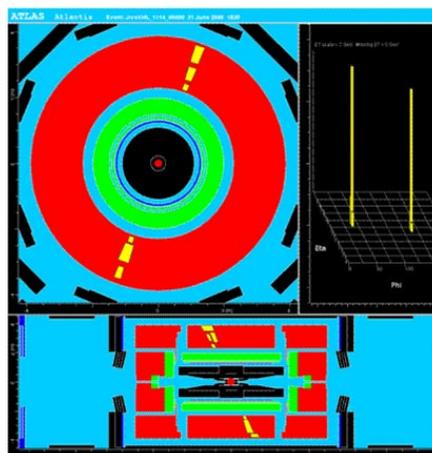


Figure 3 : Muon cosmique traversant les tuiles du calorimètre d'ATLAS.

### Développement du logiciel d'analyse

Le groupe du LPSC est impliqué dans la programmation du logiciel du calorimètre à argon liquide d'ATLAS. Cette activité a reçu le renfort d'un nouveau membre en 2004.

Le groupe assure le développement et le maintien des identificateurs des cellules du calorimètre. Cette classe de base assure l'accès à la description géométrique des cellules individuelles du détecteur définie en termes d'échantillonnage, de localisation ( $\eta, \phi$ )..., ainsi qu'à leur description « hardware » définie en termes de numéro de canal de lecture, de carte électronique, de câblage, etc. Elle permet d'assurer la navigation d'une description à l'autre. Le groupe a également endossé la responsabilité du codage des informations concernant les hautes tensions alimentant les cellules, en rattachant cette description aux deux précédemment évoquées. Il est à noter que ces descriptions ont été abondamment utilisées au cours de la période de faisceau-tests des calorimètres centraux et bouchon, et validées à partir des données enregistrées à cette occasion. Elles ont permis, notamment dans le calorimètre central, d'établir les cartes de corrections dues aux variations de tension d'alimentation influant sur la réponse des cellules individuelles.

Le groupe a également endossé la responsabilité de la simulation des tours de déclenchement de premier niveau. À ce stade, les signaux des cellules individuelles sont en effet regroupés en « tours » qui contiennent la somme analogique des signaux individuels sommés par étage (échantillonnage) et sommés sur toute la profondeur du calorimètre. Le bruit électronique a été simulé, et les termes d'échantillonnage ont été déterminés à l'aide de simulations.

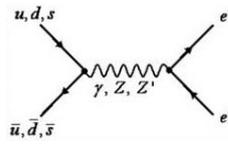
### ◆ Activités d'analyse physique

#### Recherche de nouveaux bosons de jauge neutres

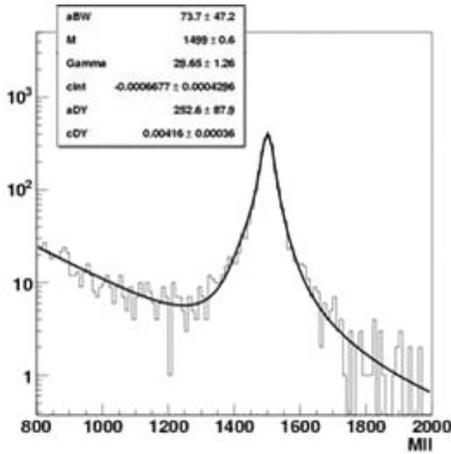
De nombreux modèles au-delà du Modèle Standard (MS) prédisent l'existence de nouveaux bosons de jauge, ou de nouveaux états de bosons de jauge connus. Nous nous intéressons au cas des bosons neutres, dans le cadre de deux grandes familles de modèles : ceux dans lesquels le groupe de jauge  $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  du MS est étendu, et ceux qui proposent d'incorporer un nombre de dimensions d'espace-temps supérieur à quatre, qu'on appelle modèles avec des dimensions supplémentaires. On appelle  $Z'$  l'état propre de masse du plus léger nouveau boson neutre dans les premiers modèles, et le premier état des excitations dites de Kaluza-Klein (KK) des bosons neutres du MS dans les seconds. Aucun  $Z'$  n'ayant encore été observé, ni directement ni indirectement, nous avons des limites inférieures sur leur masse, qui sont de l'ordre de 600 à 800 GeV dans le cas des modèles avec groupe de jauge étendu, et environ 4 TeV dans le cas des dimensions supplémentaires. Avec ses 14 TeV d'énergie disponibles dans le centre de masse, le LHC ouvrira largement la fenêtre de découverte de ces bosons.

Le groupe de Grenoble est impliqué dans la préparation de cette analyse depuis fin 2003. Nous avons tout d'abord étudié différents modèles avec une première étudiante préparant un Diplom Arbeit : plusieurs configurations résultant de la brisure du groupe  $E_6$  en  $SU(2)_L \times U(1)_Y \times U(1)'$  effectif, un modèle symétrique droite-gauche, et un

modèle à une dimension supplémentaire petite, de type ADD. Nous avons choisi le canal  $Z' \rightarrow e+e-$  (Figure 4) qui sera le mieux mesuré avec ATLAS. Des études antérieures [2] ayant déjà montré la capacité de découverte de



**Figure 4:** Graphe de production d'un boson  $Z'$  dans le cadre de modélisations aux symétries de jauge étendue (voir texte). Seul l'état final en électron-positron est ici considéré.



**Figure 5:** Masse invariante  $M(ll)$  et ajustement de la largeur, de la masse et du fond.

ce canal jusqu'à une masse d'au moins 5 TeV, nous avons supposé la découverte d'un  $Z'$  et nous nous sommes intéressés à la détermination du modèle sous-jacent. A cette fin, plusieurs variables discriminantes ont été proposées telles que la largeur totale du  $Z'$ , sa section efficace, et surtout son asymétrie avant-arrière. L'ajustement de la résonance (Figure 5) et la détermination de la largeur et de la section efficace ont été mis au point en 2004 et validés en simulation complète pour deux valeurs de la masse du  $Z'$  : 1,5 et 4 TeV.

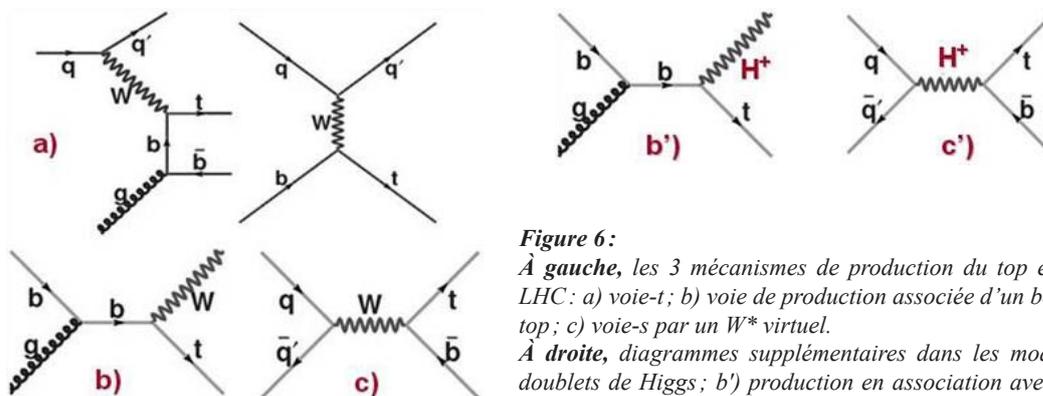
En 2005, notre activité s'est intensifiée grâce à l'arrivée d'un second chercheur permanent et d'un étudiant de Master. Nous avons mis au point la détermination de l'asymétrie avant-arrière et publié une note ATLAS sur l'ensemble de nos résultats en simulation complète [3]. Ces travaux ont également donné lieu à une présentation à la conférence EPS 2005 [4]. Nous avons ensuite ajouté l'ajustement d'une observable supplémentaire, la rapidité du  $Z'$ , à la liste des outils permettant la discrimination des modèles.

Sa robustesse vis-à-vis de l'incertitude entachant les fonctions de structure du proton est actuellement en cours d'étude. Nous avons également introduit une nouvelle paramétrisation, dite CDDT du nom de ses auteurs [5], des modèles de  $Z'$  résultant de modèles à groupe de jauge étendu. Ceci permet la généralisation des limites en masse qui sont extraites des analyses du TeVatron et des prédictions de découverte au LHC. Enfin, suite à une collaboration initiée au sein du GDR-SUSY, nous avons commencé à simuler un second modèle de dimensions supplémentaires, de type RS, qui nous permet également d'avoir une vue un peu moins restrictive des possibilités des modèles avec excitations de KK [6][7].

## Mesure de sections efficaces de production du quark top

Depuis la découverte du quark top à Fermilab en 1995 par les collaborations DØ et CDF une campagne de mesure s'est ouverte afin de déterminer ses propriétés : sa masse, sa largeur, son spin, sa charge électrique, ou encore son couplage aux fermions et bosons du modèle font l'objet de nombreuses recherches auprès du TeVatron. Cependant, en raison de sa masse élevée, la production d'événements comprenant un ou plusieurs quark(s) top est de faible probabilité, limitant la précision de la plupart de ces mesures. Avec plus de 8 millions de paires de quarks top et plus de 2 millions de quarks top en singlet produits au cours d'une année à basse luminosité, le LHC ouvre une nouvelle ère de mesures de précision. C'est dans ce cadre que s'insèrent les activités du groupe du LPSC depuis 2004, avec la contribution de deux chercheurs permanents et d'un étudiant en thèse, partagé avec le groupe DØ du LPSC.

La mesure de la section efficace de la production de quark top en singlet constitue un test précis du modèle des interactions électrofaibles : dépendant du couplage du quark top aux particules connues, la mesure du taux d'événements et sa comparaison aux prédictions permet de confirmer la validité du modèle utilisé.



**Figure 6:**

À gauche, les 3 mécanismes de production du top en singlet au LHC: a) voie-t; b) voie de production associée d'un boson  $W$  et du top; c) voie-s par un  $W^*$  virtuel.

À droite, diagrammes supplémentaires dans les modèles à deux doublets de Higgs; b') production en association avec un top; c') production par voie-s.

Dans le Modèle Standard, il existe ainsi 3 mécanismes de production du top en singlet, représentés par les diagrammes de la figure 6 (à gauche). Le nombre d'évènements attendus dans les canaux décelables, avec une désintégration en muon ou électron du W, est typiquement de 500 000 dans la voie-t, 180 000 dans la voie W+t et 20 000 dans la voie-s pour une année à basse luminosité i.e. :  $10 \text{ fb}^{-1}$ . Tout écart dans le taux d'évènements détectés avec les valeurs prédites peut être interprété comme le signe de couplages anormaux du quark top avec les particules en lesquelles il se désintègre, ou comme le signe de présence de nouveaux mécanismes de production. Ainsi, dans le cadre super-symétrique de modèles à deux doublets de Higgs (2HDM) auxquels le groupe du LPSC s'est intéressé, le boson chargé  $H^\pm$  ajoute une nouvelle source de production de quark top, représentée figure 6 (à droite).

Les trois mécanismes de production du quark top en singlet, d'états finaux très différents, ont été étudiés à l'aide d'analyses spécifiques développées au LPSC. Ces études ont abouti à la détermination de la sensibilité statistique attendue au cours des 3 premières années du LHC pour une luminosité de  $30 \text{ fb}^{-1}$ . Celle-ci est de l'ordre de 1,5% pour la voie-t, 4% pour la voie W+t et environ 10% pour la voie-s, performance se traduisant par une détermination de  $|V_{tb}|$  au niveau de quelques pour cents. Ces études ont également montré que toutes ces mesures seront dominées par les incertitudes systématiques affectant la procédure de sélection : expérimentalement, les principaux biais proviennent de la méconnaissance de l'échelle d'énergie des jets, de l'efficacité d'étiquetage des jets de b et du taux de mauvaise identification des jets de quarks légers, ainsi que du paramétrage des effets de radiations de gluons des partons initiaux ou finaux, pour un total de 8-10%. L'estimation des fonds est particulièrement complexe et repose sur l'usage de simulations dont les prédictions théoriques sont aujourd'hui non fermement établies, induisant une incertitude de 5% à 10% selon les processus en jeu.

Parmi les trois canaux traités au LPSC, nous nous sommes par la suite concentrés sur la détermination de la voie-s, qui est une des plus sensibles à l'existence de nouveaux bosons chargés. L'analyse développée pour la sélection des évènements contenant un quark top a alors été appliquée sur des échantillons simulant la production du même état final par le biais d'un Higgs chargé. Le nombre d'évènements sélectionnés permet alors de déterminer l'excès attendu par rapport au taux prédit dans le cadre sans Higgs, et d'interpréter les mesures dans le cadre d'un modèle 2HDM.

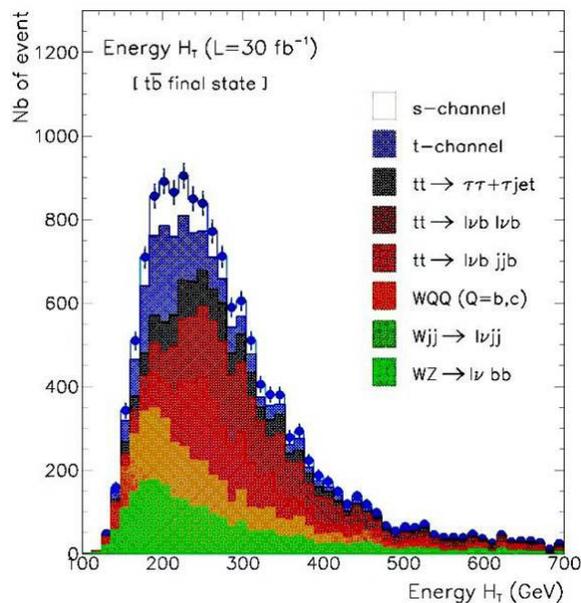


Figure 7: Distribution de l'énergie totale attendue, en nombre d'évènements, pour le signal (voie-s) et les principaux fonds pour une luminosité intégrée de  $30 \text{ fb}^{-1}$ .

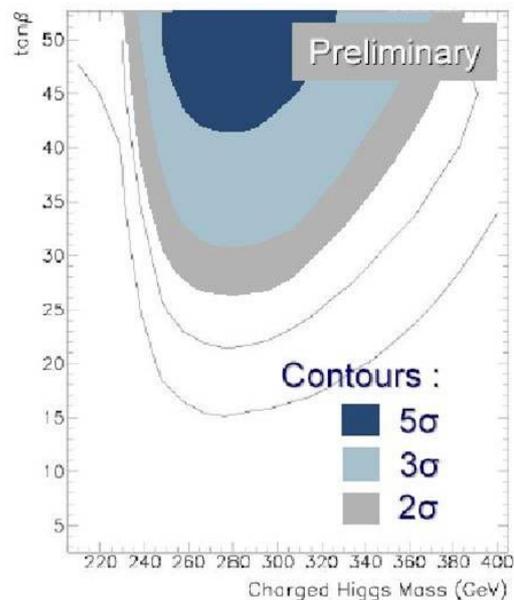


Figure 8: Contours de découverte, de mise en évidence (à  $3 \sigma$ ) ou d'exclusion (à 95%) dans le plan  $(m_{H^\pm}, \tan\beta)$  pour une luminosité de  $30 \text{ fb}^{-1}$ .

Cette étude a donné lieu à un rapport de soutenance de MASTER 2 et à la publication de deux notes internes ATLAS [8]. Elle se poursuit aujourd'hui par le développement d'une méthode de vraisemblance dont le but est de purifier le lot final afin de réduire l'importance des incertitudes systématiques. Par ailleurs, le groupe du LPSC est responsable de la production officielle ATLAS des échantillons générés, simulés et reconstruits des évènements de quarks top produits en singlet.

Après une étude détaillée des contributions des fonds au signal, montrés sur la figure 7 et des erreurs systématiques, l'interprétation des mesures a été faite en termes de présence d'un boson de Higgs chargé, prédits par

les modèles 2HDM de type II. Les résultats en termes de sensibilité statistiques sont indiqués sur la figure 8. Ils concluent à la possibilité de démontrer l'existence d'un boson de Higgs  $H^\pm$  dans une gamme de masse 200-300 GeV/c<sup>2</sup> et pour des valeurs élevées de  $\tan\beta$ , où  $\tan\beta$  est le rapport des valeurs moyennes attendues dans le vide des deux champs de Higgs du modèle.

Ces études ont fait l'objet de présentations régulières au cours des réunions du groupe Top d'ATLAS, d'une présentation au workshop ATLAS général de juin 2005, ainsi que de deux présentations au sein de l'atelier international TEV4LHC [9], qui réunit les physiciens des collaborations du Tevatron (DØ et CDF) et du LHC (ATLAS, DØ) travaillant sur les sujets voisins. Ces travaux doivent aboutir à la rédaction d'un rapport général dont le groupe sera responsable pour la section « production de quark top en singlet au LHC ». Enfin, ces travaux ont conduit à une présentation au nom d'ATLAS sur les perspectives de physique du quark top à la conférence *Hadron Collider Physics 2005* [10].

### ◆ Conclusion

La phase de construction du détecteur ATLAS est maintenant achevée et la phase d'installation et de validation des ensembles de détection comme de la chaîne d'acquisition et de lecture se met en place. Après avoir joué un rôle majeur dans la conception, la construction et l'installation du pré-échantillonneur et de son électronique de lecture, l'équipe du LPSC en assure encore un suivi très actif. Les implications du laboratoire dans l'installation de la cryogénie de proximité devraient s'achever fin 2006. A l'approche des premières collisions, le groupe du LPSC a orienté ses implications techniques vers une participation aux tests de validation dans le cadre du commissioning du calorimètre et de sa chaîne de lecture. Le groupe continue à accroître son implication dans la programmation et le suivi du logiciel du calorimètre au cours de cette période de validation de l'ensemble du détecteur.

Dans le cadre de la préparation aux analyses physiques, deux thématiques ont été définies et ont permis de coordonner les forces du groupe. Ces deux approches visent la mise en évidence de la nouvelle physique à partir d'approches complémentaires : la recherche de résonances correspondant à la désintégration de bosons neutres lourds, qui devraient faire l'objet des premières analyses ; la mesure précise de production de quarks top, qui pourrait constituer un moyen de mettre en évidence un boson de Higgs chargé dès les premières années de fonctionnement.

[1] J.-Y. Hostachy, B. Belhorma, B. Lund-Jensen, M. Yamouni, ATL-LARG-INT-2005-001.

[2] ATLAS Detector and Physics Performance TDR, CERN/LHCC/99-15.

[3] M. Schäfer, F. Ledroit et B. Trocmé, ATL-PHYS-PUB-2005-010.

[4] B. Trocmé, European Physics Society 2005, Lisbonne 21-27 Juillet (Portugal).

[5] M. Carena, A. Daleo, B. Dobrescu et T. Tait, Phys. Rev. D70 (2004) 093009.

[6] G. Moreau et J. Silva-Marcos, hep-ph/0507145.

[7] F. Ledroit, B. Trocmé, auteurs de la section *Recherche de Z'*, rapport *TeV4LHC*, en cours de publication.

[8] A. Lucotte, ATL-PHYS-CONF-2006-002, F. Chevallier et A. Lucotte, ATL-PHYS-COM-2006-003.

[9] A. Lucotte, TEV4LHC, CERN 28-30 avril 2005 (Suisse). F. Chevallier, TEV4LHC, Fermilab, 20-22 octobre 2005 (USA). Rapport TEV4LHC en cours de publication.

[10] Conférence *Hadron Collider Physics 2005, Top Physics Prospects*, A. Lucotte, 4-9 juillet 2005, Les Diablerets (Suisse).

# Groupe UCN : Études des interactions et symétries fondamentales avec les neutrons ultra-froids

*D. Rebreyend, K. Protassov, G. Quémener, U.C. Tsan.*

Le groupe UCN créé au cours de l'année 2004 se donne pour objectif d'étudier les interactions et symétries fondamentales à l'aide de neutrons ultra froids (UCN). Ces neutrons de très basse énergie ont des vitesses de l'ordre de 5 m/s et ont la particularité d'être réfléchis par la plupart des matériaux : on peut ainsi les stocker pendant plusieurs minutes afin de les étudier. En outre, contrairement aux autres particules élémentaires, ils sont très sensibles à l'interaction gravitationnelle.

Au cours des deux dernières années, nous nous sommes impliqués sur deux projets : l'expérience nEDM au Paul Scherrer Institut (Villigen, Suisse) et plus récemment le projet GRANIT à l'Institut Laue Langevin à Grenoble. Les UCN sont le point commun de ces deux projets.

## ◇ Mesure du moment électrique dipolaire du neutron : le projet nEDM à PSI

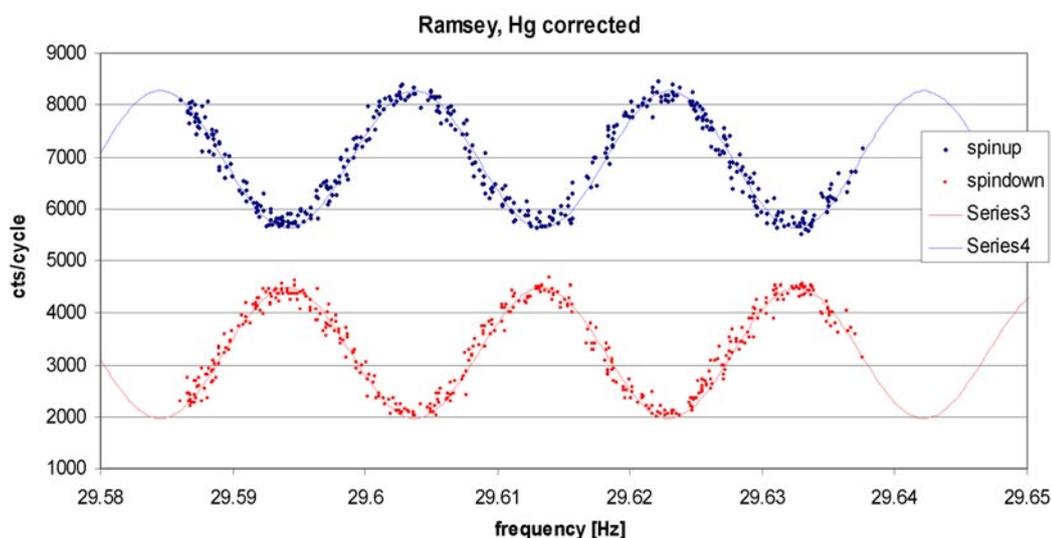
Cette expérience se place dans le contexte de la recherche de nouvelles sources de violation de CP. La limite expérimentale actuelle, obtenue par la collaboration RAL-Sussex à l'ILL est de  $6 \cdot 10^{-23}$  e.cm, soit 6 ordres de grandeur au-dessus de la valeur prédite par le Modèle Standard. La plupart des extensions actuelles du MS (comme la SUSY ou les théories de courants Gauche-Droit) a de nombreux mécanismes de violation de CP et est déjà fortement contrainte par la limite mesurée à l'ILL.

L'expérience nEDM au PSI (Villigen, Suisse), basée sur une nouvelle source d'UCN en cours de construction et dans laquelle est impliqué le groupe UCN, vise à augmenter de deux ordres de grandeur la précision sur la mesure de l'EDM du neutron. En l'absence de signal, cela permettra de placer de nouvelles contraintes sur les extensions du Modèle Standard. Une valeur non nulle de l'EDM serait la signature directe d'une nouvelle physique.

La collaboration nEDM se compose en plus du LPSC de Grenoble, des laboratoires suivants :

LPC Caen, Jagellonian University (Cracovie, Pologne), Université de Fribourg (Suisse), Paul Scherrer Institut (Villigen, Suisse), Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russie).

Avant de concevoir et de construire le nouveau détecteur qui sera installé au PSI, notre activité s'est concentrée sur le spectromètre RAL-Sussex situé auprès du réacteur expérimental de l'ILL à Grenoble. Depuis début 2005, le LPSC a pris en charge la remise en fonctionnement de cet appareillage. À l'exception du système de haute tension, nous avons rendu l'ensemble opérationnel et avons restauré des performances proches de celles d'origine. Cela nous a ainsi permis de faire les premières mesures de résonance de Ramsay (voir figure). Ce travail a pu être réalisé grâce à une très forte implication des services techniques du laboratoire (SDI et Service d'électronique).



L'autre responsabilité du groupe UCN a été de coordonner les différentes activités liées à la simulation de l'appareillage (transport des UCN et optimisation des champs électriques et magnétiques). Notre contribution a consisté, d'une part à optimiser le nombre et la position des capteurs magnétiques, et d'autre part à développer les algorithmes de reconstruction de la carte de champ magnétique. Ce travail permettra aussi de dimensionner et d'optimiser le blindage magnétique nécessaire pour s'affranchir des fluctuations du champ extérieur. Ces calculs de très grande précision (10-100 fT) imposent l'utilisation de programmes spécifiques basés sur Mathematica.

Ces études vont se poursuivre dans les années à venir et nous permettront de concevoir le nouvel appareillage que nous souhaitons installer au PSI et avec lequel nous envisageons de faire une mesure de l'EDM avec une précision de deux ordres de grandeur en-dessous de la limite actuelle.

### ◇ Mesure des transitions induites entre les niveaux quantiques du neutron dans le puits de potentiel gravitationnel (GRANIT)

Depuis 2004, nous avons souhaité nous impliquer dans le projet GRANIT d'étude des transitions induites entre les niveaux quantiques du neutron dans le champ gravitationnel terrestre. Ce projet fait suite à une série d'expériences réalisées récemment par V.V. Nesvizhevsky et ses collaborateurs (dont K. Protasov du groupe UCN). Ces expériences pionnières ont permis la première observation des états quantiques du neutron confiné par le champ gravitationnel [1].

L'objectif du projet GRANIT est de concevoir et de construire un spectromètre gravitationnel à neutron d'ultra haute résolution en énergie de seconde génération. Ce nouveau spectromètre permettra non seulement de maintenir des UCN sur les états quantiques dans le champ gravitationnel pendant des durées de plusieurs secondes, mais encore d'observer les transitions résonantes entre ces états. Notre intention est d'effectuer, pour la première fois au monde, la mesure directe de l'énergie de transition de ces états quantiques. Ce spectromètre sera en outre un outil unique pour un large éventail d'études en physique des particules et des interactions fondamentales, par exemple l'étude des forces à courte portée dépendant ou non du spin, des fondements de la mécanique quantique (perte de cohérence quantique), en physique du solide ainsi que dans le domaine des techniques expérimentales et de leurs possibles applications.

À la fin de l'année 2005, un financement de 600 k€ a été obtenu auprès de l'ANR dans le cadre des projets blancs. Ce financement permettra de démarrer la construction du futur spectromètre GRANIT dès 2006. Les premières mesures sont envisagées à la fin 2008.

[1] V.V. Nesvizhevsky et al., Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field, Nature 415 (2002) 297-299.

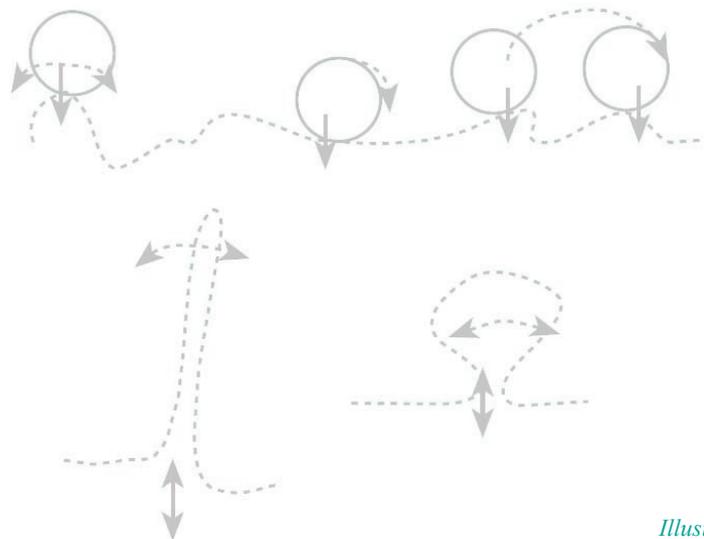


Illustration V.V. Nesvizhevsky