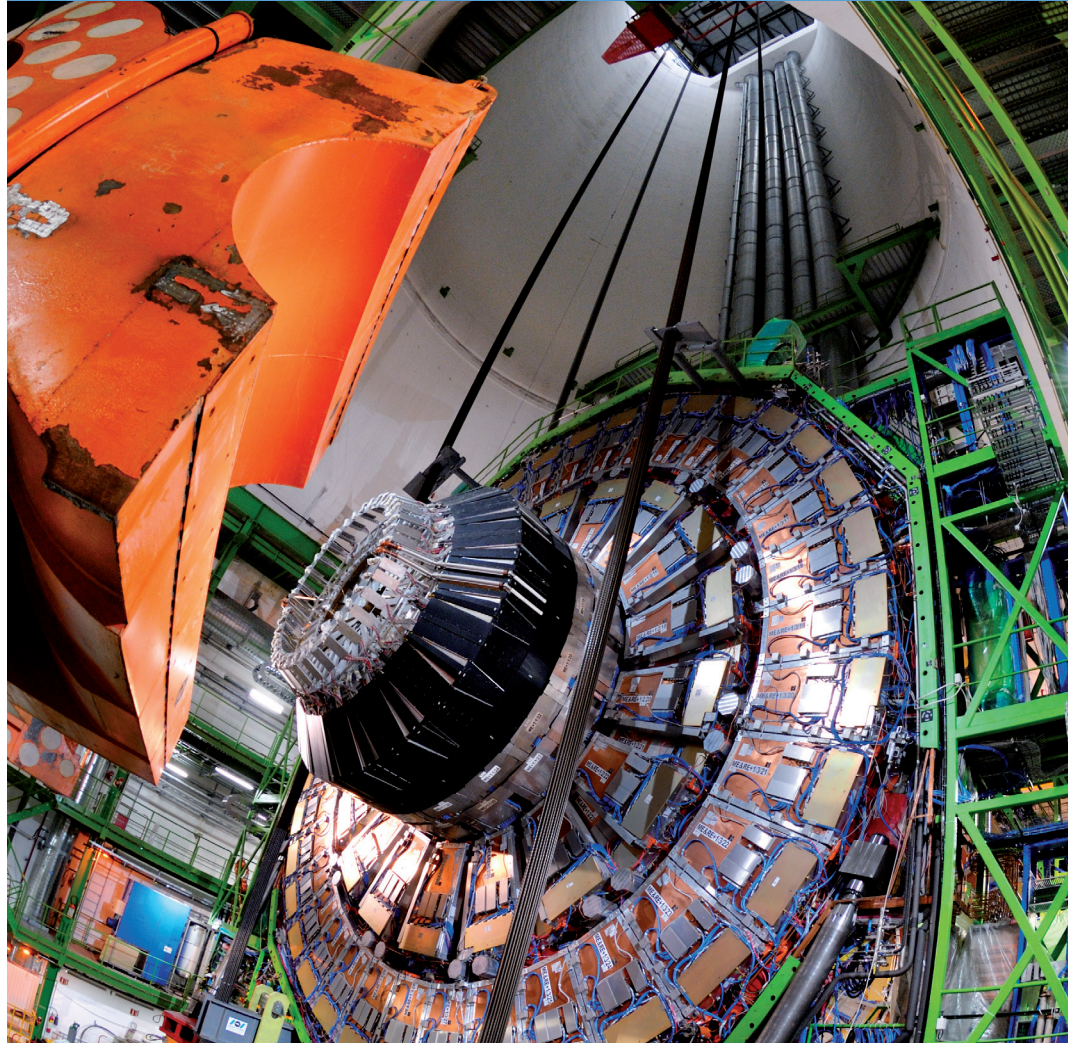


Service de physique des particules

Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers



# Rapport d'activités SPP 2007-2010



« A la mémoire de Dario Motta »



*Descente d'une tranche du détecteur CMS dans la zone expérimentale.*

*Le démarrage du LHC a été certainement l'événement le plus marquant de cette période 2007-2010. L'attention avec laquelle il a été suivi reflète l'envergure mondiale de ce projet de recherche. Les bâtisseurs de cette « cathédrale de la science » ont toute raison d'être fiers de leur œuvre. Les contributions de l'Irfu et du SPP sont des apports majeurs à l'accélérateur et aux détecteurs Atlas*

*et CMS. A mentionner le toroïde à air, qui a donné lieu à la photo emblématique d'Atlas, et tout le travail relié sur la détermination précise du champ magnétique ; le système d'alignement des chambres à muons d'Atlas et les algorithmes complexes pour son exploitation ; le calorimètre à argon liquide d'Atlas et l'étude de ses performances ; le système de mesure de la transparence des cristaux du calorimètre de CMS et son exploitation en continu.*

*Avec l'annonce des derniers résultats sur le boson de Higgs, d'abord au Tevatron, puis surtout au LHC, la communauté des physiciens des particules a vécu un moment intense. Elle peut, à juste titre, se sentir confortée dans ses choix et cueillir les fruits des efforts continus déployés depuis le début des années 90. Une mobilisation considérable a été mise en œuvre au SPP et au sein des services d'ingénieries de l'Irfu pour atteindre les performances nominales des détecteurs, optimiser les logiciels de reconstruction, de visualisation et d'analyse des données et produire les résultats à la cadence des grandes conférences internationales. C'est aussi dans la compréhension des propriétés du quark top et dans les mesures de précision que des avancées considérables ont été réalisées d'abord au Tevatron, puis au LHC dont les premières données ont permis de produire des résultats de premier ordre.*

*A l'aube d'une nouvelle ère, les communautés française et européenne s'interrogent sur leur avenir, et notamment sur les prochaines phases de montée en énergie et en luminosité du LHC — nécessitant de perfectionner les détecteurs — ou encore sur la construction d'un collisionneur linéaire. Pour l'institut et pour le service, c'est maintenant l'occasion unique de contribuer à l'élaboration de la stratégie nationale et internationale.*

*Dans le domaine de la physique des neutrinos, après le démarrage réussi de l'expérience T2K, l'analyse de ses premières données a fourni des indications d'une valeur non nulle de l'angle  $\theta_{13}$ , ce qui a été confirmé par la suite par une première mesure de l'expérience Double Chooz. Le futur se dessine dans le cadre du réseau européen Laguna et au travers*

*d'études visant des avancées technologiques comme l'utilisation de détecteurs micromegas dans l'argon liquide. Par ailleurs, la phase préparatoire de l'analyse des données de Double Chooz a révélé une anomalie dans le flux des antineutrinos produits par les centrales nucléaires qui pourrait être expliquée par l'existence d'un nouveau type de neutrinos. Ce sujet suscite un intérêt certain et conduit à des projets d'expérience. Une mesure du flux à très faible distance du cœur du réacteur Osiris de Saclay par l'expérience Nucifer donnera très bientôt un autre point de mesure, bien que le but de cette expérience soit une étude de faisabilité de la surveillance continue de la composition des cœurs des réacteurs nucléaires dans le cadre de la non-prolifération des matières fissibles.*

*Les énigmes de la matière noire et de l'énergie noire dans l'Univers posent certaines des grandes questions de la physique fondamentale d'aujourd'hui. Les excès d'événements, observés à la fois dans l'expérience bolométrique Edelweiss et dans l'expérience concurrente CDMS, n'ont malheureusement pas été confirmés par la suite. La prise de données actuelle devrait permettre de cerner l'origine de l'effet. Devant les résultats négatifs obtenus avec les expériences au xénon liquide de meilleure sensibilité, la poursuite de la recherche de wimps avec un projet bolométrique de type Eureka doit être débattue.*

*Après avoir étudié à l'aide des supernovas, au sein de SNLS, la contribution de l'énergie noire au bilan énergétique de l'Univers, le groupe de cosmologie se concentre*

aujourd'hui sur l'étude des ondes acoustiques baryoniques (BAO) en participant au projet BOSS de SDSS-III. Les premiers résultats ont déjà conduit à produire la plus grande carte de l'Univers en 3D. Ils témoignent de la bonne maîtrise acquise par le groupe dans ce domaine. Le futur se dessine au travers de la participation aux projets e-Boss et BigBoss, sous réserve de leur acceptation, et d'une possible contribution à la mission spatiale Euclid conduite par le service d'astrophysique. L'exploration de la détection des BAO par ondes radio s'est conclue par des tests validant une carte électronique d'interférométrie au télescope de Nançay. Dans le domaine de la cosmologie, une contribution à la mission Planck a permis de prendre part à l'élaboration d'un instrument lancé sur satellite au sein d'une grande collaboration.

Le succès de l'astronomie gamma avec la détection d'une multitude de sources au TeV, dont certaines sans contreparties, par le réseau de télescopes Cherenkov HESS a fermement établi ce domaine de recherche. L'intérêt de l'équipe HESS s'est focalisé sur les recherches de matière noire, et, liée à cela, la connaissance du centre galactique et des galaxies naines. La construction de HESS-2, un télescope de 28m, qui complète les quatre télescopes de HESS, permettra d'augmenter la sensibilité et a nécessité le développement d'un nouveau niveau de déclenchement auquel l'Irfu a contribué. L'essor de l'astronomie gamma a conduit la communauté internationale à proposer la construction d'un observatoire de nouvelle génération, CTA, qui fait aujourd'hui l'objet d'une phase préparatoire financée en partie par le programme européen FP-7. L'installation du détecteur Antares s'est terminée et les prises de données permettent de valider pleinement la technologie sous-marine, avec des sensibilités aux sources galactiques de neutrinos jamais atteintes auparavant. La détection de sources est hélas assujettie à l'instrumentation de volumes dépassant ce qu'il est raisonnable de construire dans un futur acceptable, comme le montrent les études dans KM3NeT, financées dans le cadre des 6<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup> PCRD.

L'étude des différences entre matière et antimatière liées à la violation de CP est entrée dans une ère de mesures de précision grâce à NA48 et BaBar, expériences maintenant

terminées. Sous un autre angle, l'expérience GBAR se fixe pour objectif d'étudier la différence entre hydrogène et antihydrogène à l'aide d'un procédé innovant produisant de l'antihydrogène atomique thermalisé. Une collaboration internationale a été mise sur pied et l'expérience a été approuvée au CERN. Mentionnons que le piège de Penning du dispositif expérimental a été fourni par une équipe japonaise et est installé à Saclay.

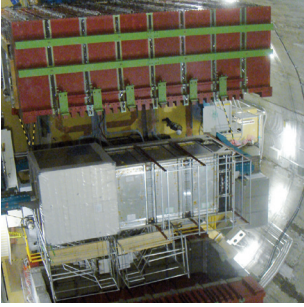
La recherche en instrumentation se poursuit, en collaboration avec les services techniques, soit pour des projets tels que la mise en œuvre de micromegas dans les upgrades des détecteurs LHC, soit pour le développement d'une caméra TEP fondée sur la calorimétrie avec un liquide chaud.

Durant cette période le SPP a pu maintenir des effectifs stables avec neuf départs et dix arrivées. Après discussion avec les membres internes du CSTS, les recrutements ont été « coloriés » dans le but de renforcer les équipes sous-critiques. Le nombre d'étudiants en thèse et de post-docs est constant et l'on note une augmentation d'étudiants étrangers qui viennent faire leur thèse dans le service, ainsi que du nombre d'HDR. Les sources de financement se sont multipliées avec pour corollaire des défis supplémentaires pour maintenir une cohérence stratégique entre les projets et leur pérennité dans le temps.

Le SPP s'est doté d'une chaîne d'information interne supplémentaire : un « apéro » hebdomadaire qui permet de faire connaître les activités des différents groupes au travers de courts exposés souvent présentés par de jeunes chercheurs, et d'informer sur la vie du service. Finalement la réunion biennale de Saint-Lambert-des-Bois est un nouveau rendez-vous qui permet d'aborder des sujets importants en profondeur.

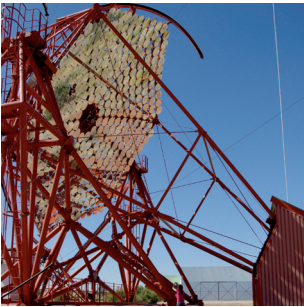
Finalement je voudrais saluer toutes les initiatives développées dans le service pour communiquer sur notre domaine scientifique et de nous faire connaître auprès des étudiants, par l'enseignement, la participation aux masters et écoles doctorales ou encore la création d'écoles d'été. Je tiens particulièrement à remercier chaleureusement tous les chercheurs qui donnent de leur temps pour ces initiatives et pour la vie du service.

Ursula Bassler



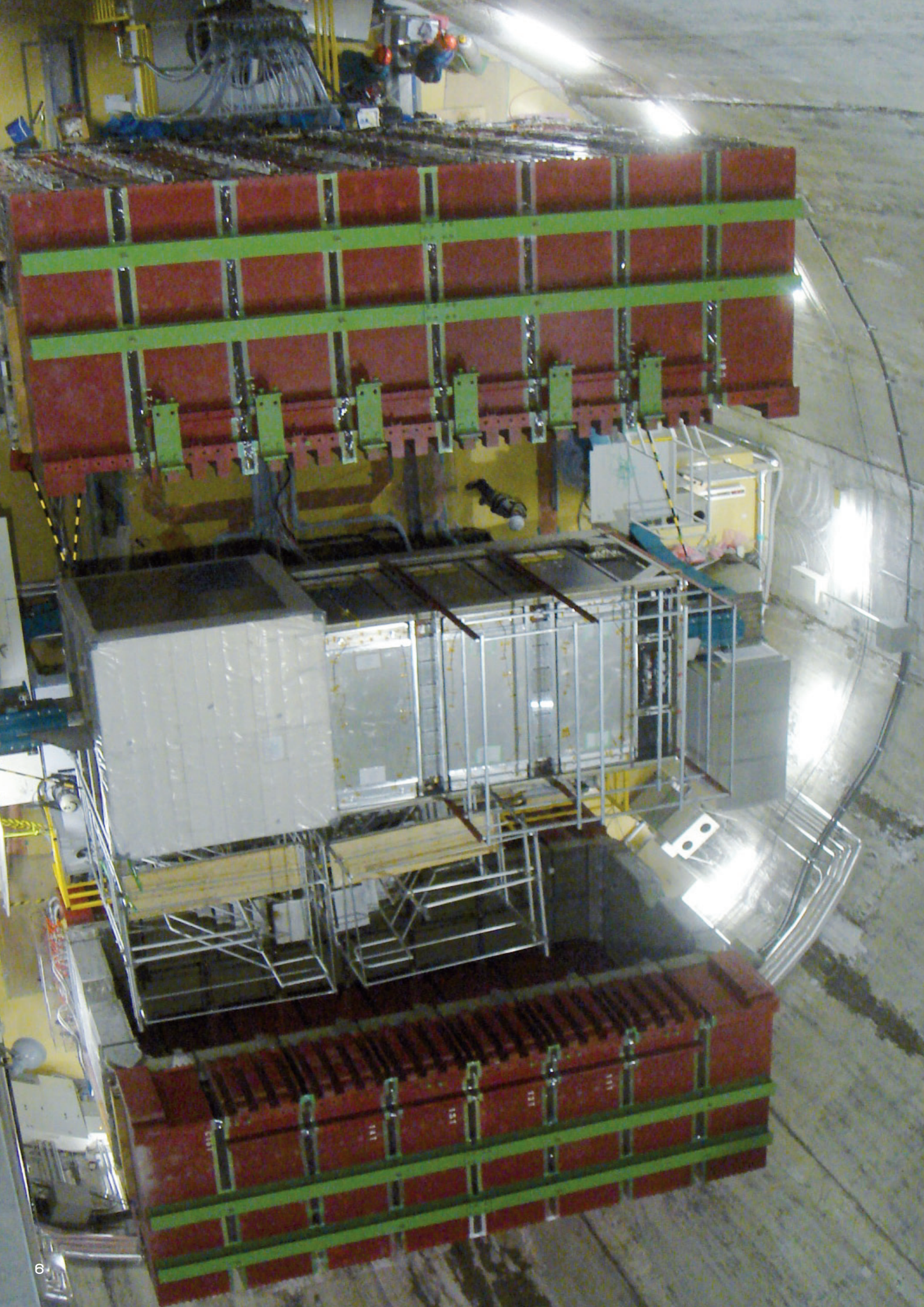
## Quelles sont les lois fondamentales de l'univers ? 7

■ ATLAS	9
■ CMS	11
■ DO	13
■ H1	15
■ ILC	17
■ BABAR	18
■ NA48	20
■ GBAR	22
■ T2K	24
■ DOUBLE CHOOZ	26
■ NUCIFER	28



## Quel est le contenu de l'univers ? 31

■ ANTARES ET KM3NET	33
■ ASTRONOMIE GAMMA DE HAUTE ENERGIE	35
■ EDELWEISS	37
■ SUPERNOVAS ET OSCILLATIONS ACOUSTIQUES BARYONIQUES	39
■ PLANCK	41



# Quelles sont les lois fondamentales de l'univers ?

- ATLAS
- CMS
- D0
- H1
- ILC
- BABAR
- NA48
- GBAR
- T2K
- DOUBLE CHOOZ
- NUCIFER



*Le détecteur proche ND280 de l'expérience T2K vu de dessus.*

*Le modèle standard de la physique des particules qui s'est construit progressivement depuis les années 1960 est un grand succès. Il permet de décrire de façon totalement cohérente les constituants élémentaires de la matière et les forces fondamentales qui régissent leur interaction. Néanmoins ce*

*modèle connaît un certain nombre de limitations et ne cesse d'être exploré de plus en plus précisément à la recherche d'éventuelles failles. Certaines interrogations fondamentales restent encore sans réponse comme la compréhension du mécanisme de génération des masses — et ce même après la découverte majeure d'un boson de Higgs à l'été 2012 — ou la compréhension de l'asymétrie matière-antimatière aussi bien dans le secteur des quarks que dans celui des leptons. Le service de physique des particules du CEA joue un rôle important dans les expériences qui cherchent à répondre à ces questions.*

*La période 2007-2010 a tout d'abord vu le démarrage du LHC en 2009, événement majeur préparé de longue date. Après la recherche du boson de Higgs et l'étude des paramètres du modèle standard au Tevatron, le LHC a pris le relai, ouvrant un domaine en énergie encore inexploré. Après la phase essentielle de construction et d'étalonnage des détecteurs Atlas et CMS, les premières collisions au LHC ont fourni leur moisson de résultats, confirmant les prédictions du modèle standard. En parallèle, les réflexions sur les accélérateurs du futur ont déjà débuté.*

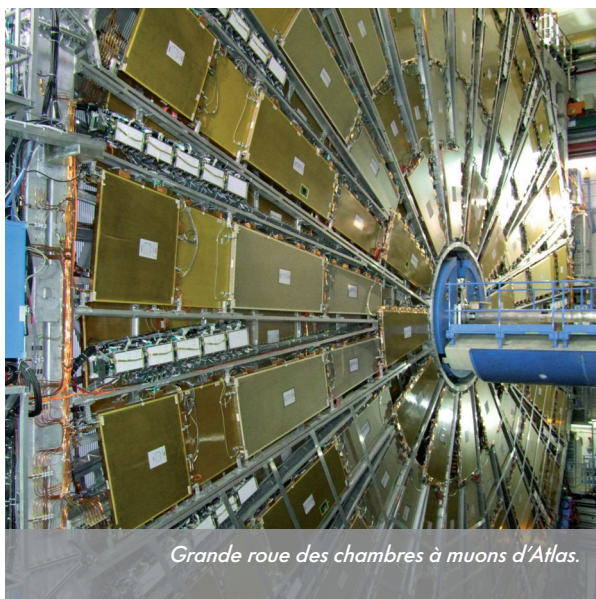
*Grâce en particulier à l'expérience BaBar qui s'est achevée en 2008, les paramètres qui gouvernent la violation de la symétrie CP dans le secteur des quarks sont maintenant connus avec une précision inégalée. L'attention se tourne maintenant sur l'étude de l'asymétrie matière-antimatière dans le secteur des neutrinos, à la fois avec le démarrage de l'expérience T2K — sur faisceau — en 2009 et avec la fin de la construction du détecteur lointain de Double Chooz — sur réacteur — en 2010. Ces deux collaborations ont fourni de premiers résultats prometteurs pour les années futures. Les propriétés de l'antimatière sont aussi scrutées par l'expérience GBAR avec la mise en place des premières étapes nécessaires à la mesure de la chute libre d'atomes d'antihydrogène.*

**Frédéric Déliot**



# ATLAS

*La collaboration internationale Atlas se propose d'explorer le nouveau domaine de physique qui s'ouvre au LHC, à l'aide d'un détecteur capable d'effectuer des mesures précises dans un très grand angle solide. Après des événements simulés puis issus de rayons cosmiques, le groupe exploite depuis 2009 les premières collisions de protons.*



Grande roue des chambres à muons d'Atlas.

La collaboration Atlas rassemble près de 3000 scientifiques issus de 174 laboratoires provenant de 38 pays et se propose d'exploiter tout le potentiel de découvertes offert par le LHC avec une énergie nominale de 14 TeV et une luminosité qui atteindra  $10^{34}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>. Le détecteur comprend un trajectographe, des calorimètres et un spectromètre à muons. La configuration magnétique d'Atlas comporte un aimant solénoïdal supraconducteur qui entoure la cavité contenant le détecteur interne pour la trajectographie, et huit bobines supraconductrices disposées autour des calorimètres qui produisent un champ toroïdal dans le grand volume du spectromètre à muons.

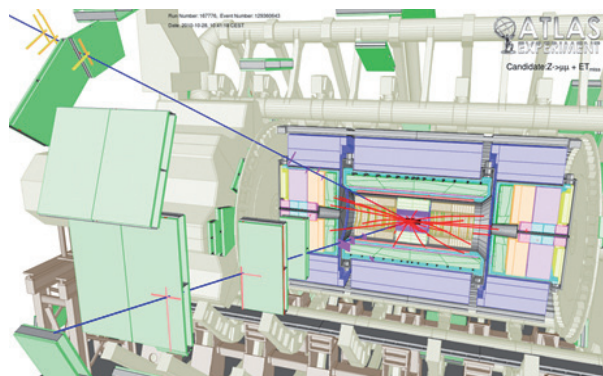
Le groupe de Saclay a participé dès l'origine à la conception d'Atlas et a pris des responsabilités importantes dans la conception de l'aimant toroïdal, dans le calorimètre électromagnétique et le spectromètre à muons. Il a aussi joué un rôle important dans le développement de logiciels pour la reconstruction des événements et la préparation des analyses de physique avec des simulations et, depuis 2008, dans l'analyse des données provenant de rayons cosmiques puis, en 2009, dans celle des premières collisions proton-proton.

Une campagne de simulation à grande échelle, menée par le SPP dès 2008, a permis de définir les performances du détecteur et sa capacité à produire des résultats de physique. Ce travail a abouti à la rédaction d'un document de référence sur les performances et le potentiel de physique d'Atlas. Ces études nous ont permis de préparer les analyses dans des domaines de physique aussi variés que les tests du modèle standard (mesure des sections efficaces de production des bosons W et Z, mesure précise de la masse du W), l'étude du quark top (section efficace de production de paires top-antitop, masse du quark top), la recherche du boson de Higgs dans le canal de désintégration en quatre leptons et celle de résonances de haute masse dans le canal dimuon.

## Mise en service du calorimètre et du spectromètre

Début 2007, tous les calorimètres ainsi que 90% des chambres de la partie « tonneau » étaient installés. L'installation des chambres restantes ainsi que celles des parties bouchons s'est poursuivie jusqu'à mi-2008. En parallèle, l'Irfu a participé à la mise en œuvre du système de déclenchement pour le calorimètre et a eu un rôle déterminant dans le système d'alignement optique des chambres à muons. A partir de mi-2008, la prise de données provenant de muons cosmiques a permis de peaufiner et de valider les logiciels de reconstruction des muons dans le spectromètre ainsi que de valider la logique de déclenchement du calorimètre.

Le 10 septembre 2008, le détecteur était prêt à acquérir les événements créés par les premiers faisceaux injectés dans le LHC, à 450 GeV, et interagissant avec un collimateur situé en amont du détecteur. Après l'incident du 19 septembre qui a provoqué un arrêt de la machine de plus d'une année, l'acquisition et l'analyse de plus de 500 millions d'événements cosmiques ont



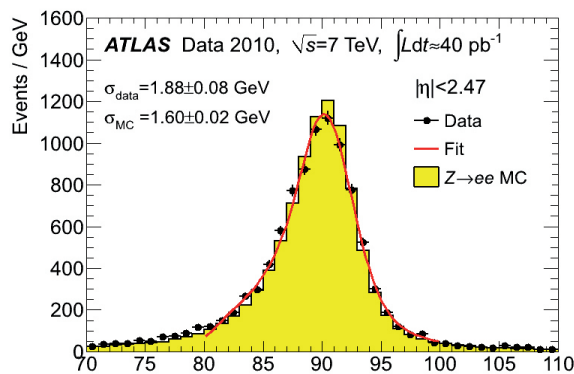
Événement de collision proton-proton à 7 TeV avec la production d'un boson Z se désintégrant en deux muons (un dans la partie «tonneau» et l'autre dans la partie bouchon).

permis une mise au point du détecteur et des logiciels de reconstruction et de simulation à un niveau tel que les analyses de physique ont été possibles dès les premières prises de données, à 900 GeV en novembre 2009 et à 7 TeV à partir de mars 2010.

## Premières études de physique avec les collisions proton-proton à 7 TeV

Depuis mars 2010, la luminosité fournie par la machine a augmenté d'une manière quasi exponentielle jusqu'à la fin de la prise de données proton-proton début novembre. Ces premières données ont permis de retrouver les résonances se désintégrant en di-leptons :  $J/\Psi$ ,  $Y$  et boson  $Z$ .

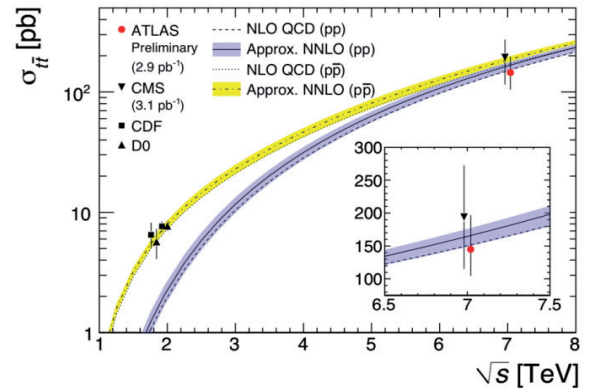
La pureté de ces signaux et la grande statistique rapidement disponible ont été mises à profit pour étalonner les trajectographes et calorimètres, tant au niveau de la précision de mesure de l'échelle d'énergie que de l'efficacité de reconstruction. Le groupe du SPP s'est beaucoup investi dans ces travaux que ce soit avec les muons pour étudier les performances du spectromètre ou avec les électrons pour les études du calorimètre.



Masse invariante reconstruite des paires d'électrons-positons. La distribution expérimentale (points noirs) est en bon accord avec la simulation d'événements  $Z \rightarrow ee$  (histogramme jaune).

Du côté des analyses de physique, sur la lancée des études effectuées avec les événements simulés, le groupe du SPP a participé activement à la production des premiers résultats portant sur des processus du modèle standard : mesures des sections efficaces de production à 7 TeV d'énergie dans le centre de masse de la collision proton-proton de la résonance  $J/\Psi$  et des bosons de jauge  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$ . Le groupe du SPP a également contribué à la mise en évidence de la production de paires top-antitop, une première de notre côté de l'Atlantique, et à la mesure de leur section efficace de production.

Malgré la modeste luminosité intégrée accumulée en 2010, les premières recherches de physique au-delà du modèle standard, auxquelles le groupe du SPP a participé, ont permis d'obtenir des limites inférieures sur la masse d'un possible boson de jauge lourd se désintégrant en deux leptons de l'ordre de 1 TeV, déjà au niveau des résultats du Tevatron.



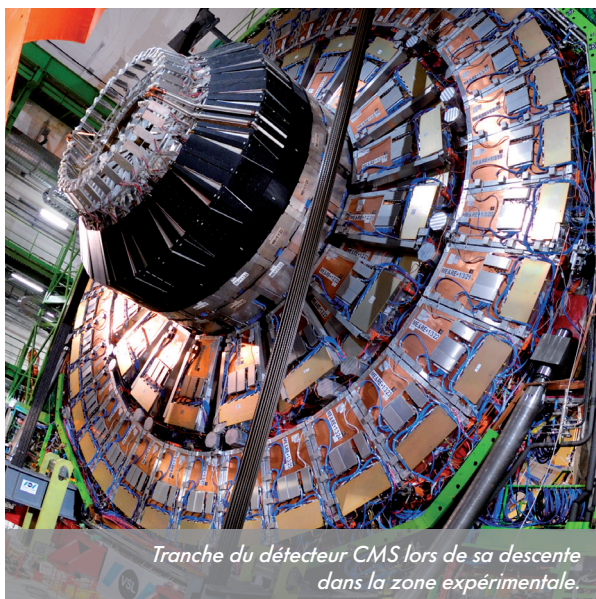
Mesure de la section efficace de production de paires top-antitop. Les points à gauche correspondent aux mesures d'ATLAS et CMS présentées à la grande conférence ICHEP2010 à Paris. La courbe jaune (resp. bleue) montre la variation attendue en fonction de l'énergie au centre de masse

Grace à l'accroissement rapide de la luminosité, ces recherches devraient aboutir à une moisson de résultats, en particulier en ce qui concerne la recherche du boson de Higgs à laquelle le groupe du SPP va participer en se consacrant particulièrement aux canaux de désintégration en quatre leptons pour profiter de l'expertise acquise dans la détection des électrons et des muons. ■

Bruno Mansoulié, Henri Bachacou, Florian Bauer, Nathalie Besson, Maarten Boonekamp, Laurent Chevalier, Jean Ernwein, Anne-Isabelle Etievre, Pierre-François Giraud, Claude Guyot, Samira Hassani, Gertraud Kozanecki, Witold Kozanecki, Eric Lançon, Jean-François Laporte, Marie Legendre, Jean-Pierre Meyer, Rodanthi Nikolaidou, Ahmimed Ouraou, Christophe Royon, Laurent Schoeffel, Philippe Schune, Jérôme Schwindling

## CMS

*Le compact muon solenoïd (CMS) explore le potentiel de découverte du LHC grâce à un détecteur généraliste dont la conception vise à obtenir des résultats de physique de la plus haute qualité scientifique. La collaboration CMS regroupe plus de 1900 physiciens et ingénieurs issus de 160 laboratoires dans 36 pays.*



*Tranche du détecteur CMS lors de sa descente dans la zone expérimentale.*

CMS est un détecteur compact de haute performance dont les éléments s'articulent autour d'un aimant solénoïdal supraconducteur de 13 mètres de long et 6 mètres de diamètre. La partie centrale du solénoïde, baignée d'un champ magnétique uniforme d'une intensité sans précédent de 3,8 teslas, accueille un trajectographe au silicium ainsi que les calorimètres électromagnétique et hadronique. Le retour de champ du solénoïde, constitué de 11000 tonnes d'acier, est équipé d'un ensemble de détecteurs à muons.

Le groupe de Saclay a été très présent dès le début dans la conception et l'optimisation de CMS, puis très actif dans la construction du détecteur. Certains membres du groupe ont assuré d'importantes responsabilités dans le comité directeur de CMS.

En 2006 a commencé la descente par morceau du détecteur CMS dans le puits de la caverne. Elle s'est poursuivie jusqu'en mai 2007. La fin de l'année 2007 et l'année 2008 ont été consacrées à l'assemblage du détecteur et aux premiers tests de détection. L'analyse des trois millions d'événements cosmiques enregistrés depuis le début de l'année 2009 s'est concrétisée par 23 articles scientifiques et techniques publiés dans le Journal of Instrumentation au début 2010.

### Le calorimètre électromagnétique

Le tungstate de plomb constituant les 78 000 cristaux du calorimètre électromagnétique Ecal est un matériau choisi pour sa bonne résolution intrinsèque associée à sa grande résistance aux radiations, son extrême densité et un temps de scintillation très court. La production des cristaux pour la partie « tonneau » du calorimètre s'est achevée en février 2007 et celle des cristaux pour les bouchons en avril 2008. Les modules du tonneau et les bouchons, à l'avant et à l'arrière, étaient installés

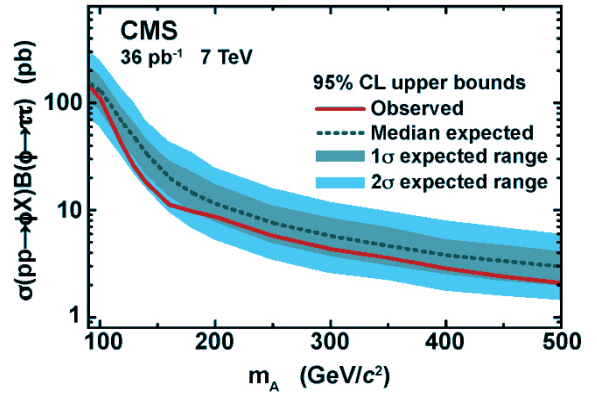
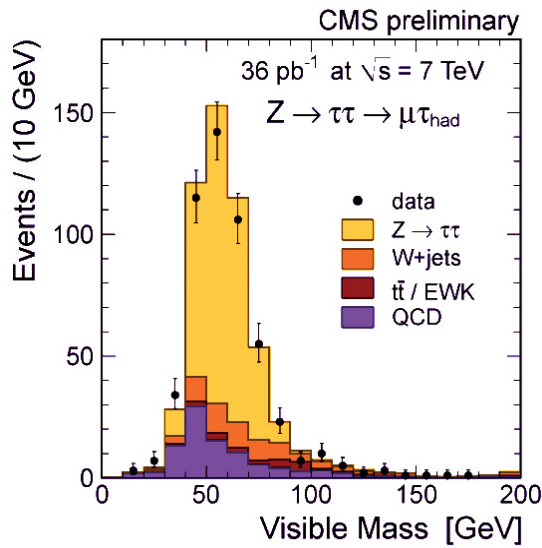
et opérationnels pour le démarrage de l'expérience en 2009.

Le groupe CMS de Saclay joue un rôle central dans l'étalonnage et dans l'optimisation de la résolution en énergie et en position du calorimètre. Les performances exceptionnelles de ce calorimètre sont essentielles pour la découverte d'un boson de Higgs de masse inférieure à 140 GeV dans sa désintégration en deux photons, canal présentant un faible rapport signal sur bruit.

### Le suivi de la transparence des cristaux

En période de collisions au LHC, les cristaux sous irradiation subissent une perte de transmission optique qu'ils récupèrent partiellement hors irradiation. Les variations de transparence peuvent atteindre 7% dans le tonneau et 30% dans les bouchons. Cet effet, s'il n'était pas mesuré, conduirait à une perte significative de résolution. La transparence des cristaux est contrôlée via l'injection d'une lumière laser, à différentes longueurs d'onde, mesurée, pour chaque cristal du calorimètre, à intervalles d'environ 30 minutes. L'Irfu a mis au point et installé le système d'injection de lumière pour l'ensemble des super modules : un travail de très longue haleine. Les lasers ont été installés dès 2008 dans la caverne voisine de CMS, un laser émettant dans le bleu, un autre dans le proche infrarouge. Cela a permis de tester in situ le système de monitoring et de démontrer son excellente stabilité avant l'irradiation des cristaux lors des premières collisions du LHC.

Le groupe de Saclay, après avoir défini la stratégie des mesures, a mis au point la ferme d'ordinateurs sur laquelle les données d'étalonnage par laser sont analysées en ligne. Le logiciel d'analyse et de visualisation de ce monitoring, mis au point durant la période 2007-2009, a permis d'évaluer rapidement la stabilité du



Première limite sur la section efficace de production d'un boson de Higgs supersymétrique, se désintégrant en une paire de leptons  $\tau$ , en fonction de sa masse.

système, de l'ordre de 0,2 % sur une période de 1000 heures sans irradiation en 2009. Lors des prises de données, les corrections en énergie des 78000 cristaux sont transférées vers la base de données permettant la reconstruction des événements dans CMS.

Le groupe participe également à l'exploitation d'événements  $\pi^0$  et  $\eta$  enregistrés à un taux de quelques kilohertz. Ces données permettent, d'une part, l'éta-lonnage du calorimètre et, d'autre part, le suivi en ligne des pertes de transparence des cristaux et la validation des corrections d'énergie déterminées par notre groupe.

## Lecture sélective du calorimètre

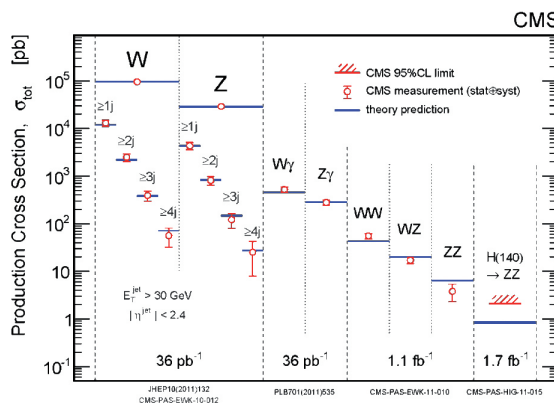
L'engagement pris par l'Irfu en 2003 de contribuer au système de lecture des événements de CMS s'est concrétisé par le développement d'un processeur de lecture sélective des données, qui permet, en ne retenant que les zones d'intérêt du calorimètre, de

réduire le flux de données d'un facteur 20, sans détérioration des informations de physique. Les spécialistes de l'instrumentation à l'Irfu ont mené à bien cette étude en mettant en œuvre des techniques sophistiquées de communication optique jusqu'alors peu utilisées dans notre laboratoire. Les modules électroniques conçus et construits par Saclay ont été installés et testés dès 2007. Le système fonctionne depuis le début des prises de données de CMS en mode collision en 2010.

## Premières études physiques à CMS

Les analyses de physique menées dans le groupe s'articulent selon trois axes : la production de photons isolés et la recherche du boson de Higgs dans la désintégration en deux photons ; la recherche d'un boson de Higgs supersymétrique dans le mode de désintégration en deux leptons  $\tau$  ; la physique électrofaible et la production multiple de bosons de jauge. Ces premières analyses sont illustrées par deux résultats : les mesures de sections efficaces de production de bosons électrofaibles faites par CMS et la première limite sur la section efficace de production d'un boson de Higgs supersymétrique se désintégrant en une paire de leptons  $\tau$ , en fonction de sa masse.

La moisson des résultats de CMS ne fait que commencer et ses premiers résultats ne sont que les prémices de ce que le LHC apportera à la physique. ■



Mesures de sections efficaces de production de bosons électrofaibles.

Marc Dejardin, Marc Besançon, Daniel Denegri, Bernard Fabbro, Jean-Louis Faure, Federico Ferri, Serguei Ganjour, François-Xavier Gentit, Alain Guivernaud, Gautier Hamel de Monchenault, Patrick Jarry, Elizabeth Locci, Julie Malclès, John Rander, André Rosowsky, Maxim Titov, Patrice Verrecchia

# D0

Le Tevatron a fonctionné de 1992 à 2011 avec une présence du SPP dès les premières heures sur l'expérience D0. La période 2007-2010 a été marquée par la découverte de la production du top célibataire par interaction faible, l'étude de l'ensemble du secteur électrofaible, avec la mesure de la masse du boson W, et les premières exclusions de domaines de masse du boson de Higgs du modèle standard. A noté également la découverte des oscillations du  $B_s$ , la découverte d'un baryon à trois saveurs de quark et enfin l'indication d'une asymétrie anormale dans la production de dimuons.



Salle de comptage de l'expérience D0.

L'expérience D0 est l'une des deux expériences situées auprès du Tevatron, le collisionneur proton-antiproton de Fermilab près de Chicago (USA). Lors de la première partie de la prise de données à une énergie de 1,96 GeV de 2001 à 2006 (Run 2a), l'expérience D0 a enregistré de l'ordre de  $1 \text{ fb}^{-1}$  de luminosité intégrée. Depuis l'été 2006, dans sa phase très haute luminosité (Run 2b), l'expérience D0 a enregistré  $9 \text{ fb}^{-1}$  de collisions, jusqu'à la fermeture du Tevatron, fin 2011. Plus de 175 articles ont été publiés dans des revues à comité de lecture par la collaboration D0 à cette date.

Le groupe D0 du SPP a pris en charge plusieurs projets techniques, à savoir le développement de la reconstruction et de l'identification des muons, la compréhension de l'échelle d'énergie des jets, l'identification des leptons  $\tau$ , la définition des lots communs de données pour les analyses de physique, la définition d'outils communs d'analyse, la compréhension globale de la comparaison entre données et simulation et enfin l'amélioration du système de déclenchement calorimétrique. Le groupe s'est également fortement investi dans les analyses des données. Ainsi, entre 2007 et 2010, il s'est positionné sur trois grands axes de recherche: la recherche de bosons de Higgs, aussi bien dans le cadre du modèle standard que dans celui de ses extensions supersymétriques ; les mesures de section efficace de

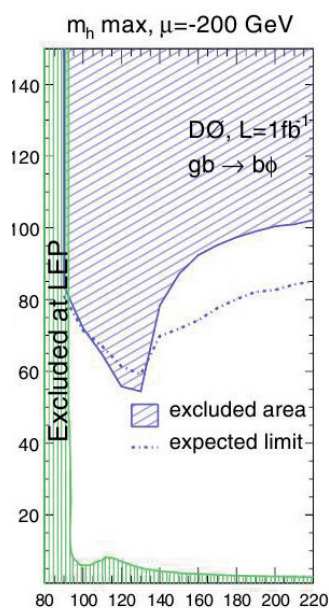
production inclusive de jets dans le cadre de QCD et l'étude du quark top.

## Physique du (des) boson(s) de Higgs

Le groupe D0 du SPP a mené à bien la publication de la recherche, avec toute la statistique du Run 2a, de bosons de Higgs supersymétriques produit en association avec

un ou deux quarks b et se désintégrant en deux quarks b. Une des difficultés majeures de la recherche d'événements avec au moins trois jets de quark b dans l'état final provient de l'ampleur du bruit de fond. Plusieurs améliorations développées par le groupe ont permis de conclure à l'absence d'excès d'événements par rapport aux prédictions du modèle standard et de contraindre plusieurs paramètres des modèles supersymétriques qui étaient jusqu'alors inaccessibles à l'expérience. Ce travail a été accepté pour publication en 2008 couronnant ainsi un effort de six années.

Le groupe s'est également investi dans la recherche de bosons de Higgs supersymétriques où les bosons de Higgs se désintègrent en deux leptons  $\tau$  dont l'un se désintègre en un électron (et deux neutrinos) et l'autre en un muon (et deux neutrinos). Ces



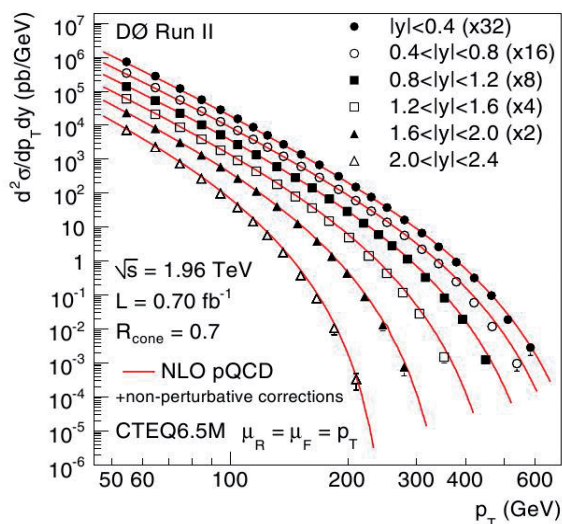
Domaine d'exclusion de paramètres supersymétriques.

résultats combinés avec les recherches dans les canaux  $ee$  et  $\mu\mu$  ont fait l'objet d'une première publication en 2008. En 2009 et 2010, le groupe a étendu son activité de recherche des bosons de Higgs supersymétriques, produits en association avec un ou deux quarks  $b$ , mais cette fois dans le canal de désintégration en deux leptons  $\tau$  où un lepton  $\tau$  se désintègre en muon et neutrinos et l'autre de manière hadronique.

Le groupe recherche également le boson de Higgs du modèle standard dans le canal de désintégration en deux bosons  $W$  (dominant pour des masses de bosons de Higgs supérieures à 135 GeV), eux-mêmes se désintégrant de manière leptonique dans les trois types d'états finals  $ee$ ,  $e\mu$  et  $\mu\tau$ .

## Chromodynamique Quantique

La section efficace de production de jets à grande impulsion transverse dépend directement de la constante de couplage de l'interaction forte et des densités de partons dans le proton. De plus, des différences avec les prédictions de QCD perturbatif peuvent apparaître à très grande impulsion transverse et pourraient être l'indication de physique au-delà du modèle standard. La section efficace a été mesurée à partir des données prises en 2004 et 2005 correspondant à une luminosité intégrée de  $0,7 \text{ fb}^{-1}$ . Les résultats publiés en 2009 sont en bon accord avec la prédiction théorique basée sur des calculs perturbatifs de la QCD NLO (*next-to-leading-order*). Les erreurs expérimentales, d'environ 2% pour des impulsions transverses de jets centraux d'une centaine de GeV, dominées par l'incertitude sur l'échelle d'énergie des jets, sont maintenant comparables aux incertitudes sur les densités de partons. Ces données permettront de contraindre les densités de partons et de gluons intervenant dans le calcul des sections efficaces des processus au LHC.



Section efficace de production de jets à grande impulsion transverse.

## Physique du quark top

A partir de 2004, le groupe D0 du SPP a contribué à la physique du quark top produit par paire avec la mesure de la section efficace de production dans le canal  $e\mu$ . Cette mesure combinée aux mesures des autres canaux dileptoniques a été publiée en 2007. Ce premier travail, réalisé avec un échantillon de données correspondant à une luminosité intégrée de  $425 \text{ pb}^{-1}$ , s'est poursuivi avec un lot de données plus important en prenant en charge l'ensemble des canaux dileptoniques. Il a permis la mesure de la masse du quark top en utilisant, d'une part, la méthode des éléments de matrice et, d'autre part, la mesure de la section efficace de production. Ces deux méthodes permettent d'aborder de manières complémentaires la définition de la masse du quark top. Deux membres du groupe participent au travail commun avec CDF pour définir des incertitudes systématiques communes et calculer la valeur de la moyenne mondiale de la masse du quark top.

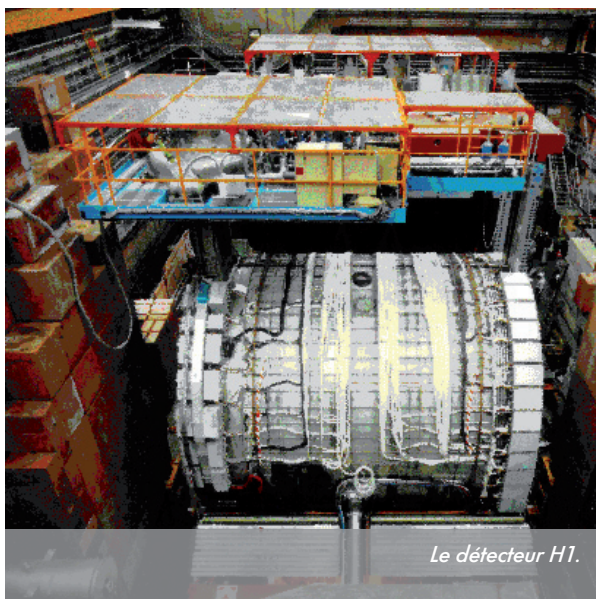
A partir de 2009, le groupe a étendu son activité dans la physique du quark top en abordant la mesure de la corrélation de spin et la mesure du rapport de taux d'embranchement de la désintégration du quark top en un boson  $W$  et un quark  $b$  par rapport à une désintégration en un boson  $W$  et un quark  $q = d, s, b$ . ■

Marc Besançon, Ursula Bassler, Fabrice Couderc, Frédéric Deliot, Christophe Royon, Viatcheslav Shary, Maxim Titov, Boris Tuchming, Didier Vilanova

# H1

*HERA, le premier collisionneur électron-proton, a été lancé en 1984 à DESY (Hambourg) pour sonder la structure du proton et explorer la chromodynamique quantique (QCD). Les premières collisions faisant interagir un faisceau d'électrons de 27,5 GeV avec un faisceau de protons de 820 GeV ont été observées en octobre 1991.*

*Le détecteur H1 a commencé à prendre des données en juin 1992. Après une augmentation de l'énergie du faisceau des protons à 920 GeV en 1998 et une phase de haute luminosité qui a débuté en 2002, la prise de donnée s'est définitivement arrêtée en juillet 2007.*



Le détecteur H1.

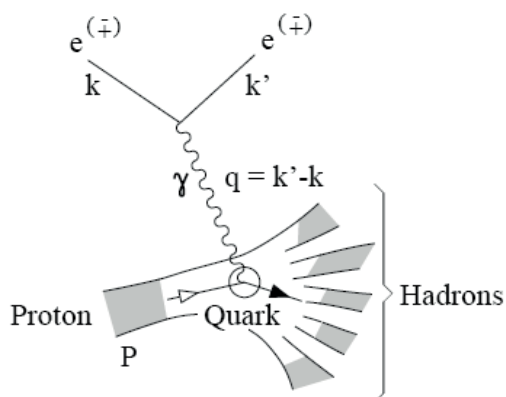
## La diffusion inélastique profonde

L'accélérateur électron-proton HERA peut être assimilé à un microscope électronique géant. En effet, lorsqu'un électron approche du proton, sa trajectoire est déviée et il émet un photon, lequel interagit avec le proton. Aux énergies des collisions électron-proton de HERA, le pouvoir de résolution est de l'ordre de  $10^{-18}$  m, soit un millième de fermi, le fermi ( $10^{-15}$  m) représentant approximativement la taille du proton.

De précédentes expériences de diffusion lepton-proton, à SLAC puis au CERN, avaient déjà permis d'atteindre des résolutions de l'ordre du dixième de fermi et de montrer expérimentalement l'existence de sous-structures

ponctuelles du proton, les partons comme prédit par Feynman en 1969, identifiés plus tard aux quarks et gluons. Ces expériences ont donné de précieuses informations sur la composition en quarks et antiquarks du proton mais ne disposaient pas de l'énergie suffisante pour mettre en évidence le rôle décisif des gluons.

Tout au long de son fonctionnement, HERA a produit environ la même quantité de données en collisions électron-proton et positon-proton. La collaboration H1 a publié à ce jour 169 articles, dont 31 ont plus de 100 citations. Dans 30 publications, le groupe du SPP a eu une contribution significative et les physiciens du SPP ont effectué plus d'une centaine de présentations dans les conférences internationales sur les résultats de H1.



Représentation schématique d'une diffusion inélastique lepton-proton. Les quadri-impulsions des particules sont indiqués : en particulier,  $q$  désigne celle transférée lors de la réaction.

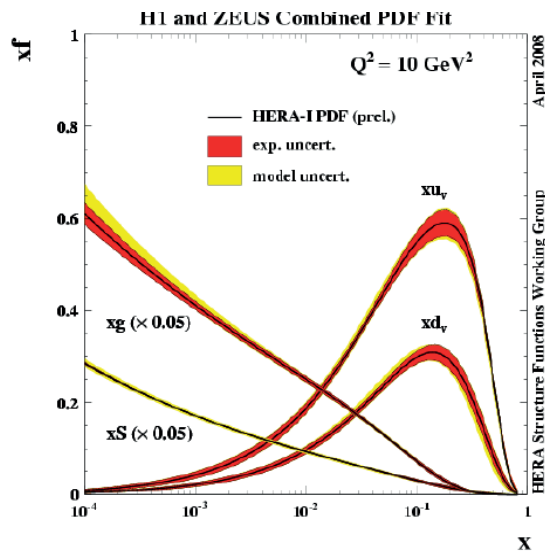
## Contributions techniques de l'Irfu

Dès le lancement de HERA en 1984 l'Irfu a contribué à la conception et à la réalisation de l'accélérateur et de l'expérience H1. Le détecteur H1 est quasiment hermétique, spécialement étudié pour les interactions électron-proton du collisionneur HERA où les énergies très différentes des électrons et protons nécessitent un détecteur asymétrique avant-arrière. En plus de la conception générale de l'expérience et l'étude de son implantation, les contributions principales de l'Irfu concernent la conception du cryostat du calorimètre à argon liquide et la réalisation de la cryogénie associée, la construction de 24 modules du calorimètre électromagnétique central et une contribution à la réalisation de son électronique de lecture.

## Des résultats marquants

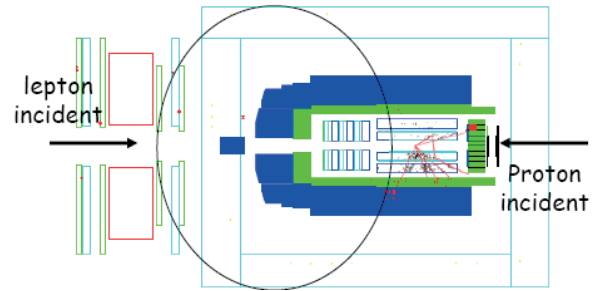
Les résultats qui resteront comme l'apport essentiel de HERA sont les distributions en impulsion des partons (« *parton density functions* »). En particulier, HERA a permis de mesurer la prééminence des gluons dès que  $x$  est plus petit que 0,01, où  $x$  est la variable qui désigne la fraction d'impulsion du parton touché lors de la collision par rapport à l'impulsion du proton incident. Cette observation ne peut être comprise que dans une théorie où les gluons interagissent entre eux, le cœur de la QCD, qui a été définitivement qualifiée par les mesures de HERA comme la bonne approche pour décrire la matière hadronique. Une analyse généraliste des distributions en impulsion des partons permet en plus de faire une véritable tomographie du proton et de démontrer que, autour d'un cœur de partons « durs », se distribue un nuage de partons plus « mous », essentiellement des gluons à plus faible impulsion. Les distributions des partons jouent un rôle essentiel pour les calculs prédictifs des processus au LHC. Au vu de l'importance du résultat, les deux collaborations H1 et ZEUS se sont associées pour fournir un résultat commun.

Grâce à l'analyse des événements de diffusion inélastique avec production de jets, il est possible de mesurer le couplage entre le photon et les quarks à différente échelles en  $Q^2$ . Lorsque que  $Q^2$  est grand, la résolution correspondant à  $\lambda \sim 1/Q$  est fine et le couplage des partons dans les « profondeurs » du proton est mesuré. Ces partons sont quasi-libres et la valeur de ce couplage est petite. Au contraire, pour les petites valeurs de  $Q^2$ , la résolution  $\lambda$  est grossière et on mesure le couplage fort à l'échelle du proton : les valeurs du couplage deviennent de plus en plus grandes lorsque  $Q$  diminue.



Distributions de partons obtenues par ajustement aux données.

Finalement, une fraction importante des événements de diffusion inélastique observés à HERA présentent des caractéristiques inattendues. Ce sont des événements où aucun débris du proton n'est observé et pourtant il y a bien eu un processus de diffusion avec l'électron diffusé à l'arrière du détecteur et des jets hadroniques dans la partie centrale. Ces événements sont des événements dits diffractifs. La diffraction a été un sujet important dans la collaboration H1 avec la moitié des publications sur ce domaine.



Événement de diffusion inélastique avec un intervalle en rapidité sans activité hadronique.

## Conclusion

Au final, le projet HERA et l'expérience H1 n'ont pas découvert de nouvelle physique mais ont parfaitement rempli l'objectif de comprendre dans son ensemble la théorie des interactions fortes. Les résultats de H1 permettent des calculs de grande précision pour les processus du LHC et ont imprégné la communauté dans son ensemble, aussi bien au CERN qu'au Tevatron ou à Jefferson Lab. Dans cette aventure scientifique, l'Irfu a joué un rôle de premier plan, dès la conception de l'expérience, jusqu'à la production des résultats de physique. ■

Laurent Schoeffel



## ILC

Depuis 2001, l'ECFA, l'ACFA et l'HEPAP ont simultanément recommandé l'étude et la mise au point d'un accélérateur linéaire  $e^+e^-$  pour parachever la physique de précision à l'échelle du TeV après le LHC. Un groupe de physiciens du SPP a étudié divers aspects de cette « physique du TeV ». Parmi ces sujets, la manifestation de l'existence de dimensions supplémentaires et la mesure de l'auto-couplage du Higgs. L'un des membres de ce groupe est devenu co-conveneur du groupe de travail sur le Higgs non standard.



Un module micromegas à anode résistive pour le prototype de TPC EUDET.

## Recherche et développement

Le groupe a participé aux R&D pour un détecteur selon deux axes : une TPC à lecture micromegas et un détecteur de vertex à base de MAPs (Monolithic Active Pixels). Ces R&D ont été partiellement financées dans le cadre du projet européen EUDET (2006-2010). Le SPP et les services techniques ont ainsi participé à la lettre d'intention pour le détecteur ILD. La conception de l'aimant et l'étude de son coût ont été réalisés au SACM.

L'étude des MAPS (Monolithic Active Pixel Sensors), en étroite collaboration avec l'IPHC de Strasbourg, a permis le développement d'un discriminateur sur chaque pixel. Plusieurs des prototypes de la série MIMOSA ont été conçus à Saclay. Ces travaux ont mené à la réalisation du télescope EUDET, fait de six plans d'une résolution de  $4,3 \mu\text{m}$  chacun, maintenant utilisé pour d'autres développements de détecteurs. Chaque puce CMOS est équipée de 664 000 pixels et est lue en totalité en  $100 \mu\text{s}$ . Depuis sa mise en service mi-2009, ce télescope a enregistré mille milliards de particules au CERN, puis à DESY. Depuis, deux copies ont été réalisées pour équiper d'autres infrastructures de test.

La R&D TPC s'est inscrite dans le cadre de la collaboration LC-TPC, revue par le PRC de DESY. Jusqu'en 2007, des tests en faisceau et en rayons cosmiques ont

été réalisés au Japon. L'analyse de ces tests a mené à une compréhension des limitations à la résolution imposées par le choix du gaz et les paramètres géométriques du détecteur. Cette étude a montré la nécessité d'étaler la charge sur plusieurs damiers et le procédé retenu est celui de l'anode résistive, développé conjointement avec l'Université de Carleton. Depuis fin 2008, six panneaux micromegas ont été testés tour à tour dans la cage de champ et l'aimant d'EUDET, amenant à un record de résolution de 50 à 60 microns avec des damiers de 3 mm de large.

En parallèle, une solution plus futuriste pour une TPC, où chaque électron d'ionisation primaire serait détecté individuellement sur des pads de  $55 \mu\text{m}$  de côté, est également à l'étude. Les prototypes réalisés à l'aide des puces TimePix conçues et produites dans ce but, financées par EUDET, ont permis des mesures très fondamentales des fluctuations d'avalanche. ■

Pierre Lutz, Marc Besançon, Paul Colas, Patrick Le Du



Séminaire du service à Saint-Lambert-des-Bois en 2008.



Séminaire du service à Saint-Lambert-des-Bois en 2010.

# BABAR

*En 2008 se termine la prise des données de l'expérience BaBar, commencée neuf ans plus tôt auprès du Slac en Californie. Cette expérience d'étude des symétries fondamentales a validé l'explication de l'origine de la violation de la symétrie CP dans le secteur des quarks, proposée par les théoriciens M. Kobayashi et*

*T. Maskawa, qui ont été récompensés par l'attribution du prix Nobel de physique en 2008. Elle a exploré précisément ce domaine jusqu'alors peu contraint par la mesure.*



*Le détecteur DIRC d'identification des particules chargées de l'expérience BABAR.*

## La violation de CP

Découverte en 1964 dans le système des kaons neutres, la violation de la symétrie CP, produit de la conjugaison de charge C et de la parité P, révèle l'existence d'une légère différence de comportement entre certaines particules et leurs antiparticules. Le modèle standard de la physique des particules en propose une explication élégante : la violation de CP dans les interactions faibles découle de la présence d'un terme complexe dans la matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) de mélange des quarks. Ce phénomène peut alors être schématisé par un triangle, appelé triangle d'unitarité, qui est la représentation graphique dans le plan complexe d'une relation due à l'unitarité de la matrice CKM.

Le système des mésons B, paires qqbar comprenant un quark ou antiquark bottom, permet à la fois de déterminer les longueurs des côtés et de mesurer les angles du triangle d'unitarité. Les taux de désintégrations de certains canaux et le mélange des mésons B neutres sont en effet reliés aux longueurs des côtés, tandis que les asymétries violant CP permettent d'accéder aux mesures des trois angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  du triangle. La confrontation de toutes ces mesures, redondantes, permet de mettre à l'épreuve la cohérence du modèle standard.

## La collaboration BaBar

L'expérience BaBar s'est donné pour objectif principal une étude complète de la violation de la symétrie CP dans le système des mésons B. Il faut pour cela disposer d'une luminosité suffisante pour atteindre les canaux rares intéressants pour la violation de CP et être capable de mesurer la différence de temps entre la désintégration des deux mésons B d'un même événement, indispensable car nombres d'asymétries violant CP s'annulent dans l'intégrale sur cette quantité. La solution est de disposer d'un collisionneur  $e^+e^-$  de haute luminosité et asymétrique en énergie, pour donner aux mésons B une quantité de mouvement suffisante afin de séparer leur vertex de désintégration et ainsi mesurer la différence de temps entre leur désintégration. Cette idée allait donner naissance aux expériences BaBar auprès du collisionneur PEP-II en Californie et Belle auprès de KEK-B au Japon.

L'expérience BaBar a pris des données entre mai 1999 et avril 2008, essentiellement sur la résonance  $\Upsilon(4S)$ , juste au-dessus du seuil de production d'une paire de mésons B, et aussi au cours des derniers mois sur les résonances étroites  $\Upsilon(3S)$  et  $\Upsilon(2S)$ . Grâce à un effort important de compréhension des faisceaux, auquel les physiciens du SPP ont contribué, une luminosité instantanée de  $1,2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  a finalement été obtenue, soit quatre fois plus que la valeur nominale initialement prévue. Durant l'ensemble de la prise des données, 470 millions d'événements correspondant à la production d'une paire de mésons B ont été enregistrés.

## Analyse des données

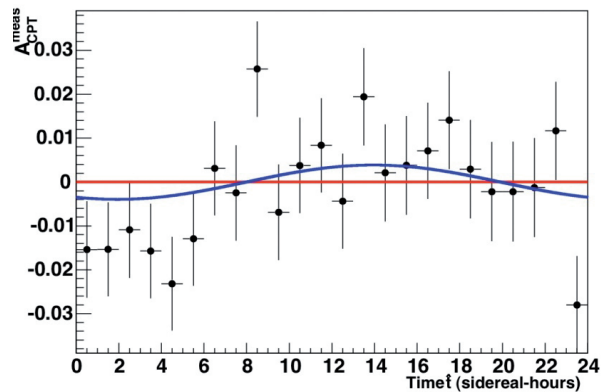
Les mesures des expériences BaBar et Belle ont dramatiquement amélioré notre connaissance du triangle d'unitarité. L'angle  $\beta$ , déterminé dans les modes  $B^0 \rightarrow \text{charmonium } K^0$ , est actuellement l'angle du triangle d'unitarité le mieux connu, avec une incertitude de  $1^\circ$ . L'angle  $\alpha$  est déterminé dans les désintégrations sans particules charmées du méson B en  $\pi \pi$ ,  $\rho \pi$  et  $\rho \rho$ , avec une incertitude de  $4^\circ$ . Enfin, en étudiant les canaux  $B \rightarrow D^0 K$  et  $B \rightarrow D^* \pi$ , l'angle  $\gamma$  est obtenu avec une incertitude d'environ  $25^\circ$ . Avec des mesures redondantes et toujours plus précises, le modèle standard est mieux contraint et jusqu'à présent ses prédictions dans le secteur de la violation de CP sont confirmées par les résultats expérimentaux.

Durant ces dernières années, les physiciens du SPP se sont particulièrement investis dans la détermination de l'angle  $\alpha$  en utilisant les modes  $B \rightarrow \rho \rho$ , qui fournissent la mesure de l'angle  $\alpha$  la plus précise. Ils ont ainsi mesuré précisément, dans une analyse en fonction du temps séparant les désintégrations des deux mésons B, les asymétries violant CP dans le mode  $B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$  et aussi dans le mode à faible rapport de branchement  $B^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0$ , observé pour la première fois.

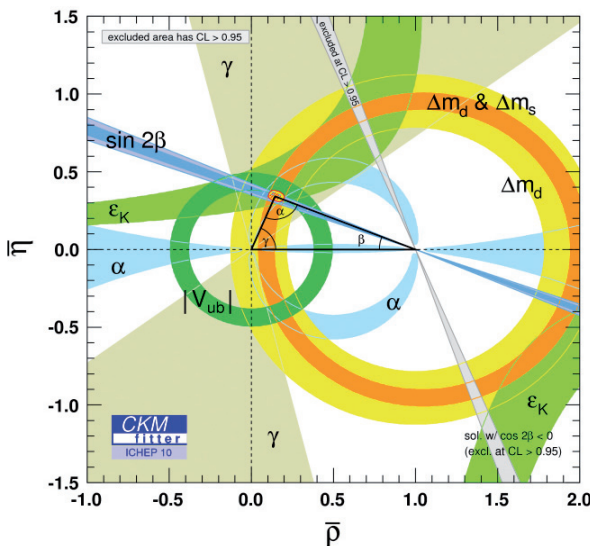
La grande quantité de données disponibles permet également de sonder des aspects subtils du modèle standard et de la théorie quantique des champs. Les physiciens du SPP ont ainsi conduit une analyse, testant en fonction du temps sidéral la symétrie CPT (produit

de CP et du renversement du temps T, cette symétrie est associée à l'invariance de Lorentz) dans le mélange des mésons B neutres, avec les événements à deux leptons. Aucune violation statistiquement significative de CPT n'est observée. Ce résultat traduit l'absence de direction privilégiée dans l'Univers et montre que l'invariance de Lorentz, pierre de touche de la physique moderne, est bien respectée.

La prise des données de l'expérience BaBar s'est achevée définitivement en avril 2008. Mais la moisson de résultats continue. La collaboration a atteint fin 2010 le nombre de 450 publications scientifiques. L'expérience a réalisé ses objectifs de physique et, avec l'expérience Belle, a fait entrer la physique de la violation de CP dans une ère de mesures de précision. Les deux expériences ont d'ailleurs décidé d'unir leurs efforts pour écrire en commun un livre sur la physique des usines à B, résumant une dizaine d'années de résultats. ■



Asymétrie  $A_{CPT}$  pour des événements à deux leptons en fonction du temps sidéral. La courbe bleue correspond à l'ajustement recherchant une éventuelle modulation due à une violation de CPT. Elle est statistiquement compatible avec la droite rouge, qui correspond à la conservation de CPT.

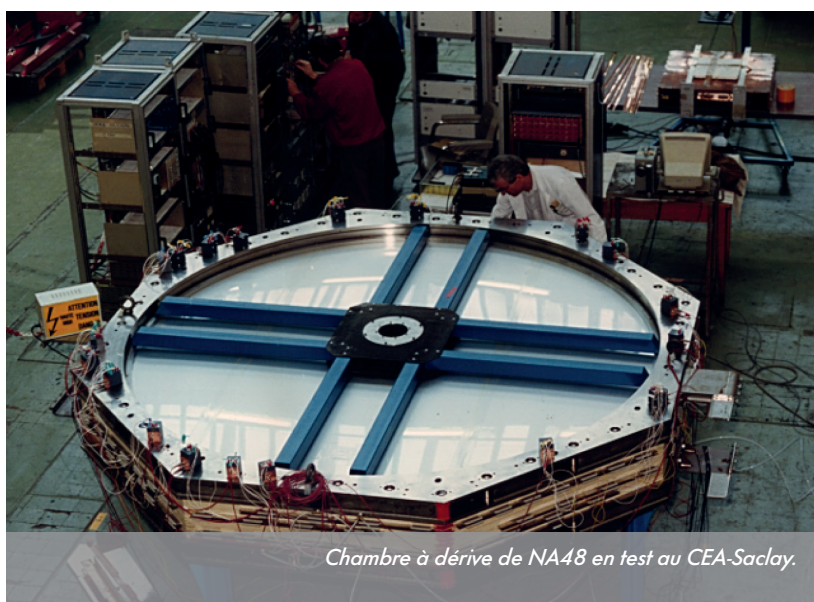


Détermination actuelle du triangle d'unitarité. Les diverses contraintes sur les mesures des angles et les longueurs des côtés, données par les zones colorées, sont cohérentes entre elles. La contrainte sur l'angle  $\alpha$ , représentée en bleu ciel, provient essentiellement de l'étude des modes  $B \rightarrow \rho \rho$ .

Georges Vasseur, Sandrine Emery, Serguei Ganjour, Gautier Hamel de Monchenault, Witold Kozanecki, Christophe Yèche, Marco Zito

## NA48

*L'expérience NA48, située auprès du super synchrotron à protons (SPS) du Cern à Genève, a pour objectif principal l'étude de la violation de la symétrie de CP dans le système des kaons.*



*Chambre à dérive de NA48 en test au CEA-Saclay.*

*Après une phase initiale dédiée à la mesure du paramètre  $Re(\epsilon'/\epsilon)$  décrivant la violation directe de CP dans les  $K^0$  (1997-2001), la collaboration NA48 a complété son programme expérimental avec l'utilisation de faisceaux intenses d'hypérons neutres et de  $K_S$  (2002), puis de kaons chargés (2003-2004).*

### NA48/1 : étude des désintégrations d'hypérons neutres et du $K_S$

Le programme de physique de l'expérience NA48/1 a concerné l'étude des désintégrations d'hypérons neutres et du  $K_S$  avec des faisceaux de haute intensité. Parmi les principaux résultats obtenus pendant cette campagne de mesures, citons en particulier la première observation des canaux  $K_S \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  et  $K_S \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$  dont les rapports d'embranchement sont d'environ  $10^{-9}$ , ainsi qu'un test très précis de CPT dans les désintégrations de kaons neutres. Plusieurs autres modes de désintégration d'hypérons neutres et du  $K_S$  ont été explorés. Parmi ceux-ci, mentionnons l'étude menée par les physiciens de Saclay sur le canal de désintégration rare  $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ . Outre la détermination, avec une précision de quelques pourcents, du rapport d'embranchement, une limite sur la violation de CP dans ce canal a été obtenue par la mesure de l'asymétrie observée dans la distribution de l'angle formé entre les plans des deux pions et des deux leptons. Cette analyse vient compléter l'étude antérieure de la voie  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ , pour laquelle une forte composante de violation indirecte de CP avait été observée, en accord avec les modèles théoriques décrivant les désintégrations radiatives du kaon neutre.

### NA48/2 : programme expérimental sur la physique des kaons chargés

En 2004, la collaboration NA48/2 a complété le programme de physique consacré à l'étude détaillée des paramètres de désintégration des kaons chargés. Outre la recherche d'une manifestation de la violation de CP par l'observation d'une asymétrie entre les désintégrations en trois pions du  $K^+$  et du  $K^-$ , les principaux axes de recherche de l'expérience ont concerné les tests du modèle standard dans les désintégrations leptoniques et semileptoniques, l'étude des modes de désintégration rares et radiatifs du kaon chargé ainsi que la compréhension de l'interaction pion-pion à basse énergie.

C'est dans ce dernier secteur que les physiciens du SPP ont apporté une contribution importante au programme de physique de NA48/2, en particulier avec l'étude des modes de désintégration  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu$ , appelés  $K_{e4}$ . L'intérêt suscité par ces canaux réside dans la possibilité de mesurer avec précision les longueurs de diffusion  $\pi$ - $\pi$  dans l'onde S, des paramètres fondamentaux de l'interaction forte à basse énergie dont les valeurs peuvent être fortement contraintes par la théorie des perturbations chirales ( $\chi$ PT) et les calculs

de QCD sur réseau. Une mesure de la longueur de diffusion  $a_{00}$  [ $j=0, l=0$ ] avec une précision de l'ordre de  $0,01/m_{\pi^+}$  permet d'apporter une information précieuse sur la taille du condensat de quarks dans le vide de QCD. Ce condensat de quarks révèle la brisure spontanée de la symétrie chirale et relie les masses des mésons pseudo-scalaires ( $\pi, \eta, K$ ) à celles des quarks  $u, d$  et  $s$ .

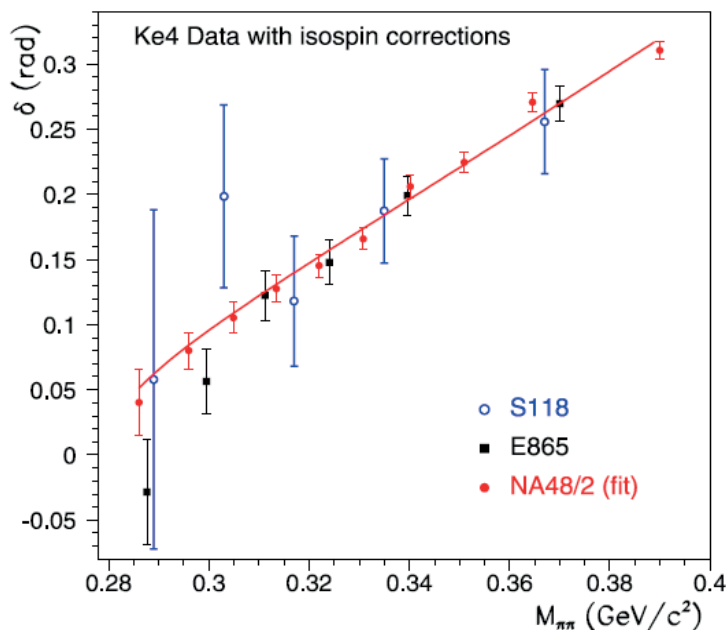
L'analyse des données récoltées en 2003-2004 a fourni une statistique de 1,13 millions de désintégrations  $K_{e4}$  observées. A partir de la mesure de la différence de phase  $\delta$  entre les ondes S et P du système  $\pi\text{-}\pi$ , une détermination précise des longueurs de diffusion  $a_{00}$  ( $l=0$ ) et  $a_{02}$  ( $l=2$ ) a été obtenue :  $a_{00} = (0,2220 \pm 0,0142) / m_{\pi^+}$  et  $a_{02} = (-0,0432 \pm 0,0097) / m_{\pi^+}$ . Ce résultat confirme les prédictions de la théorie  $\chi$ PT de même que l'hypothèse sous-jacente d'un grand condensat de quarks contribuant à la masse du pion. Par ailleurs, ces données ont permis de mesurer, avec une précision meilleure que le pourcent, le rapport d'embranchement du canal  $K_{e4}$ , fournissant ainsi une valeur absolue des facteurs de forme hadroniques.

## L'après NA48

En 2010, le dispositif expérimental NA48 a été partiellement démantelé pour laisser la place à la future expérience NA62 qui étudiera le mode très rare de désintégration  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ , complémentaire à la voie  $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  explorée au Japon. Ces deux modes rares permettent d'éprouver le modèle standard et sont sensibles à d'éventuelles contributions de nouvelle physique.

Les quatre grandes chambres à dérive du spectromètre magnétique de NA48, construites dans les années 90 par le DAPNIA et qui ont joué un rôle de premier plan dans le programme de physique de l'expérience connaîtront une seconde vie puisqu'elles sont désormais à Dubna, en Russie, où elles seront utilisées dans de nouveaux projets en physique des particules. ■

Edoardo Mazzucato, Brigitte Bloch-Devaux, Jacques Derré, Bernard Peyaud, Bertrand Vallage.



Mesure des déphasages  $\pi\text{-}\pi$  dans les désintégrations  $K_{e4}$  par l'expérience NA48/2. Les résultats de l'expérience NA48/2 sont comparés aux mesures plus anciennes de BNL-E865 et à celles de la collaboration Genève-Saclay (S118).

# GBAR

*Jusqu'à présent, les propriétés de l'antimatière se révèlent être l'exact symétrique de celles de la matière. En est-il de même pour son comportement gravitationnel ?*

Le modèle standard cosmologique semble indiquer une composition de l'Univers due pour plus de 95% à deux composantes encore inobservées, l'énergie noire et la matière noire, dont la première a pour conséquence une gravité répulsive et une accélération de l'expansion de l'Univers. Cette composition étrange est une forte indication que notre compréhension de la gravitation n'est pas complète. Certaines théories proposent que l'antimatière ait un comportement gravitationnel anormal. Dans le projet GBAR, initié à Saclay, nous nous proposons d'étudier la gravitation de l'antimatière.

## Principe

Le projet GBAR vise à mesurer l'accélération ressentie par un atome d'antihydrogène en chute libre dans le champ gravitationnel de la Terre. Il est difficile de travailler avec de l'antimatière dans un monde de matière, en particulier si l'on veut faire une pesée. Pour cela, il faut ralentir les particules d'antimatière produites. La difficulté de la mesure tient précisément au refroidissement des atomes d'antihydrogène, qui sont créés à des énergies de l'ordre du keV, mais qu'il faut ralentir à quelques dizaines de neV. La solution passe par la création d'un état intermédiaire, l'ion  $\text{Hbar}^+$  qui est constitué d'un antiproton ( $\text{pbar}$ ) et de deux positons ( $e^+$ ). Ces ions peuvent être préparés de façon à ce que leur agitation thermique corresponde à des vitesses de l'ordre d'un mètre par seconde, ce qui est impossible à réaliser avec des atomes neutres. Ces ions ultra froids sont ensuite libérés de leur positon excédentaire pour devenir des atomes neutres eux-mêmes ultra froids. La production des ions d'antihydrogène se fera à travers les réactions successives :  $\text{pbar} + \text{Ps} \rightarrow \text{Hbar} + e^-$ , suivie de  $\text{Hbar} + \text{Ps} \rightarrow \text{Hbar}^+ + e^-$ . Les antiprotons seront produits auprès du décélérateur d'antiprotons du



*Le linac compact utilisé pour produire le faisceau primaire d'électrons (hauteur de l'ensemble : 1 m).*

Cern (AD). L'activité développée à Saclay en 2007-2010 s'est concentrée sur la production d'un flux intense de positons de très basse énergie et sur la conversion de ces positons en une cible dense de positronium Ps (état lié  $e^+e^-$ ).

## Production des positons

Les positons sont produits par l'interaction d'un faisceau intense d'électrons, fournis par un petit linac industriel de 5 MeV, sur une cible de tungstène. L'énergie moyenne de ces positons « rapides » est de 1 MeV et leur flux est supérieur à celui fourni par des sources radioactives. Les positons passent ensuite par une phase de « modération » qui les réémet avec une énergie de quelques eV. Ils sont alors accumulés dans un piège de Penning à base de champs magnétiques et électriques, puis éjectés sur un matériau dans lequel ils produisent du positronium.

## Faisceau de positons rapides

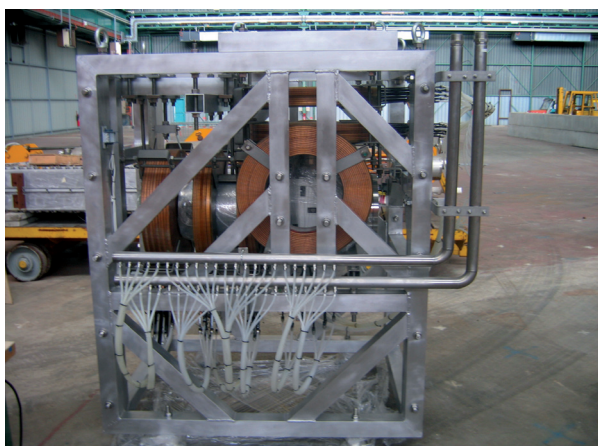
Le linac Selma (Source d'électrons pour les matériaux et l'antimatière) a été financé par le département de l'Essonne (programme Astre) en 2007. Un dispositif magnétique de tri sélectif des électrons et des positons issus de la cible, appelé Sophi, a été financé par l'ANR en 2006. Ce dispositif a été installé en 2008 et a permis d'obtenir un premier faisceau de positons dits « rapides » en 2009. Le taux de positons mesuré, inférieur aux prévisions, a mis en évidence des imperfections du linac, dont l'énergie s'est révélée être limitée à 4,3 MeV à haute intensité.

## Faisceau de positons lents

Un financement du réseau de la Physique des deux infinis, P2I, a permis de lancer la construction d'une ligne de transport des positons « lents » de quelques eV, produits après la modération des positons rapides.

## Piégeage des positons

Le laboratoire de physique atomique du Riken, près de Tokyo, a gracieusement mis à la disposition du groupe de l'Irfu un piège de Penning-Malmberg équipé d'une source de positons lents (source radioactive de  $^{22}\text{Na}$ ). Les physiciens du groupe ont ainsi pu se familiariser sur place avec une technique originale de piégeage utilisant un plasma d'électrons pour ralentir les positons. Ils ont pu étudier comment adapter cette technique à la source pulsée de positons produite avec le linac ; cela devrait permettre d'atteindre une efficacité de piégeage supérieure d'au moins un ordre de grandeur.



Le dispositif Sophi de tri magnétique des positons parmi les particules sortant de la cible.

## Formation de positronium

Les performances des matériaux capables de convertir les positons lents en positronium, élaborés grâce à des collaborations avec l'Iramis, ont été mesurées à l'aide de divers faisceaux de positons : AIST à Tsukuba, CEMHTI à Orléans, ETH Zurich et UCSD à Los Angeles. Une efficacité de conversion de 35% a été obtenue. L'énergie des positroniums produits a aussi été mesurée avec un minimum à 40 meV lorsque le matériau était porté à une température de 50 K. En compressant le pulse de positons incidents à l'aide d'un piège de Penning, il a été vérifié que les performances de ce matériau

ne changent pas sous un flux onze ordre de grandeur plus élevé que ce qui avait été testé auparavant, ce qui approche le flux nominal requis pour la production des ions antihydrogène.

## Formation de la collaboration GBAR

En décembre 2007, une lettre d'intention a été soumise au comité scientifique SPSC du Cern. En novembre 2010, une proto-collaboration a été formée en vue de présenter une proposition d'expérience complète. L'ensemble regroupe 45 physiciens et 11 instituts, dont, en France, le CSNSM d'Orsay, le Laboratoire Kastler-Brossel, l'Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg et l'Institut Laue-Langevin de Grenoble.

## Perspectives

Pendant la mise en place de la ligne de faisceau de positons lents, le piège de Penning de Riken sera transporté à Saclay afin d'y être connecté. Cela permettra de valider l'efficacité de piégeage et la conversion en positronium avec une densité record. Le positronium pourra être illuminé par un faisceau laser afin de procéder à son excitation qui doit permettre une production d'ions antihydrogène bien plus élevée. Après ces démonstrations, l'installation au Cern est prévue en 2014, pour des premières prises de données en 2016 lorsque l'anneau décélérateur d'antiprotons Elena sera mis en service. ■

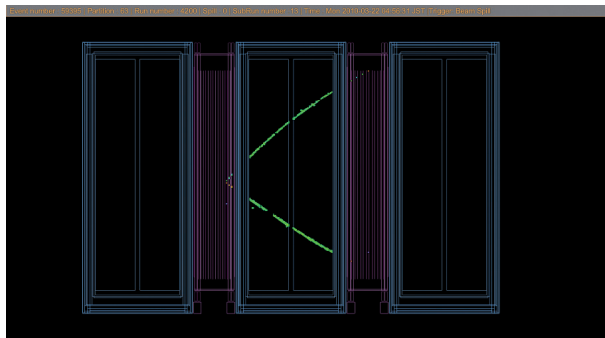
Patrice Perez, Pascal Debu, Yves Sacquin



# T2K

*L'expérience T2K étudie les oscillations des neutrinos avec un faisceau produit à J-Parc et dirigé vers Super Kamiokande. Son but est de mettre en évidence l'angle de mélange  $\theta_{13}$ , qui n'a pas encore été observé. La possibilité d'étudier la violation de CP dans les leptons dépend fortement de la valeur de cet angle.*

L'expérience T2K (Tokai to Kamioka), située au Japon, est une collaboration internationale, avec une forte contribution de l'Europe (50% des collaborateurs). Il s'agit d'une expérience d'oscillation de neutrinos mesurant un faisceau de neutrinos muoniques à courte (280 m) et à longue distance (295 km). Le faisceau, produit à J-Parc (Tokai) pointe vers le détecteur lointain Super Kamiokande (SK). Le but principal de T2K est de mesurer l'oscillation des neutrinos muoniques en neutrinos électroniques afin de mesurer  $\theta_{13}$ , le dernier angle non mesuré de la matrice proposée par Pontecorvo, Maki, Nakagawa et Sakata (PMNS) pour rendre compte de l'inadéquation entre les états propres de saveur et les états propres de masse des neutrinos. Une valeur non nulle de l'angle  $\theta_{13}$  aurait de grandes conséquences en physique, que ce soit théorique, pour l'expliquer, ou cosmologique, le neutrino ayant un rôle déterminant dans l'histoire de l'Univers. Le but de T2K est donc de le mesurer à travers l'apparition de  $\nu_e$  dans un faisceau de  $\nu_\mu$ . Les bruits de fond principaux sont dus aux  $\nu_e$  présents dans le faisceau dès l'origine et à la réaction de type courant neutre avec production de  $\pi^0$ . Ces bruits de fond peuvent être contrôlés avec une bonne précision par des mesures dans le détecteur proche.



*Une interaction de neutrino de type courant chargé quasi-élastique observée dans les TPC du détecteur proche de T2K.*



*Le détecteur proche ND280 de l'expérience T2K.*

Au-delà de l'angle  $\theta_{13}$ , T2K pourra mesurer précisément l'angle  $\theta_{23}$  et la différence de masse  $\Delta m^2_{31}$ . A ces mesures, il faut ajouter la mesure du « temps de vol » des neutrinos qui permettra de confirmer ou infirmer les vitesses supra-luminiques des neutrinos mesurées dans Opera.

## La TPC

Le groupe « neutrino accélérateur » du SPP a été actif dans la collaboration T2K depuis sa formation. Nous avons fortement contribué à la conception et à la construction de la TPC du détecteur proche, qui a joué un rôle central dans les analyses. Nous avons conçu et testé les 72 micromegas de cette première grande TPC instrumentée avec des détecteurs à micro-structure ayant une surface sensible de 9 m<sup>2</sup>. Les micromegas ont été réalisés avec la technique « bulk micromegas », qui permet d'obtenir des détecteurs robustes et de grande taille. Chaque détecteur (35x35cm<sup>2</sup>) comprend 1726 pads de 6,9x9,7 cm<sup>2</sup>, et peut atteindre des gains de 10<sup>4</sup> avec une résolution en énergie de 9% pour 5,9 keV déposés. De plus, l'Irfu a conçu et réalisé toute l'électronique frontale, avec le chip After spécialement conçu pour cette utilisation, en tout 124000 voies échantillonnées à 25 MHz. Les premières données de la TPC ont permis d'atteindre 600  $\mu$ m de résolution spatiale et une précision de 8 % sur la mesure de l'ionisation, utilisée pour l'identification de particules.

## Résultats

Le flux de neutrino est prédit à partir des résultats de l'expérience NA61/Shine au CERN qui mesure les sections efficaces de production des pions et des kaons dans l'interaction d'un faisceau de protons sur une cible de carbone. Le flux prédit est vérifié par la mesure des interactions dans le détecteur proche.

T2K a démarré sa prise de données en décembre 2009 et a enregistré en 2010 et 2011 un échantillon correspondant à  $1,43 \cdot 10^{20}$  protons sur la cible. Cela correspond à plusieurs milliers d'interactions de neutrinos en position proche et à une centaine dans SK. L'expérience a publié en juillet 2011 ses premiers résultats. A la fin de la procédure de sélection, six événements avec un anneau de type électron sont isolés alors que le bruit de fond attendu pour un  $\theta_{13}$  nul est de  $1,5 \pm 0,3$  événements. La probabilité d'une fluctuation statistique du bruit de fond est de 0,7 %. On obtient pour la première fois une région de confiance à 90 %  $0,03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0,28$  (hiérarchie normale des masses des neutrinos) qui exclut une valeur nulle de  $\theta_{13}$ . Cela a été obtenu avec un échantillon statistique qui ne représente que 2% du total prévu pour T2K. Peu de temps après, la collaboration Minos a aussi montré des indications d'apparition de  $\nu_e$ , avec une signification statistique moindre. En combinant toutes les données disponibles, dont les neutrinos solaires, on obtient un niveau de confiance de  $3 \sigma$  pour  $\theta_{13}$  différent de zéro.

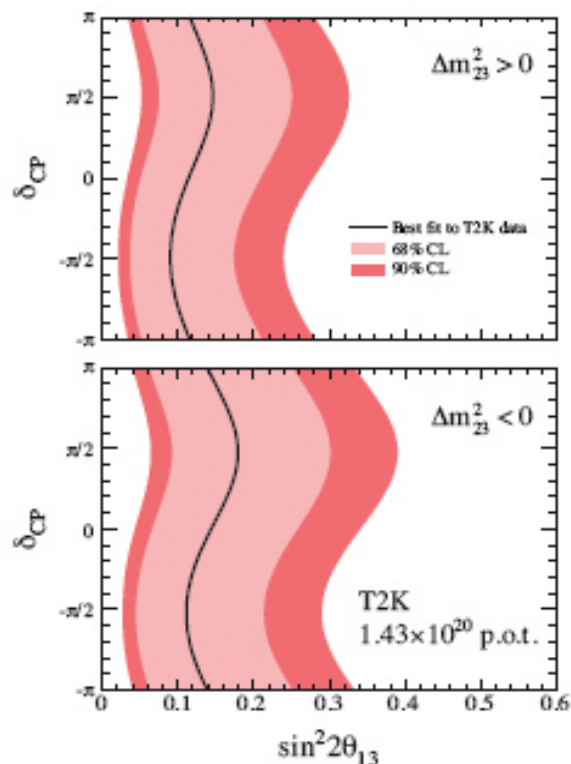
L'équipe du SPP a fortement contribué à ces analyses en réalisant la mesure des interactions des neutrinos dans le détecteur proche. Cela a permis de confirmer la simulation du faisceau et aussi de réduire les incertitudes systématiques. En particulier nous avons effectué une analyse des interactions de type courant chargé en sélectionnant 1529 événements. On obtient une mesure du rapport  $N(\nu_\mu \text{ Data})/N(\nu_\mu \text{ MC}) = 1,04 \pm 0,03$  (stat)  $\pm 0,06$  (syst), qui confirme le très bon contrôle que nous avons sur le flux de neutrinos. Nous avons aussi étudié la composante  $\nu_e$  du faisceau avec une analyse relativement difficile (il y a seulement 1% de  $\nu_e$  dans le faisceau) qui a permis de mesurer  $N(\nu_e \text{ Data})/N(\nu_e \text{ MC}) = 0,6 \pm 0,4$ (stat)  $\pm 0,2$ (syst).

L'expérience T2K a aussi mené l'analyse de disparition des  $\nu_\mu$  qui confirme leur disparition quasi totale dans la région attendue et qui donne une première mesure des paramètres d'oscillation compatible avec les expériences SK et Minos.

## Perspectives

La prise de données de T2K va reprendre au début de 2012 dans le but d'accumuler  $10^{21}$  POT à l'été 2013. Cela permettrait une mesure à  $5 \sigma$  pour  $\sin^2 2\theta_{13} = 0,11$ .

En parallèle à ces activités dans T2K, le groupe a assuré la coordination du *work package* Super faisceau dans le projet européen Euronu. Cette activité de simulation et d'optimisation des faisceaux de neutrinos pour les projets futurs va continuer dans le projet Laguna-LBNO. Nous avons aussi démarré une R&D pour une TPC à argon liquide double phase. Nous avons ainsi démontré qu'un détecteur micromegas pouvait être utilisé dans ce contexte difficile (cryogénie, ultra-pureté) pour la lecture des charges avec amplification dans l'argon pur. ■



Premier résultat de T2K pour  $\sin^2 2\theta_{13}$ . Niveaux de confiance à 68 et 90 % pour  $\sin^2 2\theta_{13}$  en fonction de la phase  $\delta$  de violation de CP pour la hiérarchie normale (haut) et inversée (bas).

Marco Zito, Olivier Bésida, Sandrine Emery, Edoardo Mazzucato, Georges Vasseur

# DOUBLE CHOOZ

*Le neutrino est une particule élémentaire interagissant très faiblement avec la matière qui existe sous trois espèces différentes bien établies. Ils ont la faculté de se métamorphoser d'une espèce dans une autre et trois paramètres*

*caractérisent ce phénomène d'oscillation. Deux de ces paramètres ont déjà été mesurés par les expériences antérieures. Le troisième n'a qu'une limite supérieure, due à la première expérience Chooz. Sa mesure est cruciale, d'une part pour améliorer le modèle standard de la physique des particules, et d'autre part pour comprendre l'origine de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers. Une quatrième espèce de neutrinos pourrait aussi venir compléter le bestiaire des particules...*



Enceinte supportant les tubes photomultiplicateurs.

## Double Chooz en quête des oscillations de neutrinos

Les neutrinos sont produits abondamment au cœur des centrales nucléaires. L'objectif de l'expérience Double Chooz est d'étudier les oscillations de neutrinos à l'aide de deux détecteurs identiques de neutrinos, situés à 400 m et 1 km des cœurs nucléaires de la centrale de Chooz. L'expérience implique 150 physiciens et techniciens de huit nationalités différentes (Allemagne, Brésil, Espagne, Etats-Unis, France, Japon, Royaume-Uni et Russie). La coordination et le pilotage de l'expérience sont assurés par les équipes françaises du CEA et du CNRS. Le groupe de l'Ifnu a joué un rôle majeur dans la formation et le pilotage du projet ainsi que dans la conception, la réalisation et l'intégration du détecteur. La construction du détecteur situé à 1 km a débuté en 2008, celle du détecteur proche débutera en 2013.



Vue aérienne du site de l'expérience Double Chooz dans les Ardennes. On y voit les deux cœurs de la centrale nucléaire ainsi que les deux détecteurs de neutrinos contenant chacun 250 m<sup>3</sup> d'huile et de liquides scintillants, à 400 m et 1000 m des cœurs.

Le groupe du SPP a notamment été impliqué dans la conception, le façonnage, et l'intégration des enceintes acryliques (Prix Midest 2009) et des enceintes mécaniques supportant l'ensemble des tubes photomultiplicateurs. Le groupe a aussi participé à la réalisation d'un système de déploiement de sources de calibration, ainsi qu'à la détermination du nombre de protons du volume de détection avec une précision meilleure que 0,3%. De plus, une contribution importante du SPP a été apportée autour des liquides de détection, que ce soit pour qualifier la compatibilité du liquide de la cible avec les matériaux utilisés, caractériser et tester la stabilité des liquides scintillants dopé au gadolinium, ou bien encore aider à la conception d'un système de remplissage des quatre volumes, ainsi qu'un système de thermalisation du détecteur. Par ailleurs le groupe du SPP a été un acteur majeur de son maintien à un niveau de propreté de type salle blanche du laboratoire satisfaisant tout au long du montage.

Fin 2010, la collaboration Double Chooz a achevé la construction du détecteur lointain et commencé à prendre des données. Fin 2011, la collaboration a publié la première observation d'une disparition

d'antineutrinos à 1 km des cœurs, menant à une valeur d'angle de mélange  $\sin^2(2\theta_{13}) = 0,086 \pm 0,051$ . Ces résultats apportent une nouvelle preuve de l'oscillation des neutrinos et la première indication d'une valeur non nulle pour  $\theta_{13}$ . Le groupe du SPP a coordonné l'analyse des données pour l'ensemble de la collaboration.

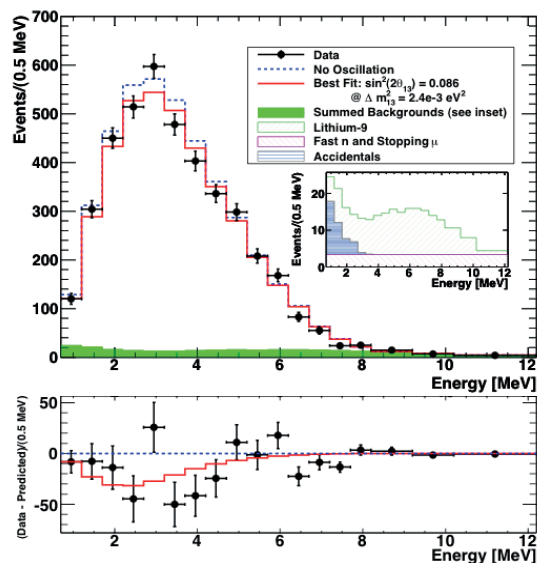
En 2013, le second détecteur situé à 400 mètres des réacteurs démarrera ses prises des données. Il permettra d'améliorer la précision des mesures et de cerner définitivement la valeur de  $\theta_{13}$ .

**Midest :** Le MIDEST est le premier salon international de la sous-traitance industrielle. Ce salon est un point de rencontre de référence des industries. Les Trophées MIDEST ont pour but de valoriser la sous-traitance industrielle et de permettre aux professionnels de découvrir des exposants aux performances et aux atouts hors du commun. NOVAPLEST et sa filiale NEOTEC sont lauréats du trophée MIDEST 2009 dans la catégorie "Réalizations exemplaires" pour la fabrication des enceintes acryliques de Double Chooz, conçues par l'Irfu avec la participation de physiciens du SPP.

## Un médaillé du CNRS à l'Irfu

Le 14 avril 2009, Thierry Lasserre a reçu la médaille de bronze du CNRS de la main de nouveau directeur de l'In2p3, Jacques Martino. Depuis 1954, le CNRS attribue chaque année trois médailles à des chercheurs de renom ou à de jeunes scientifiques prometteurs. Celle de bronze récompense le premier travail d'un chercheur, qui fait de lui un spécialiste prometteur dans son domaine. Celui de Thierry Lasserre concerne la particule de matière la plus abondante de l'Univers : le neutrino. ■

Thierry Lasserre, Michel Cribier, Maximilien Fechner, Guillaume Mention, Jean-Luc Sida



Premiers résultats de l'expérience Double Chooz. (Haut) Spectre en énergie des positons (points noirs) représentant les antineutrinos électroniques. La ligne bleue indique la simulation en l'absence d'oscillation. La ligne rouge donne le meilleur ajustement avec oscillation. La bande verte donne la somme des bruits de fond. (Bas) Rapport (Simulation - Donnée) / Simulation. La ligne rouge indique le signal attendu avec  $\sin^2(2\theta_{13}) = 0,086$ .

# NUCIFER

*Des détecteurs de neutrinos miniatures pourraient surveiller l'activité des réacteurs nucléaires à distance et de manière ininterrompue. Fondé sur les acquis technologiques de Double Chooz, le détecteur Nucifer est un démonstrateur préindustriel de ce concept de 'neutrino-mètre'.*

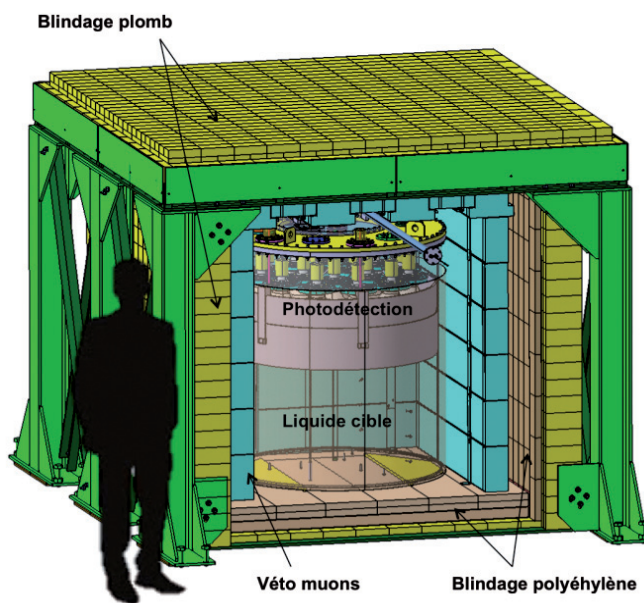


Schéma du détecteur Nucifer.

## Objectif

La détection des neutrinos de réacteurs nucléaires est en passe d'avoir une application sociétale. En 2004, l'Agence Internationale à l'Énergie Atomique (AIEA), en charge de lutter contre la dissémination des matières fissiles dont le plutonium, a demandé aux états membres d'étudier la possibilité de surveillance du combustible des réacteurs nucléaires à l'aide des antineutrinos électroniques (dénommés ici neutrinos).

L'objectif de l'expérience Nucifer est de servir de banc d'essai de cette nouvelle technique de lutte contre la prolifération. Avec la mesure indépendante et ininterrompue de la puissance thermique du réacteur, la détection des neutrinos permet de jauger la production de plutonium du réacteur. Un atout unique en son genre du fait de l'accroissement du flux de neutrinos pour des fissions issues de l'uranium plutôt que du plutonium.

## Le détecteur

Initié par les physiciens du SPP, Nucifer est le fruit d'un partenariat entre différents pôles du CEA (DSM, DAM et DEN) et du CNRS. La conception du détecteur date de 2006 et sa réalisation a débuté en 2008, en étroite collaboration avec le service de physique nucléaire (SPhN), les services techniques de l'Irfu (SEDI, SENAC, SIS) et les laboratoires CEA-DEN-SERMA et IN2P3-Subatech.

Conçu d'après les développements technologiques de l'expérience Double Chooz, le détecteur utilise comme milieu de détection un liquide scintillant dopé au gadolinium. Les neutrinos interagissent dans le liquide cible pour produire un positon et un neutron qui sont

détectés en coïncidence par 16 tubes photomultiplicateurs, sous atmosphère d'azote. Les muons cosmiques sont éliminés par le véto muon. Des blindages en polyéthylène et en plomb permettent de réduire les bruits de fond des neutrons et gammas, respectivement.

L'ensemble du système de détection a été conçu avec un haut niveau de sûreté afin de ne pas augmenter les risques d'incident des installations nucléaires. Les études de sûreté ont prouvé la faisabilité du déploiement auprès du réacteur Osiris du CEA-Saclay, à seulement 7 m du cœur. Ce travail s'est concrétisé par une autorisation formelle de l'Agence de Sûreté Nucléaire (ASN).

Entre 2008 et 2010 un module prototype du détecteur a été construit et testé dans un nouveau laboratoire souterrain à Saclay, réhabilité par les équipes de l'Irfu. Cet environnement, légèrement protégé des rayons cosmiques, a permis de préparer l'ensemble des opérations techniques, de tester l'électronique de lecture et le système d'acquisition et de réaliser les premières calibrations à l'aide de sources lumineuses (LED) et de sources de gammas et de neutrons. Ces tests ont permis de valider les choix expérimentaux de simplification du système de détection tout en conservant la faculté de détecter la coïncidence spatio-temporelle de l'interaction des neutrinos et en maîtrisant les bruits de fond. ■

Thierry Lasserre, Michel Cribier, Guillaume Mention, Jean-Luc Sida



# Quel est le contenu de l'univers ?

- ANTARES ET KM3NET
- ASTRONOMIE GAMMA DE HAUTE ENERGIE
- EDELWEISS
- SUPERNOVAS ET OSCILLATIONS ACOUSTIQUES BARYONIQUES
- PLANCK



*Le lien entre physique subatomique et étude du cosmos trouve son origine dans la découverte du rayonnement cosmique il y a cent ans. L'étude de ce rayonnement fut à l'origine de la découverte des premières particules, aujourd'hui répertoriées dans le cadre du modèle standard. Ce rayonnement fut également le premier signe que le ciel peut être observé autrement qu'avec la lumière visible. Depuis trente ans, l'infiniment petit et l'infiniment grand se sont rejoints dans une nouvelle discipline,*

*l'astrophysique des particules (« particule astrophysics »). Les phénomènes cosmiques de haute énergie y sont étudiés en faisant appel aux technologies développées pour étudier les particules, tandis que les volumes de données accumulées nécessitent des méthodes de traitement similaires à ceux rencontrés dans les expériences auprès des accélérateurs.*

*L'Univers se révèle également être un laboratoire complémentaire pour l'étude de l'infiniment petit, en particulier à travers la recherche de matière noire sous forme de particules, prédites par les extensions du modèle standard et recherchées au LHC. Plus récemment l'énergie noire, dont l'existence est suggérée par l'accélération de l'expansion de l'Univers, a rejoint la liste des questions laissées sans réponse. L'Univers est également un moyen de mettre à l'épreuve la validité des lois fondamentales dans des conditions physiques extrêmes irréalisables sur Terre et sur des distances ou des temps cosmologiques.*

*Le service de physique des particules du CEA participe à plusieurs de ces recherches au sein de collaborations internationales.*

*Dans Antares, les propriétés du neutrino, sa très faible section efficace d'interaction et sa signature inambigüe de l'interaction des noyaux avec la matière, en font un messenger unique pour contribuer à déterminer l'origine des rayons cosmiques.*

*Les particules de la matière noire piégées au cœur des objets astrophysiques massifs pourraient produire par annihilation des gerbes de particules contenant des neutrinos, exploitables par Antares, mais également des rayons gamma, objectif principal du groupe HESS/CTA. Une observation directe de la matière noire est recherchée dans l'expérience Edelweiss, installée au laboratoire souterrain de Modane, qui cherche à observer le recul de noyaux de germanium sous l'impact de wimps.*

*La répartition des supernovas thermonucléaires dans l'Univers, objets de mesure de SNLS, a été le premier indicateur de l'accélération de l'expansion de l'Univers et de la présence d'une composante d'énergie noire. L'étude des oscillations baryoniques acoustiques, conservées dans la distribution de matière actuelle depuis l'époque de la recombinaison (380 000 ans après le big-bang), permet d'aborder la question sous un angle de vue complémentaire, étudié grâce à l'expérience Boss. Enfin, le contenu de l'Univers peut également être étudié en ondes radios millimétriques en construisant un catalogue d'amas de galaxies grâce aux données du satellite Planck, lancé en 2009.*

**Thierry Stolarczyk**



# ANTARES ET KM3NET

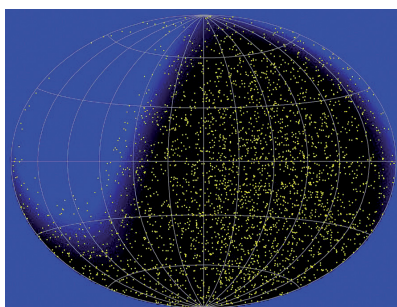
*L'astronomie neutrino contribue à découvrir l'origine du rayonnement cosmique, découvert il y a cent ans. Antares et, dans le futur KM3Net, détectent les neutrinos venant du cosmos, messagers de ce rayonnement.*



*Simulation de l'effet Cherenkov dans un module d'Antares.*

Le rayonnement cosmique est essentiellement constitué de noyaux atomiques observés jusqu'à de très hautes énergies, issus de processus violents dans l'Univers. Le neutrino, produit dans toutes les sources où les noyaux sont accélérés, n'interagit que très peu et s'échappe des cœurs denses des objets cosmiques permettant de mieux les comprendre.

Un télescope à neutrinos est constitué d'un réseau de photomultiplicateurs détectant la lumière Cherenkov produite par les muons traversant un milieu naturel transparent. Les muons montants proviennent de l'interaction de neutrinos muoniques avec l'écorce terrestre. Leur direction reconstruite est celle du neutrino incident en bonne approximation. Les muons produits par l'interaction de rayons cosmiques dans l'atmosphère (muons atmosphériques) ou par l'interaction de neutrinos présents dans ces mêmes gerbes (neutrinos atmosphériques) sont des bruits de fond pour l'expérience. Les neutrinos atmosphériques sont indiscernables du signal recherché mais leur proportion décroît avec l'énergie. Les télescopes sont installés à une grande profondeur pour diminuer le flux de muons atmosphériques jusqu'à un niveau acceptable.



*Représentation sur la voûte céleste des directions d'arrivée des 3085 muons détectés de 2007 à 2010 par Antares.*

## Antares

Antares est un télescope à neutrinos constitué de 12 lignes souples de 450 m de haut, espacées de 65 m, ancrées à 2475 m de profondeur, couvrant une surface de 30.000 m<sup>2</sup>. Elles sont chacune équipées de 25 étages distants de 14,5 m, comportant trois photomultiplica-

teurs. Les lignes sont maintenues verticales grâce à une bouée. Elles sont reliées grâce à un câble de 40 km à la Seyne-sur-Mer (Var).

Le détecteur a été déployé entre 2006 et 2008. L'Irfu a construit la moitié des lignes et a assuré la coordination technique de l'expérience.

Avec les données prises entre 2007 et 2009, la recherche d'un excès d'événements à haute énergie a permis de déterminer une limite supérieure sur un flux diffus de neutrinos cosmiques. La recherche d'accumulation d'événements dans les données prises entre 2007 et 2010 a établi les limites les plus contraignantes à ce jour sur des sources de neutrinos cosmiques dans la Galaxie. Des limites ont également pu être déterminées sur l'existence de monopoles magnétiques et de « nucléarites », des particules très massives composées de quarks étranges, ainsi que sur l'accumulation de wimps au centre du Soleil.

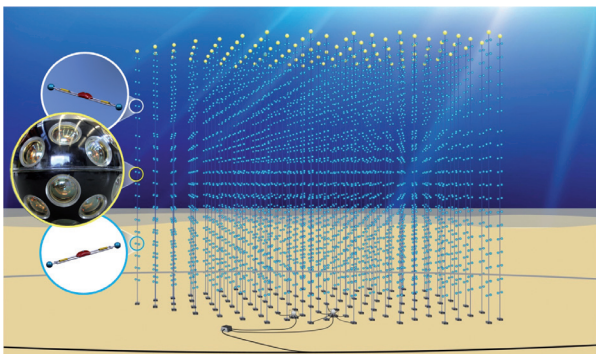
Les physiciens de l'Irfu ont participé à la compréhension, à l'étalonnage, à l'amélioration du comportement du détecteur et à la maîtrise de la prise de données, et ont étudié en détail la stabilité des photomultiplicateurs soumis à de très fortes illuminations, correspondant aux périodes de fortes bioluminescences. Ils ont participé à la mise en place du système d'envoi d'alertes vers un réseau de télescopes optiques rapides pour corrélérer des événements énergétiques avec d'éventuels sursauts gamma.

Les physiciens ont également été impliqués dans l'analyse des données (estimation de l'énergie des muons, coordination et développement des algorithmes

de reconstruction, coordination du développement des outils d'analyse). Le groupe a participé à l'analyse des premières données au travers de deux thèses soutenues en 2009. Un physicien du groupe a présidé le comité de publication de l'expérience jusqu'en 2010.

## KM3NeT

L'astronomie neutrino ne pourra réellement prendre son essor qu'avec des volumes instrumentés de l'ordre du km<sup>3</sup>, 50 fois plus importants qu'Antares.



Vue d'artiste du futur détecteur KM3NeT. Les modules optiques sont des sphères de verre qui protègent de l'eau et de la pression 31 photomultiplicateurs et la totalité de l'électronique de lecture.

Le groupe s'est donc engagé dans la conception d'un futur détecteur en Méditerranée, conduite par le consortium KM3NeT regroupant les efforts des collaborations Antares (Toulon), Nemo (Sicile) et Nestor (Péloponnèse). Le consortium KM3NeT a été financé dans une phase « *design study* » (KM3NeT-DS) de 2006 à 2009 et une phase préparatoire (KM3NeT-PP) de 2008 à début 2012.

Dans KM3NeT-DS, le groupe a participé aux études de physique, en collaboration avec le service d'astrophysique, des études sur l'électronique frontale, et la gestion des données du futur détecteur. Il a coordonné les activités intitulées « *System and product engineering* ». En 2009, cette phase s'est conclue par la publication d'un rapport de définitions techniques, incluant, entre autres, un nouveau dessin très inspiré d'Antares, dû à l'équipe de l'Irfu. Le rapport conclut à la possibilité d'instrumenter un volume de 5 km<sup>3</sup> avec 300 unités de détection séparées de 180 m, comportant 20 étages séparés de 40 m, pour un budget de 250 M€.

En parallèle, à partir de 2008, la phase KM3NeT-PP a démarré. Elle vise à établir les dossiers techniques, physiques, d'implantation et de gouvernance. Le groupe assure la co-coordination du groupe de travail « *Strategic issues and international networking* » (configuration optimale du détecteur vis-à-vis des performances scientifiques. Il est également l'un des coordinateurs du groupe de travail chargé de définir les futures unités de détection, de produire les prototypes nécessaires et de planifier la future production. Un prototype de plusieurs étages équipé de modules optiques est en cours de construction, dans le but d'être connecté à la côte en 2012. Dans ce groupe de travail, l'Irfu a la responsabilité de la chaîne d'acquisition et de l'électronique en mer, intégrée au module optique. ■

Thierry Stolarczyk, Sotiris Loucatos, Luciano Moscoso, Jean-Pierre Schuller, Fabian Schüssler, Bertrand Vallage, Pascal Vernin

# ASTRONOMIE GAMMA DE HAUTE ENERGIE

*La génération actuelle des télescopes Cherenkov au sol tels que HESS vient d'ouvrir le domaine de l'astronomie gamma au-dessus de quelques dizaines de GeV. Le projet européen suivant, CTA, permettra quant à lui d'explorer en profondeur notre univers pour observer les sources astronomiques émettrices de gamma dont certaines impliquent l'existence d'une nouvelle physique et d'objets « sombres ».*



Télescope de l'expérience HESS.

## HESS (high energy stereoscopic system)

Des particules de matière noire non-baryonique interagissant faiblement avec la matière ordinaire peuvent s'annihiler en particules du modèle standard dans les régions denses de l'Univers. Les candidats les plus populaires à la matière noire sont les wimps tels le neutralino en supersymétrie ou la particule de Kaluza-Klein la plus légère dans les modèles à dimensions supplémentaires. Parmi les produits d'annihilation se trouvent les neutrinos, les rayons cosmiques chargés et les photons que l'on veut étudier avec le télescope HESS actuellement en fonctionnement en Namibie et le futur télescope CTA.

La recherche de photons de hautes énergies avec le réseau de télescopes Cherenkov au sol HESS a été menée sur les cibles astrophysiques déjà étudiées à d'autres longueurs d'ondes, ainsi que dans le cadre de recherches aveugles pour lesquelles la position des objets n'était pas connue *a priori*. Les recherches ciblées se sont concentrées vers les galaxies naines satellites de la Voie Lactée (Sagittarius, Canis Major, Sculptor et Carina) et les amas globulaires galactiques NGC 6388 et M 15. L'analyse des données a permis d'obtenir des contraintes robustes sur la section efficace d'annihilation de la matière noire dans la plage en masse du TeV. Les recherches vers les trous noirs de masses intermédiaires et les sous halos de matière noire peuplant le halo galactique ont permis d'obtenir les premières contraintes au TeV avec les études à grand champ de vue.

L'Irfu a participé à la réalisation de l'électronique du grand télescope de 28 mètres de diamètre qui doit être installé au centre du réseau de télescope HESS. Ce réseau possède pour l'instant quatre télescopes de 12 mètres de diamètre. Les contributions de l'Irfu sont d'une part la conception de la mémoire analogique SAM (*swift analogue memory*) utilisée sur la carte d'électronique frontale, d'autre part la conception et la réalisation de la carte de déclenchement de niveau 2. La carte de déclenchement de niveau 2 permet d'apporter un rejet supplémentaire du fond « ciel » et des muons isolés à basse énergie, entre 20 GeV et 50 GeV. En effet, les événements de basse énergie ne déclenchent que le grand télescope et l'observation stéréoscopique ne peut pas être utilisée pour réduire le fond. La prise de données sur le grand télescope de HESS doit débuter courant 2012. Le groupe de l'Irfu participe au groupe de travail sur l'astroparticule. Les principaux thèmes étudiés sont la recherche de la matière noire et l'étude de la région du centre galactique. En particulier, l'étude de la région du centre galactique a permis de mettre en évidence une cassure dans le spectre de la source centrale HESS J1745-290. Cette cassure est un important indice pour la nature de l'émission de HESS J1745-290, qui pourrait être associée au trou noir central de notre galaxie Sgr A\*.

## CTA

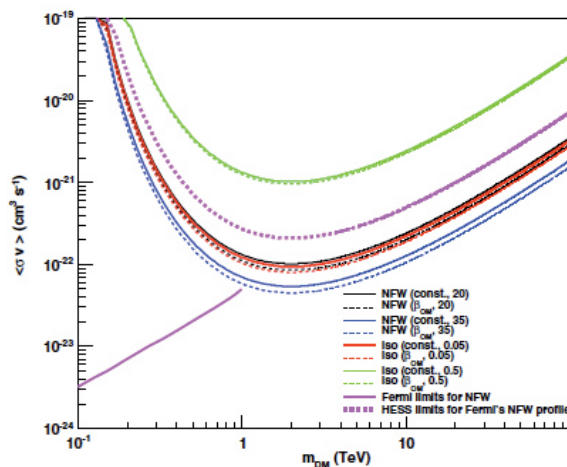
Le projet européen CTA (*Cherenkov telescope array*) prévoit de bâtir deux réseaux d'une cinquantaine de télescopes gamma, l'un dans l'hémisphère Nord et l'autre dans l'hémisphère Sud. Le projet a débuté par une phase de *design study* en 2008, puis est passé en phase préparatoire du FP7 en 2010. Le groupe de l'Irfu est impliqué depuis 2008 dans des activités de recherche et développement en électronique, sur la mécanique des télescopes et sur la fabrication de miroirs.

L'activité de recherche et développement en électronique se situe dans la continuité des contributions de l'Irfu à HESS et HESS2. L'Irfu est porteur du projet ANR Nectar (2009-2011), dans lequel il est associé aux laboratoires LPNHE (Paris) et LUPM (Montpellier). Le but de Nectar est de construire un module de caméra pour l'astronomie gamma des hautes énergies. Ce module améliore les modules correspondants de HESS et HESS2. L'Irfu a également développé une puce spécifique pour Nectar. Cette puce incorpore à la fois une fonctionnalité de mémoire analogique similaire à celle du SAM (HESS2) et une fonctionnalité de conversion analogue-digitale. L'intégration de plusieurs fonctions à l'intérieur d'une même puce permettra de diminuer les coûts.

Le développement de miroirs pour CTA a débuté à l'Irfu en 2008. L'objectif est de concevoir des miroirs adaptés pour équiper une partie significative des 10.000 à 15.000 m<sup>2</sup> de miroirs des télescopes du réseau CTA. Les miroirs doivent donc présenter de bonnes caractéristiques optiques, définies par le consortium. Ils doivent également être économiques, durables et leur conception doit être adaptée à la production en série.

Le concept des miroirs développés à l'Irfu s'appuie sur la réplification d'une pièce moulée par un substrat de nid d'abeille en aluminium et de fibre de verre. Sur celui-ci sont ajoutées des feuilles de verre destinées à recevoir la métallisation permettant d'obtenir une bonne réflectivité de la surface. Différents tests sont menés à Saclay et dans les laboratoires partenaires de CTA (Desy Zeuthen, ECAP et OSMIN Erlangen en particulier). Une partie des miroirs de l'Irfu sera installée sur le prototype de télescope de moyenne taille en cours de réalisation à Zeuthen. Pour ce prototype, la partie tenant la caméra, dite quadripode, a été dessinée à l'Irfu, qui en a la maîtrise d'œuvre. ■

Jean-François Glicenstein, Pierre Brun, Emmanuel Moulin, Bernard Peyaud



Contraintes obtenues par HESS sur la section efficace d'annihilation de la matière noire en fonction de sa masse en direction de la galaxie naine Sculptor. Différents halos de matière noire sont considérés. Avec les limites obtenues par le satellite Fermi et HESS, l'espace des paramètres est continuellement restreint sur plus de deux décades en masses.

# EDELWEISS

*La nature de la matière noire est l'une des questions majeures de la cosmologie moderne. Cette matière noire pourrait être constituée de nouvelles particules élémentaires, massives et insensibles à l'interaction forte : les wimps. Cachée dans le laboratoire souterrain de Modane, l'expérience Edelweiss tente une observation directe de ces particules grâce au développement de détecteurs innovants.*



Le détecteur Edelweiss.

Les observations astronomiques et cosmologiques ont mis en évidence l'existence d'une matière sombre non baryonique, constituée probablement de particules nouvelles par rapport au modèle standard de la physique des particules. Parmi les candidats proposés par les théoriciens, les *weakly interacting massive particles* (wimp) sont des particules associées à une nouvelle physique, de masse typique 100 GeV et couplées au noyau par interaction faible. Ils sont l'objet des recherches les plus actives. En particulier les expériences de détection directe visent à mesurer le recul nucléaire produit par diffusion d'un wimp du halo de la Voie Lactée sur un noyau-cible.

## Principe de l'expérience

Les wimps du halo galactique ont une vitesse d'environ 220 km/s. Leur taux d'interaction avec la matière est très faible (moins d'une interaction par kg et par jour) et chaque interaction génère un recul nucléaire de faible énergie (quelques dizaines de keV). Pour les observer, il faut donc disposer d'un détecteur avec une masse-cible élevée, d'un seuil de détection en énergie très bas et de la capacité de discriminer les reculs nucléaires par rapport aux reculs électroniques, qui constituent l'essentiel des bruits de fonds radioactifs.

La collaboration Edelweiss (Expérience pour détecter les wimps en site souterrain) regroupe des laboratoires du CNRS, le CEA, ainsi que des laboratoires allemand, russe et anglais qui ont rejoint l'expérience plus récemment. Les détecteurs développés spécialement par la collaboration sont des bolomètres massifs mesurant deux paramètres. Le premier est l'élévation de température induite dans le cristal de germanium

par l'interaction. Cela est possible en refroidissant le détecteur à quelques dizaines de millikelvins dans un cryostat à dilution. Le second est constitué par les charges générées par chaque interaction, collectées par les électrodes déposées sur le cristal. Pour chaque événement, la mesure du rendement d'ionisation est donc possible et elle permet de discriminer les reculs nucléaires dus aux wimps de la radioactivité gamma.

Implantée au laboratoire souterrain de Modane pour diminuer la contribution des fonds venant du rayonnement cosmique, l'expérience Edelweiss-II dispose, depuis 2006, d'un grand cryostat à dilution de volume interne de 50 litres permettant d'accueillir plusieurs dizaines de détecteurs. Avec un ensemble de blindages de plomb et de polyéthylène, ainsi qu'une couverture de scintillateurs qui permet d'identifier les quelques muons résiduels du rayonnement cosmique, le bruit de fond radioactif atteignant les détecteurs est remarquablement faible. Cet ensemble est adapté pour atteindre des sensibilités à la section efficace wimp-nucléon de l'ordre de  $10^{-8}$ - $10^{-9}$  pb.

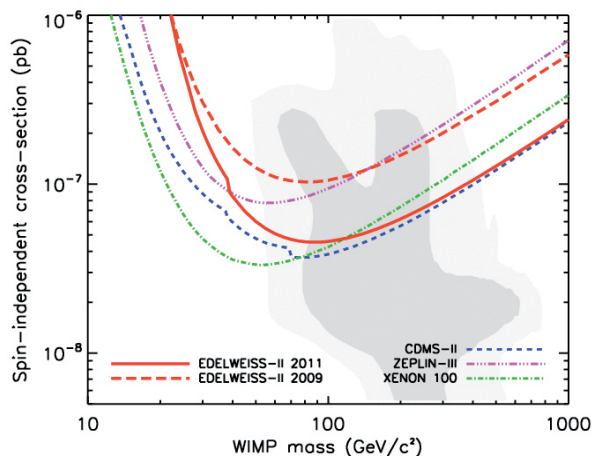
## Les détecteurs InterDigit : du prototype à la recherche de wimps

Depuis 2007 ont été développés des bolomètres chaleur-ionisation avec des électrodes segmentées, en forme d'anneaux. Ces bolomètres dits « InterDigit » ou ID permettent non seulement de rejeter la radioactivité gamma comme leurs prédécesseurs, mais aussi de rejeter les interactions ayant lieu près de la surface du détecteur. Ces interactions, dues typiquement à la

radioactivité beta, induisent une diminution du signal d'ionisation mal contrôlée et constituent un bruit de fond qui limitait les performances des détecteurs à électrode pleine. Le passage de la R&D à l'utilisation pour la physique a été exemplaire, puisque les ID ont été validés en site souterrain dès 2008, puis dix détecteurs ID de 400 grammes ont été utilisés pour une recherche de wimps durant 14 mois en 2009 et 2010. Les résultats de cette recherche de wimps, publiés en 2011, ont permis d'exclure une section efficace wimp-nucléon de  $4 \times 10^{-8}$  pb pour des wimps de masse 85 GeV, plaçant l'expérience dans le peloton de tête mondial. Les sensibilités équivalentes obtenues par l'expérience américaine CDMS (cryogenic dark matter search) et Edelweiss ont conduit ces deux collaborations à combiner leurs données pour ainsi obtenir de meilleures contraintes sur les paramètres des wimps.



Contraintes obtenues par Hess sur la section efficace d'annihilation de la matière noire en fonction de sa masse en direction de la galaxie naine Sculptor. Différents halos de matière noire sont considérés. Avec les limites obtenues par le satellite Fermi et Hess, l'espace des paramètres est continument restreint sur plus de deux décades en masses.



Limites sur l'interaction WIMP-noyau, obtenues par EDELWEISS-II avec les détecteurs ID entre 2009 et 2011, comparées aux autres expériences les plus sensibles.

L'aventure continue puisqu'une version améliorée du détecteur ID a été développée. Ces bolomètres « Full InterDigit » ou FID ont une masse fiducielle quatre fois plus grande et de meilleures performances en termes de réjection du fond gamma. Le projet Edelweiss-III, en cours en 2011-2012, vise à déployer une quarantaine de ces détecteurs dans l'installation de Modane afin d'atteindre une sensibilité de quelques  $10^{-9}$  pb sur la section efficace d'interaction des wimps. Visant le plus long terme, d'autres travaux préparatoires ont été menés pour définir le projet européen Eureka de détecteurs bolométriques à l'échelle de la tonne, également en collaboration avec la collaboration SuperCDMS.

L'implication de l'Irfu et en particulier du SPP dans les projets Edelweiss est majeure, au niveau de la coordination scientifique, de la fabrication des détecteurs, de l'électronique, de l'acquisition et de l'analyse des données. ■

Gilles Gerbier, Eric Armangaud, Olivier Bésida, Claudia Nones

# SUPERNOVAS ET OSCILLATIONS ACOUSTIQUES BARYONIQUES

En 1998, les premières mesures de supernovas de type Ia lointaines révélèrent contre toute attente que l'expansion de l'Univers était en accélération. La raison de cette accélération, appelée énergie noire, demeure inconnue. Mais son existence est confirmée par les recherches en cours, comme celles du Supernova legacy survey (SNLS) auquel l'Irfu a contribué pour l'imageur et l'analyse de données. Depuis 2007, l'Irfu s'est tourné vers l'étude des oscillations acoustiques baryoniques en s'engageant dans l'expérience Boss (Baryon oscillation spectroscopic survey) et dans les projets BAO-radio et BigBoss.



Restes de supernova.

## SNLS

De 2003 à 2008, SNLS a détecté un millier de supernovas (SN) distantes de type Ia auprès du télescope Canada-France-Hawaii, dont la moitié a bénéficié de mesures spectrales sur des télescopes partenaires pour confirmer leur type et déterminer leur décalage spectral. A partir des mesures de flux réalisées par l'imageur grand champ Megacam (construit à l'Irfu), SNLS a déterminé les distances de ces SN puis comparé distances et décalage spectraux pour tester les lois de l'Univers, notamment son expansion.

L'analyse des données 2003/06 a confirmé l'accélération de cette expansion à plus de 99,9% de niveau de confiance à l'aide des seules SN Ia. Ce résultat s'appuie sur la statistique importante recueillie par SNLS, sur un travail approfondi de modélisation de la luminosité des SN Ia et sur un contrôle poussé des incertitudes de mesure, sans précédent dans ce domaine. SNLS

arrive ainsi à mesurer à quelques pourcents près des distances de plusieurs milliards d'années-lumière.

L'accélération de l'expansion de l'Univers reste inconnue. Elle peut s'expliquer par une simple constante (dite constante cosmologique) ajoutée aux équations de la relativité générale ou par un scénario plus complexe modifiant la gravité à grandes distances. Ces hypothèses peuvent être testées en combinant les résultats de SNLS et les autres mesures cosmologiques.

Il en ressort que les mesures actuelles sont compatibles à la fois avec l'hypothèse d'une constante cosmologique ( $w_0=-1$  et  $w_a=0$ ) et avec d'autres scénarios.

Dans SNLS, l'Irfu explore une méthode de sélection des SN originale, dite photométrique, car reposant sur la seule mesure du flux des SN au cours du temps. Cette voie sera la seule possible pour les projets futurs dont les centaines de milliers de SN ne pourront être observées en spectroscopie par manque de temps. SNLS

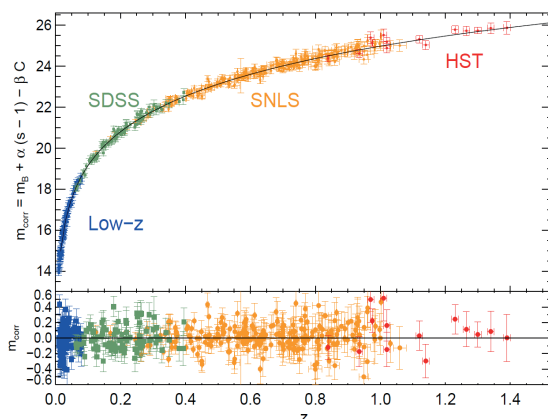


Diagramme comparant la magnitude apparente des SN Ia ( $m_{corr}$ ) à leur décalage spectral ( $z$ ). Les données de SNLS sont combinées avec les données des meilleures expériences de SN. La relation distance-décalage spectral déduite de ce diagramme indique sans ambiguïté une accélération de l'expansion de l'Univers.

offre le meilleur échantillon de données pour tester ce genre de sélection. Appliquée aux données 2003/06, l'analyse de l'Irfu a permis d'enrichir de 50% le lot de SN Ia confirmées. Plusieurs sujets ont été abordés grâce à cet échantillon, notamment un algorithme de reconstruction photométrique du décalage spectral des SN Ia ou la mesure de l'incomplétude à haut décalage spectral du lot de SN utilisé par SNLS pour les mesures cosmologiques.

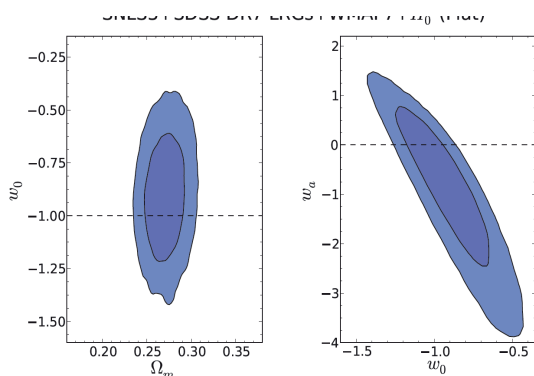


Diagramme combinant différentes mesures cosmologiques (SNLS3: SN Ia, SDSS: distribution des galaxies, WMap: fond diffus cosmologique,  $H_0$ : mesure de la constante de Hubble) pour un Univers plat fait de matière (de densité d'énergie  $\Omega_m$ ) et d'énergie noire (décrite par un rapport densité sur pression  $w(z)=w_0+w_a z/(1+z)$ ).

## Oscillations baryoniques acoustiques

De manière complémentaire aux SN Ia, les oscillations baryoniques acoustiques (BAO) permettent d'étudier l'énergie noire. En effet, les ondes qui se propageaient dans l'univers primordial ont été gelées à la recombinaison. Elles restent gravées dans la distribution de matière observée de nos jours, définissant une échelle caractéristique. Celle-ci a été mesurée pour la première fois en 2005 par le Sloan Digital Sky Survey (SDSS), dans la distribution de 50000 galaxies rouges très lumineuses (LRG).

Depuis 2008, l'Irfu participe à l'expérience Boss, l'un des quatre relevés du programme SDSS-III. Boss comporte deux volets, l'un portant sur les galaxies et l'autre sur les forêts Ly- $\alpha$  de quasars. Le premier réalise une carte 3D des LRG : la position dans le ciel est donnée par l'imagerie photométrique tandis que la troisième coordonnée est déduite du décalage spectral mesuré par spectroscopie. Au final plus de 1,5 millions de spectres de LRG seront mesurés. Dans la deuxième méthode, on construit une carte 3D de l'hydrogène neutre contenu dans le milieu intergalactique. On l'obtient grâce aux raies d'absorption Ly- $\alpha$  de l'hydrogène le long de la ligne de visée de plus de 150 000 quasars. Cette approche

novatrice permettra, pour la première fois, de mesurer l'échelle BAO à plus de 10 milliards d'années de notre ère.

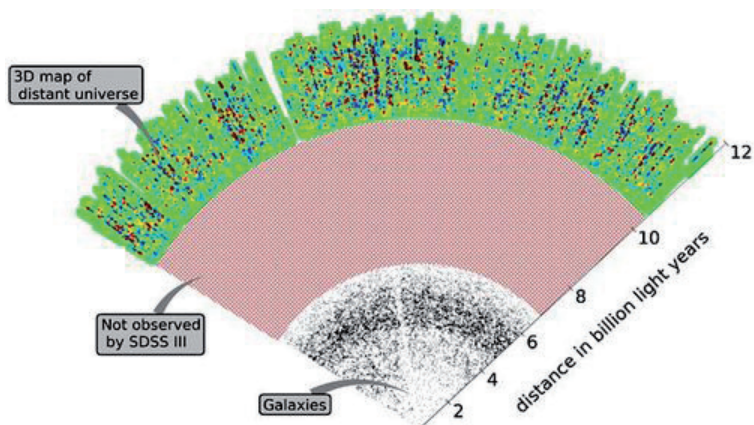
Le groupe de l'Irfu travaille sur la sélection des quasars en utilisant des réseaux de neurones qui distinguent les quasars des étoiles à partir de leurs couleurs et de leur variabilité. Une fois que la nature des quasars est confirmée grâce à leur spectre, nous réalisons deux types d'analyse. La première mesure la fonction de corrélation des forêts Ly- $\alpha$  à 3D des paires de quasars, qui permet la mesure de l'échelle BAO. Cette méthode a été validée avec les 15000 premiers quasars observés en 2010. La deuxième analyse étudie l'absorption de l'hydrogène à 1D, le long de la ligne de visée des quasars, pour des échelles de l'ordre du Mpc, ce qui donne une mesure indirecte de la masse des neutrinos.

En parallèle, l'Irfu prépare l'avenir avec deux projets :

Le premier, **BigBoss**, reprend le concept de Boss mais sur un télescope de 4m (Kitt Peak, Arizona), capable de mesurer simultanément 5000 spectres avec un système entièrement automatisé pour positionner les fibres. Pour ce projet, l'Irfu participe à l'élaboration des méthodes de sélection des quasars et développe un nouveau type de caméra.

Le deuxième, **BAO-radio**, propose un nouveau concept pour effectuer un relevé 3D des galaxies identifiées en radio par la raie d'émission à 21cm de l'hydrogène neutre. En plus d'une activité de simulation et d'optimisation du design du télescope, l'Irfu, en collaboration avec le LAL, a conçu une électronique de numérisation à 500 MHz qui traite au vol les signaux radio. Cette électronique a été mise en œuvre avec succès au radiotélescope de Nançay et sur un prototype du télescope final à Pittsburgh. ■

Nathalie Palanque-Delabrouille, Christophe Yèche, Eric Aubourg, Jean-Marc Le Goff, Christophe Magneville, James Rich, Vanina Ruhlmann-Kleider



Tranche d'univers observée par Boss. La carte jusqu'à 7 milliards d'années-lumière est obtenue avec des galaxies rouges très lumineuses. Au-delà de 10, la matière est tracée par l'absorption de l'hydrogène neutre le long de la ligne de visée de quasars.



# PLANCK

*Le satellite Planck, lancé en mai 2009, observe le ciel aux longueurs d'onde millimétriques. Un des objectifs de la mission est la construction d'un catalogue d'amas qui permettra d'étudier les propriétés de la matière et de l'énergie sombre de l'Univers indépendamment du fond diffus cosmologique, des supernovas ou des oscillations acoustiques baryoniques.*

L'objectif principal de la mission Planck est l'observation détaillée du fond diffus cosmologique (ou CMB pour Cosmic Microwave Background). L'étude de ses propriétés statistiques permet de mesurer précisément le contenu en matière et énergie de l'Univers. Mais les cartes Planck contiennent aussi de nombreux amas de galaxies. L'effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ) permet la détection de centaines de ces objets sur l'ensemble du ciel avec Planck. L'étude des comptages d'amas en fonction de leur distance est une méthode d'observation de l'univers « récent », qui permet, indépendamment du CMB, de remonter aux composants fondamentaux de l'Univers. C'est dans cette exploitation scientifique des catalogues d'amas de galaxies que le groupe cosmologie millimétrique du SPP s'est engagé dès 2002.

## Préparation de la mission

Mais l'implication du groupe dans l'expérience Planck a débuté en 1997 avec la préparation en amont des premiers outils d'analyse. En 2002 s'y est ajoutée une participation à la conception de l'architecture électrique et électronique du satellite, ainsi que la responsabilité d'optimiser la lecture des bolomètres de l'instrument haute fréquence HFI. En parallèle, le démarrage de l'analyse scientifique sur les amas a débuté en 2002 à 2005. A partir de 2006, le groupe a perfectionné ses outils d'analyses et a porté, au sein de Planck, les études de comparaison d'algorithmes d'extraction d'amas tout en renforçant ses liens avec les autres laboratoires spécialisés dans la physique des amas. Sur la même période, le groupe a participé à la finalisation de l'instrument.



Lancement du satellite Planck.

## Lancement et premières données

Planck a été lancé le 14 mai 2009 avec succès et a commencé ses observations au mois d'août. La mission initialement prévue pour 14 mois, vient de s'achever, après 30 mois de fonctionnement irréprochable de l'instrument HFI. L'instrument basse fréquence, n'utilisant pas de fluides cryogéniques, continue à prendre des données. Le groupe cosmologie millimétrique a participé à l'extraction des premiers amas et aux premières analyses scientifiques sur la physique des amas de galaxies. Ces résultats, publiés début 2011, ont permis en particulier de comparer les propriétés millimétriques (SZ), X et optiques des amas.

## L'aventure continue

Le groupe travaille actuellement à une nouvelle série de publications sur la physique des amas prévue pour début 2012, études nécessaires à la maîtrise des erreurs systématiques pour les analyses cosmologiques. En parallèle, le groupe participe aussi à la construction du catalogue final d'amas de galaxies ainsi qu'aux papiers scientifiques liés mesurant le contenu en matière et énergie de l'Univers. Ces publications sont prévues pour début 2013. ■

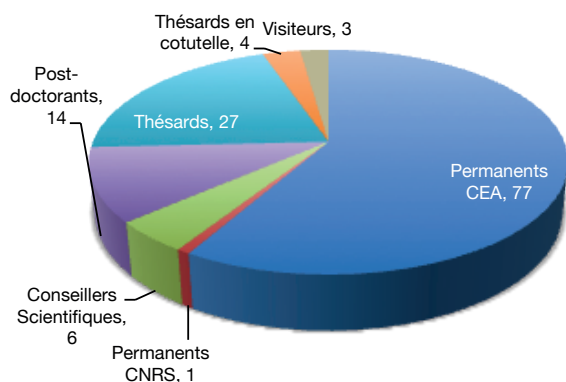
Dominique Yvon, Jean-Baptiste Melin

# Le SPP

*Le service de physique des particules fait partie de l'Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers, Irfu, de la Direction des Sciences de la Matière (DSM) du CEA, le commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Ses activités se font en étroite collaboration avec les services techniques (Service des Accélérateurs, de Cryogénie et de Magnétisme – SACM ; Service d'Electronique des Détecteurs et d'Informatique – SEDI ; Service d'Ingénierie des Systèmes – SIS) ainsi qu'avec les autres services de physique de l'Irfu (Service d'Astrophysique – SAp ; Service de Physique Nucléaire – SPhN).*

## Personnel

En 2010, le service de physique des particules comprend 77 permanents CEA, dont 74 physiciens et 3 secrétaires, et 1 physicien du CNRS. Parmi ces physiciens, 13 sont en mission de longue durée, principalement au CERN. Sur la période 2007-2010, 2 physiciens ont rejoint le service suite à une mutation interne au CEA, 10 physiciens ont été recrutés et 9 physiciens, dont 1 du CNRS, sont partis à la retraite. Parmi les retraités, 3 ont des fonctions de conseiller scientifique. En ce moment, les différents groupes de physique accueillent 14 post-doctorants, majoritairement sur des financements extérieurs, et 31 étudiants en thèse, dont 4 en cotutelle avec une université étrangère.



## Actions internationales

Des programmes internationaux sont en cours pour accroître la visibilité du service et renforcer les collaborations entre instituts. En particulier le programme E=MC2 (Echanges Ministère des affaires étrangères, CEA, CNRS) a permis d'accueillir cinq chercheurs nord-américains sur des expériences LHC, généralement pour une durée d'une année, et dans certains cas d'établir des liens durables. Le service participe

également à deux laboratoires internationaux associés, l'un avec le Japon (FJJPL), l'autre avec la Chine (FCPPL), ce qui a renforcé les collaborations avec ces pays. En plus de cela et grâce à des financements de la direction des relations internationales du CEA, des programmes européens Marie-Curie ou Eurotalents, des bourses Eiffel du ministère de la recherche, les étudiants en thèse et les post-doctorants se sont internationalisés avec 14 étudiants et 15 post-doctorants étrangers sur la période 2007-2010.

## Financements

Le financement principal pour le service provient de la subvention du CEA. Néanmoins, sur la période de 2007 à 2010, la diversification des sources de financement s'est poursuivie. Ainsi le service participe à six programmes européens FP6, deux programmes FP7 et trois programmes ANR pour un apport total de 1,4M€. Il faut également noter des financements de la région et la mise en commun de moyens dans le Groupement d'Intérêt Scientifique « Physique des deux infinis », P2I, avec les autres laboratoires de notre thématique en Ile de France.

## Production scientifique

Les nombres de publications dans des journaux scientifiques et de soutenances de thèses et d'habilitations à diriger des recherches, par année, sont résumés dans le tableau suivant.

	2007	2008	2009	2010
Publications	175	187	156	159
Thèses	1	4	7	6
HDR	1	1	1	3

## Animation scientifique

Le conseil scientifique et technique du service se réunit en moyenne deux fois par an pour examiner les nouveaux projets et suivre les expériences en cours. Les thèmes abordés lors des sessions sur la période 2007-2010 sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Juin	2007	Atlas upgrade, ILC, Edelweiss
Octobre	2007	Atlas, CMS
Février	2008	GBAR, Antares, KM3NeT
Juin	2008	BaBar, Nucifer, HESS, CTA
Décembre	2008	RD51, CTA, BAO
Juin	2009	D0, Cosmologie à l'APC
Mai	2010	GBAR, Edelweiss, Calipso
Octobre	2010	SNLS, BigBoss, Double Beta, Sphère

Directeur de la publication : Ursula Bassler

Coordination technique et rédactionnelle : Jean-Luc Sida,  
Georges Vasseur, Didier Vilanova

Conception et réalisation graphique : Reor

Crédits photos : CEA

Service de physique des particules  
CEA, Irfu, SPP  
Centre de Saclay  
91191 Gif-sur-Yvette Cedex  
Téléphone : +33 (0) 1 69 08 23 50  
Télécopie : +33 (0) 1 69 08 50 13  
<http://irfu.cea.fr/Spp/>

