



ILC : Recherche et Développement pour les détecteurs d'un Collisionneur Linéaire

Pour apporter des réponses décisives sur la brisure de symétrie électrofaible, la supersymétrie, les extra-dimensions et plus généralement sur de nouveaux phénomènes physiques, un collisionneur électron-positron donnant accès au domaine d'énergie du TeV est indispensable. Autour du projet mondial de l'ILC (International Linear Collider), trois concepts de détecteur ont émergé. Au sein du concept SiD (Silicon Detector) nous participons au design et à l'optimisation du calorimètre hadronique. De plus, dans la collaboration CALICE (CALorimetry for a LInear Collider Experiment), nous développons des détecteurs gazeux MICROMEGAS (MICRO MESH GASEOUS STRUCTURE) ainsi que leur électronique de lecture appropriés à un type novateur de calorimètre hadronique. Récemment nos activités se sont étendues aux études d'un détecteur auprès du futur collisionneur linéaire CLIC (Compact Linear Collider) en projet au CERN. Le groupe a aussi rejoint la collaboration RD51 du CERN dans laquelle nous faisons avancer le développement de détecteurs MICROMEGAS de grande surface.

Introduction

Les expériences au LHC ont été optimisées pour découvrir le boson de Higgs ou sa forme en multiplet ; cependant il sera difficile de vérifier qu'il est responsable de la masse des particules et de déterminer son spin et sa parité. Un collisionneur linéaire permettra de répondre à ces questions grâce aux mesures des couplages du Higgs avec les quarks et les bosons vecteurs, dix fois plus précises qu'au LHC. Si le boson de Higgs léger est d'origine supersymétrique, le LHC devrait trouver le signal de ses superpartenaires. Toutefois, la mesure d'un signal supersymétrique au LHC ne permettra pas d'identifier avec certitude si la particule en jeu est un superpartenaire du Higgs ; c'est un collisionneur linéaire qui apportera une réponse sans équivoque. Si des composants de la matière noire existent à l'échelle du TeV, ils pourraient être produits au collisionneur linéaire. Les mesures de leurs propriétés aboutiraient à une compréhension de leur contribution à la matière noire, de l'évolution de l'Univers et d'une possible relation avec des nouveaux principes ou forces de la nature. Aujourd'hui deux projets de collisionneurs linéaires sont à l'étude, l'ILC (International Linear Collider) doté d'une énergie nominale dans le centre de masse de 500 GeV avec montée possible à 1 TeV et le CLIC (Compact Linear Collider) avec une énergie nominale dans le centre de masse de 0,5 à 5 TeV.

Points forts

La structure du calorimètre hadronique dessinée au LAPP est choisie comme référence pour le concept SiD en septembre 2008.

Participation à la lettre d'intention du concept SiD.

Les résultats des tests en faisceau des prototypes MICROMEGAS démontrent leur utilisation en calorimétrie hadronique.

Le LAPP a réalisé les premiers détecteurs MICROMEGAS au monde avec électronique de lecture intégrée.

La carte de lecture numérique développée au LAPP donne les premières données CALICE issues de MICROMEGAS et RPC.

Les collaborations

CALICE

53 instituts, 16 pays de 4 continents (Afrique, Amérique, Asie et Europe), 297 physiciens et ingénieurs.

6 laboratoires français : Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules, Laboratoire de Physique Corpusculaire, Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Institut de Physique Nucléaire de Lyon, Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Laboratoire Leprince-Ringuet.

RD51

60 instituts, 21 pays.

5 laboratoires français : Laboratoire d'Annecy-le-

Vieux de Physique des Particules, Institute Laue-Langevin, Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Institut de Recherches sur les lois Fondamentales de l'Univers.

SiD

50 instituts, 10 pays.

4 laboratoires français : Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, Institut de Recherches sur les lois Fondamentales de l'Univers, Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Energies.

Activités de recherche du groupe du LAPP

Le projet mondial ILC mobilise un effort considérable dans la communauté de la physique des hautes énergies au niveau de la R&D sur les détecteurs, de la simulation et de la compréhension des signaux physiques. Les algorithmes PFA (*Particle Flow Algorithm*), la clef pour accéder aux phénomènes recherchés, requièrent pour les expériences une calorimétrie à imagerie très granulaire située à l'intérieur de l'aimant. Avec environ 3 000 m² de surface et 30 millions de voies électroniques, un calorimètre hadronique muni de détecteurs gazeux MICROMEGAS avec lecture à seuil intégrée est une possibilité séduisante. Le LAPP développe de tels détecteurs MICROMEGAS ainsi que leur système de lecture. La première étape a été de munir ces détecteurs d'une lecture analogique et de les caractériser avec une source radioactive, sous rayons cosmiques et en faisceau. Nous sommes ensuite passés à la lecture à seuil pour aboutir à des détecteurs de 1 m² qui équiperont un prototype de calorimètre de 1 m³. Ce prototype est indispensable pour valider la calorimétrie à

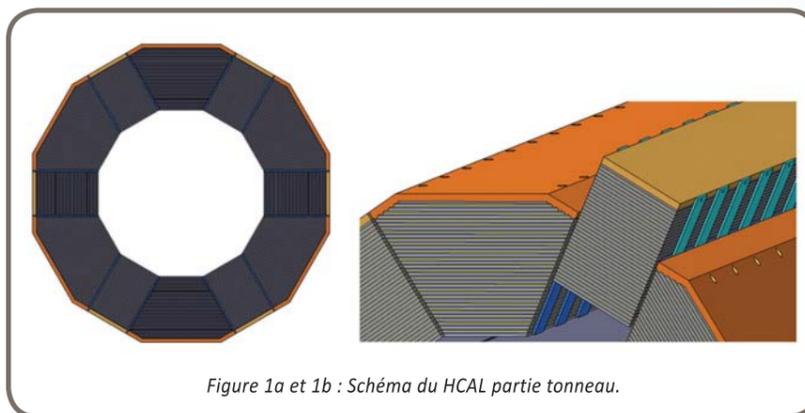


Figure 1a et 1b : Schéma du HCAL partie tonneau.

seuil dans le cadre des algorithmes PFA et pour tester les simulations de ce nouveau genre de calorimètres. C'est pourquoi le groupe s'investit aussi dans la simulation et l'optimisation du prototype de 1 m³ et du calorimètre au sein du concept SiD. Parallèlement, des études sur la structure mécanique d'un tel calorimètre ont été poursuivies au LAPP et aujourd'hui la structure du calorimètre hadronique conçue au LAPP est choisie comme référence pour le concept SiD.

Projets techniques

Etude de la structure du calorimètre hadronique du SiD :

L'étude mécanique d'une structure originale de détecteur hadronique comprend à la fois la conception et les calculs mécaniques de dimensionnement qui y sont associés. Ainsi, nous prévoyons l'utilisation de plaques d'inox pour les absorbeurs du HCAL (*Hadronic CALorimeter*). La longueur de radiation de l'acier inoxydable ($X_0 = 1,8$ cm) et sa longueur d'interaction ($\lambda_i = 16,8$ cm) font de ce matériau l'un des plus intéressants parmi les matériaux classiquement utilisés, compte tenu du faible rapport X_0/λ_i . Pour la partie « tonneau », l'épaisseur totale d'absorbeur est de $4,5 \lambda_i$, répartie sur 40 couches de 18,9 mm d'épaisseur, elles-mêmes séparées par 8 mm : distance permettant l'insertion des parties sensibles aux gerbes de particules.

Les diamètres internes et externes du HCAL de SiD sont respectivement de $R_{int} = 1 419$ mm et $R_{ext} = 2 583$ mm, pour une longueur de 6 036 mm.

La partie « tonneau » du détecteur est divisée en 12 modules. Afin de ne pas avoir de fissures dans le détecteur (c'est-à-dire de zones sans détection par lesquelles les particules pourraient s'échapper sans être vues), les bords de ces modules ne doivent pas être alignés sur le point d'interaction. L'originalité du design réside dans le découpage d'une section transversale du HCAL. En effet avec une segmentation azimutale en 6 modules rectangulaires et 6 modules « pseudo-trapézoïdaux », comme le présentent les Figures 1a et 1b, toutes les particules rencontrent un volume de détection. La Figure 1b esquisse l'idée de

l'assemblage des modules pour former un tonneau.

Finalement, concernant les bouchons du HCAL, les dimensions sont les suivantes : $R_{int} = 206$ mm et $R_{ext} = 1 404$ mm, pour une longueur de 1 222 mm. Dans la même optique que pour le tonneau, nous avons conçu les bouchons de telle sorte qu'il n'y ait aucun bord projectif vis-à-vis du point d'interaction. Pour cela, chaque plan d'absorbeur constituant les deux bouchons est réalisé par l'assemblage de deux parties en forme de C, les parties concaves venant épouser le tube à vide (Figure 1c). Par ailleurs, afin d'éviter la seule fissure possible au niveau de l'interface des pièces en demi-cercle, il est prévu que chaque plaque soit biseautée (Figure 1d).

Ainsi, un design original de HCAL a été proposé par le groupe du LAPP, que ce soit pour la partie tonneau ou bien pour les bouchons, optimisant ainsi l'acceptance du HCAL. Cette proposition a été retenue comme la structure de référence présentée dans la lettre d'intention du projet SiD qui sera prochainement soumise au comité international IDAG (*International Detector Advisory Group*) chargé d'examiner les projets de détecteurs.

Développement du détecteur gazeux MICROMEGAS pour la calorimétrie hadronique à seuil :

Nos prototypes MICROMEGAS consistent en une fine grille de 20 μ m d'épaisseur qui sépare l'espace d'amplification (128 μ m) de l'espace d'ionisation aussi appelé espace de dérive (3 mm). La technologie choisie, nommée *bulk*, fournit un bloc robuste composé du circuit imprimé segmenté en

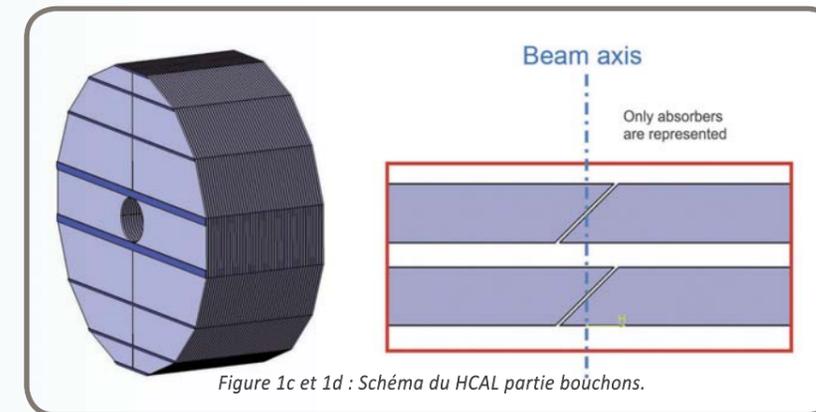


Figure 1c et 1d : Schéma du HCAL partie bouchons.

unités de lecture de 1 cm² et de piliers isolants soutenant la grille (voir Figure 2). Cette structure simple, fonctionnant à des tensions inférieures à 500 V, fournit une excellente homogénéité du gain sur toute la surface, une efficacité totale pour les particules de minimum d'ionisation, un gain stable jusqu'à des taux d'ionisation très élevés et une multiplicité faible. Différents types de chambres MICROMEGAS ont été réalisés au LAPP. Les premières munies d'une lecture analogique pour une surface de 6 x 16 ou 12 x 32 cm² ont été testées rigoureusement avec une source de ⁵⁵Fe, sous rayons cosmiques et en faisceau au CERN. Les chambres suivantes sont munies d'une électronique à seuil intégrée aux circuits imprimés ce qui en fait les premiers prototypes au monde de ce genre (voir Figure 2). Tous nos prototypes ont, au dessus du volume d'ionisation, une électrode de dérive collée à 2 mm d'acier pris dans l'absorbeur. De la sorte, le capot ne contribue pas à l'épaisseur de la partie active du futur calorimètre. Le gaz utilisé est un mélange d'argon et d'isobutane 95/5.

Le design d'un prototype MICROMEGAS de 1 m² a vu le jour en 2008. Notre choix, essentiellement motivé par la nécessité d'éviter des décharges destructrices pour l'électronique de lecture, s'est porté sur l'assemblage de 6 bulks sur deux

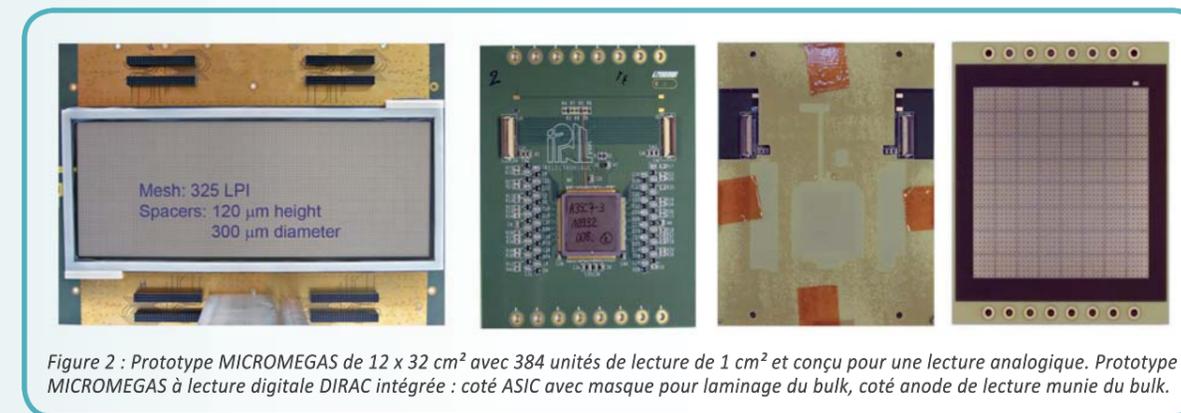


Figure 2 : Prototype MICROMEGAS de 12 x 32 cm² avec 384 unités de lecture de 1 cm² et conçu pour une lecture analogique. Prototype MICROMEGAS à lecture digitale DIRAC intégrée : coté ASIC avec masque pour laminage du bulk, coté anode de lecture munie du bulk.

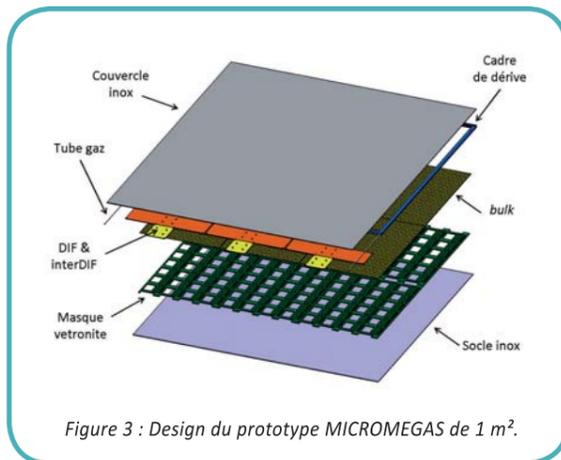


Figure 3 : Design du prototype MICROMEGAS de 1 m².

masques (voir Figure 3). Deux plans de 2 mm d'acier viendront fermer la chambre et son épaisseur ne dépassera pas 12 mm, dont seulement 8 mm de partie active avec électronique de lecture à seuil, intégrée aux circuits imprimés. Ce détecteur a été conçu pour convenir à la production de 40 plans qui équiperont un prototype de calorimètre de 1 m³. De la sorte, nous contribuons fortement à l'effort de la collaboration RD51 pour développer des détecteurs MICROMEGAS de large surface.

Développement des cartes de lecture numérique :

Au sein de la collaboration CALICE, l'équipe du LAPP est également responsable des cartes de lecture numérique. Appelées DIF (Detector InterFace), ces cartes permettent de lire les circuits intégrés situés au plus près des détecteurs et de transmettre les données au système d'acquisition. Pour les MICROMEGAS, nous avons fait le choix d'utiliser et tester les circuits intégrés HARDROCs développés au LAL et les circuits intégrés DIRACS développés à l'IPNL. Grâce à l'utilisation d'un composant programmable de type FPGA, les cartes DIF sont très modulaires : elles peuvent faire l'intermédiaire entre plusieurs types d'électronique frontale et un système d'acquisition de laboratoire ou le système d'acquisition de CALICE qui satisfait les contraintes d'une acquisition pour l'ILC. Une première version des cartes DIF a été dessinée et produite en 2008 pour être utilisée en test faisceau en novembre 2008 sur les détecteurs MICROMEGAS du LAPP et les RPCs de l'IPNL. La nouvelle version de ses cartes permettra la lecture du prototype de calorimètre de 1 m³. Pour ceci un ingénieur de l'équipe développera en 2009 le code du FPGA nécessaire pour la prise de données via le système d'acquisition de CALICE.

Développement des circuits intégrés de lecture :
Le grand nombre de voies électroniques (de 30

à 50 millions selon la configuration) qui seront utilisées dans un calorimètre hadronique à l'ILC, nécessite des circuits intégrés en silicium spécifiques à très faible consommation et à encombrement minimum. Le circuit intégré DIRAC a été spécifiquement conçu pour lire les charges issues des détecteurs MICROMEGAS. A partir de 2009, la maîtrise d'œuvre du développement et des tests du circuit intégré DIRAC sera assurée par l'équipe du LAPP, en raison de la venue au laboratoire de son concepteur principal. L'IPNL continuera de collaborer sur ce projet de R&D en microélectronique.

Analyse de physique et résultats

Le gain de nos prototypes MICROMEGAS a été mesuré à l'aide d'une source ⁵⁵Fe. Il peut s'élever jusqu'à 10⁴ avec une résolution en énergie de 8,5 % correspondant à une largeur à mi-hauteur de 19,6 % (voir Figure 4). Ces quantités sont mesurées en fonction du champ de dérive, du champ d'amplification, du flux de gaz, de la température et de la pression. Comme attendu, nos prototypes montrent bien une croissance exponentielle du gain en fonction du champ de dérive. La dépendance absolue de la réponse de nos MICROMEGAS en fonction de la pression s'élève à -2fc/mbar.

En 2008, quatre prototypes avec lecture analogique, un prototype muni de l'ASIC de lecture DIRAC et trois prototypes munis de l'ASIC de lecture HARDROC ont été testés sous flux de muons et de pions avec et sans absorbeur au CERN.

L'analyse des données des prototypes avec lecture analogique a permis diverses études. Le bruit de fond électronique a été quantifié en mesurant un

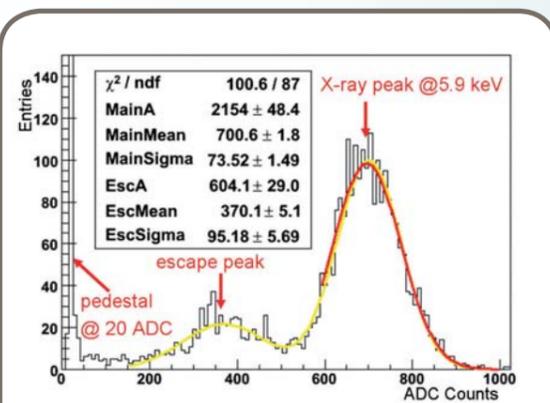


Figure 4 : Réponse d'un prototype MICROMEGAS aux photons d'une source de ⁵⁵Fe.

sigma des piédestaux à 0,6 fc. La valeur la plus probable du signal interpolé par une distribution de Landau (MPV) a été mesurée pour chaque voie de l'ordre de 20 fc. La disparité globale de la réponse des prototypes a été mesurée à 11 % (voir Figure 5). Des cartes de disparité géographique ont été dressées pour les moyennes et sigmas des piédestaux, pour les MPV et les sigmas des distributions de Landau ainsi que pour les efficacités. Les efficacités ont été calculées pour chaque chambre en utilisant les trois autres comme « trajectographe », reconstruisant des droites permettant d'extrapoler la position de la réponse dans la chambre à tester. La présence ou l'absence de signal à la position attendue permet de déduire l'efficacité ; le nombre de canaux bruyants en dehors de la zone où le signal est attendu va fournir la probabilité d'efficacité fortuite (responsable d'une hausse artificielle de l'efficacité mesurée au premier abord). Les efficacités globales corrigées des quatre chambres sont répertoriées dans le tableau 1. De même la multiplicité du signal a été évaluée à 1,1.

Efficacité des prototypes Micromegas à lecture Analogique	
Prototype	Efficacité (charge > 2.8 fC)
Prototype 0 (96 voies)	97,23 ± 0,11 %
Prototype 1 (96 voies)	97,66 ± 0,10 %
Prototype 2 (96 voies)	91,14 ± 0,19 %
Prototype 3 (384 voies)	97,04 ± 0,12 %

Tableau 1 : Efficacité des prototypes MICROMEGAS à lecture analogique.

Une puce DIRAC a été intégrée à un circuit imprimé de 8 x 8 cm² muni de protection contre les étincelles (voir Figure 2) et équipé de la technologie bulk, pour une épaisseur totale de 12 mm, incluant les 2 mm d'absorbeur que constitue le capot d'acier. Pour la première fois un tel prototype a été assemblé et exposé à un faisceau de particules. Ce test a eu lieu sur la ligne H2 du SPS au CERN avec un faisceau de pions à 200 GeV en août 2008. Le profil du faisceau a pu être observé avec un seuil de 19 fc (voir Figure 6) prouvant la capacité de la puce DIRAC à lire les détecteurs MICROMEGAS. Des tests avec plusieurs chambres ainsi équipées

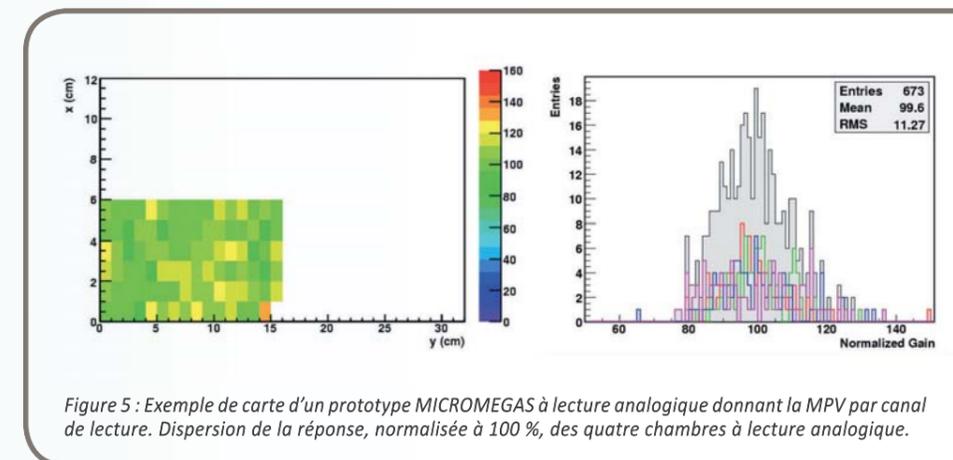


Figure 5 : Exemple de carte d'un prototype MICROMEGAS à lecture analogique donnant la MPV par canal de lecture. Dispersion de la réponse, normalisée à 100 %, des quatre chambres à lecture analogique.

seront indispensables pour mesurer les efficacités, les multiplicités et toutes les dépendances relatives au seuil de lecture.

Plusieurs prototypes à 8 x 32 voies ont été réalisés et équipés chacun de quatre puces HARDROC intégrées au circuit imprimé. Leur lecture est assurée par une carte DIF (Detector InterFace) conçue au LAPP dans le cadre du système d'acquisition de donnée du DHCAL (Digital HCAL) de la collaboration CALICE. Ces prototypes ont été mis sous un faisceau de pion à 7 GeV en novembre 2008 sur la ligne T9 du PS au CERN. L'analyse des données recueillies est en cours.

Parallèlement aux études des détecteurs, nous avons développé la simulation d'un calorimètre hadronique, en utilisant GEANT4 et l'environnement software du concept SiD. En utilisant les ressources de la ferme MUST, nous avons simulé plusieurs configurations dans le but d'optimiser le calorimètre hadronique mais aussi pour permettre la confrontation aux données des prototypes. La Figure 7 montre les voies du détecteur touchées pour une simulation d'un pion de 100 GeV interagissant avec l'absorbeur.

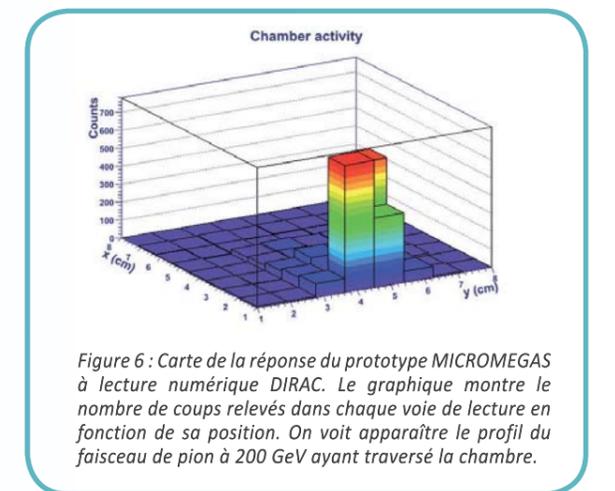


Figure 6 : Carte de la réponse du prototype MICROMEGAS à lecture numérique DIRAC. Le graphique montre le nombre de coups relevés dans chaque voie de lecture en fonction de sa position. On voit apparaître le profil du faisceau de pion à 200 GeV ayant traversé la chambre.

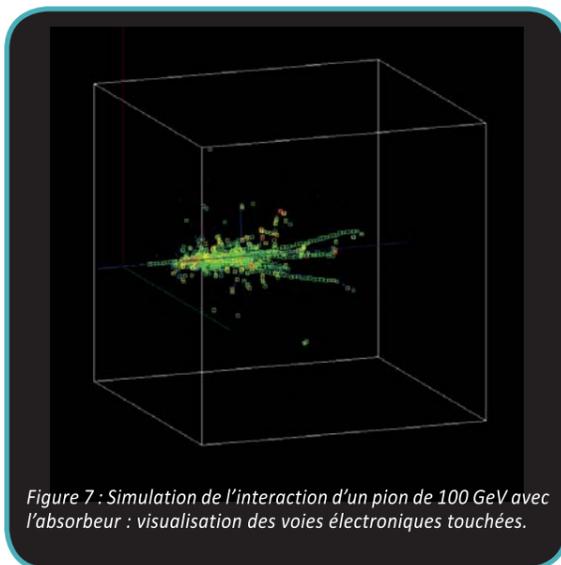


Figure 7 : Simulation de l'interaction d'un pion de 100 GeV avec l'absorbeur : visualisation des voies électroniques touchées.

Plan pour 2010-2014

Après les tests du premier m² de MICROMEGAS avec électronique à seuil intégré, nous prévoyons, dans le cadre de CALICE, la production d'un minimum de dix plans de un mètre carré de MICROMEGAS par an pour équiper un prototype de calorimètre hadronique. Cet effort sera accompagné d'une part d'études poussées sur les protections de l'électronique de lecture et d'autre part de la suite des développements des circuits intégrés DIRACs ; deux activités à forte visibilité dans la collaboration RD51 du CERN. En parallèle, nous prévoyons de continuer et de renforcer notre effort dans les simulations et optimisations des détecteurs de l'ILC et de CLIC en nous basant sur des canaux de physiques de référence, des études qui seront enrichies par la proximité des physiciens théoriciens du LAPH.

Ces activités, ainsi que l'exploitation des données des tests faisceau du prototype de 1 m³, représentent un budget de l'ordre de 80 kEuros par an. Elles reposent sur le maintien et le renforcement de l'équipe par la continuité d'un poste de physicien sur deux ans à partir de 2011 et d'un poste de physicien entrant permanent.

Publications importantes

1. «CALICE Report to the Calorimeter R&D Review Panel». By CALICE Collaboration (C. Adloff et al). ILC-DET-2007-024, Jul 2007., 77pp. e-Print: arXiv:0707.1245 [physics.ins-det].

2. «International Linear Collider Reference Design Report. 1: Executive summary. 2: Physics at the ILC. 3: Accelerator. 4: Detectors». J. Brau, (ed.) et al. ILC-REPORT-2007-001, AAI-PUB-2007-002, BNL-79150-2007, CERN-2007-006, CHEP-A07-001, CLNS-07-1991, COCKCROFT-07-04, DESY-07-046, FERMILAB-TM-2382, JAI-2007-001, JINR-E9-2007-039, JLAB-R-2007-01, KEK-REPORT-2007-2, LBNL-62867, LNF-07-9-NT, SLAC-R-857, Aug 2007., 778pp.
3. «Response of the CALICE Si-W Electromagnetic Calorimeter Physics Prototype to Electrons». By CALICE Collaboration (C. Adloff et al). Nov 2008., 21pp. e-Print: arXiv:0811.2354 [physics.ins-det].
4. «Large Area MICROMEGAS with Embedded Front-End Electronics for a Digital Hadronic Calorimeter». C. Adloff, A. Espargilière and Y. Karyotakis. Nuclear Science Symposium Conference Record, NSS '08. IEEE, ISSN: 1082-3654, ISBN: 978-1-4244-2714-7, 2008, p. 1433 – 1435.

Présentation dans des conférences

- Y. Karyotakis, « MICROMEGAS pour le GHICAL », Séminaire orienté vers une contribution au linéaire à électrons, Orsay, 5-6 Octobre 2006.
- C. Adloff, «MICROMEGAS for a Gas HCAL», International Linear Collider Workshop (ILC-ECFA and GDE Joint Meeting), Valencia, 6-10 November 2006.
- J. Prast, « La DAQ pour les projets ANR et EUDET », Séminaire orienté vers une contribution au linéaire à électrons, Clermont-Ferrand, 19-20 Novembre 2007.
- J. Blaha, «DHCAL», CLIC08 Workshop, CERN, 14-17 October 2008.
- C. Adloff, «Large Surfaces MICROMEGAS with Embedded Front-End Electronics for a Digital Hadronic Calorimeter», IEEE Nuclear Science Symposium, Dresden, 19-25 October 2008.
- C. Adloff, « MICROMEAS DHCAL : Résultat des tests en faisceau et simulation », Séminaire orienté vers une contribution au linéaire à électrons, Annecy-le-Vieux, 8-9 Décembre 2008.
- J. Blaha, «Development on MICROMEGAS for a Digital Hadronic Calorimeter», LCWS'08, 15-20 nov. 2008, Chicago.

L'équipe du LAPP

Physiciens : C. Adloff (Maître de Conférence), J. Blaha (oct. 2008 - oct. 2010), J.-J. Blaising, M. Chefdeville (déc. 2008 - déc. 2010), Y. Karyotakis

Doctorant : A. Espargilière (oct. 2008 - oct. 2011)

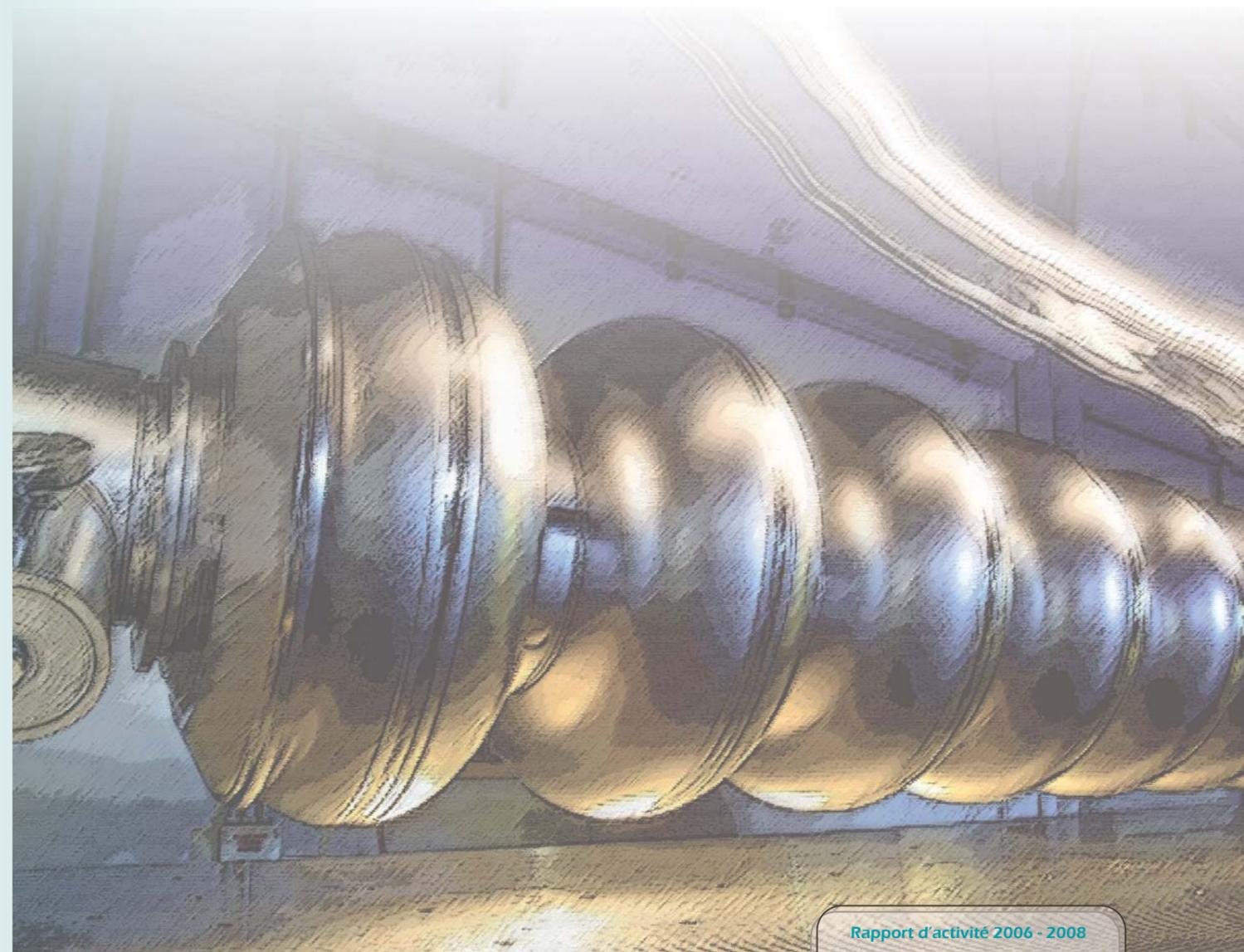
Equipe Technique : S. Cap, A. Dalmaz, C. Drancourt, D. Fougeron, R. Gaglione, R. Gallet, N. Geffroy, C. Girard, R. Hermel, J. Jacquemier, I. Monteiro, F. Peltier, J. Prast, J. Tassan, G. Vouters (CDD sept. 2008-juin 2009)

Stagiaires : M. Breton (IUT, 2007), A. Espargilière (Master 2, 2007), K. Karakostas (Master 1, visiteur étranger, 2006), G. Vouters (Ingénieur 2008), G. Rosaz (IUT, 2006)

Responsabilités du groupe

Membre de la « task force » DIF de la collaboration CALICE : J. Prast (2007-2008).

Membre du comité exécutif de la collaboration SiD : Y. Karyotakis.



LAViSta : Préparer les futurs accélérateurs linéaires

LAViSta (Laboratoires d'Annecy travaillant sur les Vibrations et la Stabilisation) prépare les futurs collisionneurs linéaires ayant des faisceaux de particules de la taille du nanomètre en étudiant la stabilisation. LAViSta a étudié des capteurs et des actionneurs avec un asservissement adapté et des études de réponse dynamique. En combinant une compensation développée dans LAViSta avec une isolation active du commerce, un prototype a pu être asservi à son extrémité à 0,13 nm à 4 Hz. LAViSta contribue également à ATF2 en fournissant un système de fixation aux aimants de focalisation finale. Le mouvement relatif entre les aimants et le point d'interaction est meilleur que les spécifications : 5 nm à 0,1 Hz au lieu de 7 nm.

Introduction

Après le projet LHC (Large Hadron Collider), la communauté internationale des accélérateurs prépare activement les futurs projets de collisionneurs linéaires comme l'ILC (International Linear Collider) et le CLIC (Compact Linear Collider). Ces projets sont d'envergure internationale et permettent une grande visibilité de l'équipe LAViSta. Ces projets ont en commun une taille de faisceau de quelques nanomètres (10^{-9} m) au point d'interaction pour une luminosité nominale de 10^{34} cm²s⁻¹. Pour la faisabilité de ces projets, la stabilisation est un des problèmes déterminants car de nombreuses sources de vibrations peuvent perturber le faisceau. Le groupe LAViSta étudie la faisabilité de la stabilisation en dessous du nanomètre dans une gamme de fréquences entre 0,5 Hz et 100 Hz des différents éléments composant un accélérateur, plus particulièrement des aimants focalisateurs. Il apporte également des solutions pour la stabilisation des aimants de focalisation finale à différents accélérateurs de démonstration comme CTF3 (CLIC Test Facility 3, démonstration de faisabilité de l'accélération innovante à deux faisceaux) au CERN et ATF2 (Accelerator Test Facility 2, démonstration de la faisabilité de produire un faisceau de 40 nm) au Japon.

La collaboration

DESY, CERN, Oxford, Saclay, KEK, LAL, LLR, Oxford et SYMME.

Points forts

Stabilisation active sur un prototype d'aimant d'un futur collisionneur linéaire à 0,13 nm à 4 Hz (capteurs, actionneurs, asservissement, simulations).

Etude de la fixation des aimants de focalisation finale de ATF2 au Japon avec des performances de stabilité meilleures que les spécifications.

2007 : publication du ILC Reference Design Report.

2008 : premiers faisceaux dans ATF2.

Activités de recherche du groupe du LAPP

Le groupe LAViSta a démarré il y a 5 ans grâce à des financements européens dans le cadre du 6^{ème} PCRD. L'intérêt pour la stabilisation est devenu croissant, cette problématique étant un enjeu de faisabilité, de performance et de coût pour les projets de futurs collisionneurs linéaires. La démarche a été d'étudier le problème avec des prototypes croissants en taille et en complexité. Le groupe applique les solutions étudiées aux accélérateurs en fonctionnement, notamment ATF2 au Japon et plus tard CTF3 au CERN. De plus, LAViSta est un partenariat avec le laboratoire SYMME (Systèmes et Matériaux pour le MEcatronique) de Polytech'Savoie qui apporte en particulier ses compétences en automatique.

Dans la perspective de stabiliser des éléments de l'accélérateur, il faut d'abord mesurer

des vibrations de l'ordre du nanomètre. Nous avons étudié différents capteurs notamment ceux utilisés dans le domaine sismique tout en développant l'acquisition de données et le traitement du signal spécifique. Il faut également apporter une action correctrice sur la structure calculée à l'aide de boucles d'asservissement développées dans LAViSta. Une contribution essentielle à cette étude est la simulation, grâce à des calculs par éléments finis (EF). Nous étudions par exemple la réponse dynamique de la structure à stabiliser. La comparaison entre les mesures et les calculs permet, après recalage, de développer des modèles prédictifs de nos structures (Figure 1).

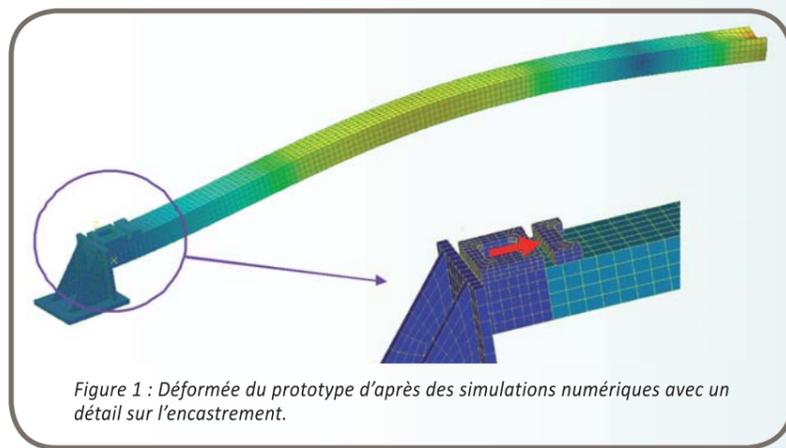


Figure 1 : Déformée du prototype d'après des simulations numériques avec un détail sur l'encastrement.

Projets techniques

LAViSta contribue à une étude sur la stabilisation active d'aimants d'un futur accélérateur linéaire et plus particulièrement l'étude des aimants de focalisation finale juste avant le point d'interaction. Le problème peut être séparé en une partie isolation des vibrations provenant du sol (houle, activité sismique, activité humaine...) et une partie compensation des modes de vibration de la structure à stabiliser. Dans un premier temps, le groupe a étudié la compensation avec le choix de capteurs et d'actionneurs résistants aux conditions présentes dans un accélérateur (radiation, champ magnétique...), avec un asservissement adapté au prototype utilisé : une structure de 2,5 m de long et de 15 cm

de côté, encastrée seulement à une extrémité (Figure 2). Les mesures faites dans cette étude ont permis de révéler l'influence néfaste du bruit acoustique même à plus haute fréquence, générant des vibrations non négligeables sur la structure. Le développement de l'algorithme a été rendu possible grâce aux calculs de réponse dynamique. L'asservissement a ainsi permis de rejeter les pics de résonance. En combinant cette compensation avec un système industriel d'isolation active, le prototype a pu être asservi à son extrémité libre en passant de 7,8 nm à 0,13 nm à 4 Hz, soit un facteur 60 d'amortissement (Figure 3). Les résultats obtenus et le savoir-faire acquis permettent au groupe de contribuer significativement à la définition technique des futurs collisionneurs linéaires. LAViSta fournit également un système de fixation aux aimants de focalisation finale à des accélérateurs en fonctionnement tel ATF2. Grâce à la conception et à la fabrication d'éléments de support adaptés, à la mise en place d'un test grandeur nature avant installation sur site et à une analyse complexe des réponses des structures, le mouvement relatif entre les aimants et le point d'interaction est meilleur que les spécifications : 5 nm à 0,1 Hz au lieu de 7 nm (Figure 4).

Analyse de physique et résultats

Pour optimiser l'information que l'on peut obtenir par les mesures de vibrations, une analyse sophistiquée du signal doit être effectuée. Tout d'abord, l'acquisition de données doit être faite avec le plus grand soin par le



Figure 2 : Prototype d'un aimant de focalisation finale encastré-libre pour le développement de l'asservissement.

choix de la fréquence d'acquisition en fonction de la gamme de fréquence à étudier, du temps d'acquisition, du fenêtrage et du moyennage adapté. Le conditionnement du signal entre le capteur et le système d'acquisition est également essentiel pour réduire le bruit compte tenu des faibles signaux en sortie de capteurs (signal différentiel, amplificateurs, filtres passe-haut et passe-bas). D'autre part, différentes analyses permettent de comparer les comportements de certains points de mesure, comme la densité spectrale, la cohérence, la fonction de transfert, le RMS intégré (Root Mean Square) et le mouvement relatif. Ce savoir-faire a été acquis en collaboration avec des experts mondiaux au CERN, à SLAC et au KEK. Ces mesures entrent dans les simulations et calculs de réponse dynamique. Ce travail est une contribution reconnue dans le projet ATF2 et notamment par la participation de B. Bolzon pendant 10 mois sur site à KEK à Tsukuba au Japon.

Plan pour 2010-2014

Le groupe LAViSta entend continuer à contribuer à la définition, la conception et la préparation des futurs accélérateurs. Dans le projet ATF2, le financement ANR permet une ouverture vers de nouvelles thématiques après la contribution de LAViSta au support des aimants de focalisation finale. Les mesures de vibrations, de cohérence en fonction de la longueur permettront de mettre en place un générateur de mouvement du sol utile pour les simulations de faisceau ATF2, de déterminer la courbe de stabilisation active idéale et donc d'optimiser les paramètres pour obtenir un

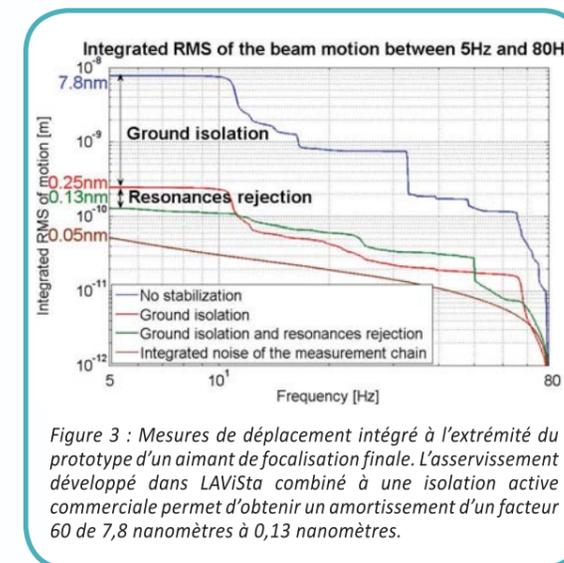


Figure 3 : Mesures de déplacement intégré à l'extrémité du prototype d'un aimant de focalisation finale. L'asservissement développé dans LAViSta combiné à une isolation active commerciale permet d'obtenir un amortissement d'un facteur 60 de 7,8 nanomètres à 0,13 nanomètres.

faisceau de 40 nm. Par la suite, le groupe LAViSta étudiera la possibilité de remplacer les aimants de focalisation actuels par des aimants plus proches encore des aimants qui seront utilisés sur ILC ou CLIC en collaboration avec SLAC et avec le CERN. Une équipe de 3 personnes au moins jusqu'en 2013 sera nécessaire.

LAViSta se propose également de contribuer via le programme européen EuCARD à l'isolation des 4 000 aimants quadripôles du linac de CLIC. Il s'agit là d'un enjeu de faisabilité, de performance et de coût pour CLIC. La démarche sera similaire au développement de la compensation, c'est-à-dire la construction de prototypes croissants en difficulté et en complexité : une petite table d'isolation, un prototype de 2 m de long en collaboration avec le CERN, puis l'intégration finale dans un module CLIC comprenant aimant, cavités accélératrices, système d'alignement et support ; l'objectif étant de stabiliser à 1 nm à 1 Hz. Il s'agira également de mener en parallèle les différents axes d'étude que sont l'instrumentation, l'asservissement et les calculs par EF. Dans la section de la focalisation finale, nous allons élargir l'étude avec SYMME pour développer une stabilisation multi-capteurs/multi-actionneurs avec l'objectif de stabiliser à 0,1 nm à 4 Hz. Une équipe de 3-4 personnes sera nécessaire.

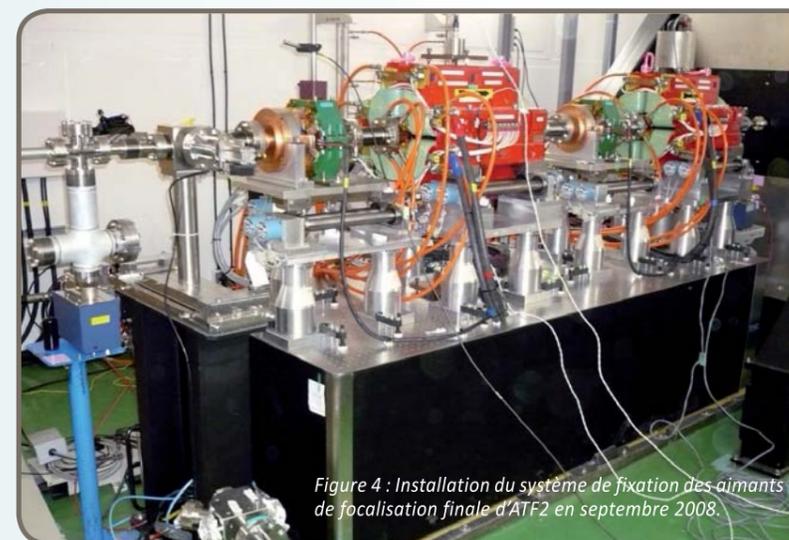


Figure 4 : Installation du système de fixation des aimants de focalisation finale d'ATF2 en septembre 2008.

Publications importantes

1. "ATF2 proposal Vol. 2", B.I. Grishanov et al. (signataires B. Bolzon, N. Geffroy, A. Jérémie, Y. Karyotakis) [arXiv:physics/0606194].
2. "Study of supports for the final doublets of ATF2", B. Bolzon, J.-P. Baud, G. Gaillard, N. Geffroy, A. Jérémie, M. Guinchard, Nanobeam'08, Advanced Beam Dynamics Workshop, Novosibirsk (Russie), LAPP-TECH-2008-04.
3. "Study of vibrations and stabilization at the sub-nanometer scale for CLIC final doublets", B. Bolzon, L. Brunetti, N. Geffroy, A. Jérémie, B. Caron, J. Lottin, Nanobeam'08, Advanced Beam Dynamics Workshop, Novosibirsk (Russie), LAPP-TECH-2008-05.
4. "Active stabilization studies at the sub-nanometer level for future linear colliders", N. Geffroy, L. Brunetti, B. Bolzon, A. Jérémie, B. Caron et al, Mecatronics 2008, 7th France-Japan (5th Europe-Asia) Congress on Mechatronics, Le Grand Bornand (France), LAPP-TECH-2008-03.
5. "Vibration stabilization for a cantilever magnet prototype at the subnanometer scale", L. Brunetti, B. Bolzon, N. Geffroy, A. Jérémie, A. Badel, B. Caron, J. Lottin, 11th European Particle Accelerator Conference EPAC'08, Genova (Italie), LAPP-TECH-2008-01.

Thèses et Habilitations

L. Brunetti, « Rejet de vibrations dans une structure mécanique linéaire », Mémoire C.N.A.M., Conservatoire National des Arts et Métiers, 02 juin 2006.

B. Bolzon, « Etude des vibrations et de la stabilisation à l'échelle sous-nanométrique des doublets finaux d'un collisionneur linéaire » Thèse, Université de Savoie, 12 novembre 2007.

L'équipe du LAPP

Post-doc. : B. Bolzon (depuis janv. 2008)

Doctorant : B. Bolzon (jusque fin 2007)

Equipe Technique : J.-P. Baud, L. Brunetti, G. Deléglise, G. Gaillard, N. Geffroy, A. Jérémie, F. Peltier

Présentations dans des conférences

2007

B. Bolzon, "ATF2 project: Final Doublets support studies at LAPP", LCWS, ILC2007, Hamburg (Allemagne).

L. Brunetti, "Active stabilization of a mechanical structure", LCWS, ILC2007, Hamburg (Allemagne).

A. Jérémie, "A_R&D_2: Design of the linear collider machine-detector interface and ATF-2 at KEK", Workshop FJPL'07, Tsukuba (Japon).

2008

B. Bolzon, "Study of supports for the final doublets of ATF2", Nanobeam'08, Advanced Beam Dynamics Workshop, Novosibirsk (Russie).

B. Bolzon, "Study of vibrations and stabilization at the sub-nanometer scale for CLIC final doublets", Nanobeam'08, Advanced Beam Dynamics Workshop, Novosibirsk (Russie).

N. Geffroy, "Active stabilization studies at the sub-nanometer level for future linear colliders", Mecatronics 2008, 7th France-Japan (5th Europe-Asia) Congress on Mechatronics, Le Grand Bornand (France).

L. Brunetti, "Vibration stabilization for a cantilever magnet prototype at the subnanometer scale", 11th European Particle Accelerator Conference EPAC'08, Genova (Italie).

Responsabilités du groupe

A. Jérémie assume des responsabilités de coordination dans différents consortiums de financements européens : dans EUROTeV (2005-2008) comprenant 28 instituts dont 3 français, elle était coordinatrice scientifique d'un Work Package (WP7) sur la stabilisation et la métrologie ainsi que le coordinateur scientifique CNRS/IN2P3 en participant au comité de pilotage à la suite de Y. Karyotakis ; dans EuCARD (2009-2012), elle coordonne la tâche « stabilisation » dans le groupe de travail sur les collisionneurs linéaires. Elle est également responsable scientifique du LAPP pour un projet ANR et un PPF.

CTF3 : Instrumentation du faisceau d'électron

Un successeur probable pour le LHC est un accélérateur linéaire électrons – positons permettant des collisions à plusieurs TeV. Au CERN, le CLIC (Compact Linear Collider) pourrait être le choix technologique de cette future génération d'accélérateur à l'horizon 2023 : une machine dite « chaude » permettant de forts gradients d'accélération de l'ordre de 120 MV/m grâce à des structures accélératrices novatrices à température ambiante. Dans ce concept d'accélération à deux faisceaux, la grande puissance RF servant à accélérer le faisceau principal est extraite d'un deuxième faisceau d'électrons relativistes de grande intensité, le "drive beam" (faisceau d'entraînement) parallèle au "main beam" (faisceau principal). On décélère le faisceau d'entraînement pour disposer de la puissance RF nécessaire à ces structures. CLIC serait une alternative à ILC (International Linear Collider), machine « froide » basée sur l'utilisation de cavités supraconductrices et limitée à une énergie d'environ 1 TeV.

Introduction

Un tel accélérateur nécessite dès maintenant un effort de recherche et développement dans tous les domaines afin de valider ce concept d'ici 2010. Cela passe par le CTF3 (CLIC Test Facility 3), prototype de faisabilité du CLIC basé au CERN. CTF3 est composé d'un linac ainsi que de deux boucles permettant d'accélérer un faisceau d'électrons, le « drive beam », à une énergie de 180 MeV et d'élever son intensité jusqu'à une trentaine d'ampères. Un deuxième faisceau, le « main beam », de 150 MeV et de 1 A d'intensité sera accéléré dans la zone expérimentale, le CLEX. Une ligne permettra donc de valider les futurs modules de CLIC, « transférant » la puissance du drive beam vers le main beam. En septembre

Points forts

De novembre 2006 à l'automne 2008 : plusieurs ouvertures ont permis l'installation de 46 modules analogiques et 47 cartes digitales DFE dans 12 châssis répartis autour de l'accélérateur CTF3.

2008, le faisceau a parcouru entièrement les lignes du drive beam pour la première fois.

La collaboration

L'organisation de la collaboration CTF3 est très similaire aux collaborations existantes sur les grands détecteurs de physique : laboratoires et instituts se partagent la responsabilité du projet en prenant en charge des lots de travaux bien identifiés. Cette collaboration comprend près de 27 instituts et laboratoires du monde entier. Le LAPP fait partie du comité CTF3 et participe au commissioning de la machine. Le soutien financier du Conseil Général de la Haute-Savoie a fait l'objet d'une convention entre le CERN et l'IN2P3 et a permis l'embauche de deux jeunes ingénieurs en CDD depuis le début du projet.

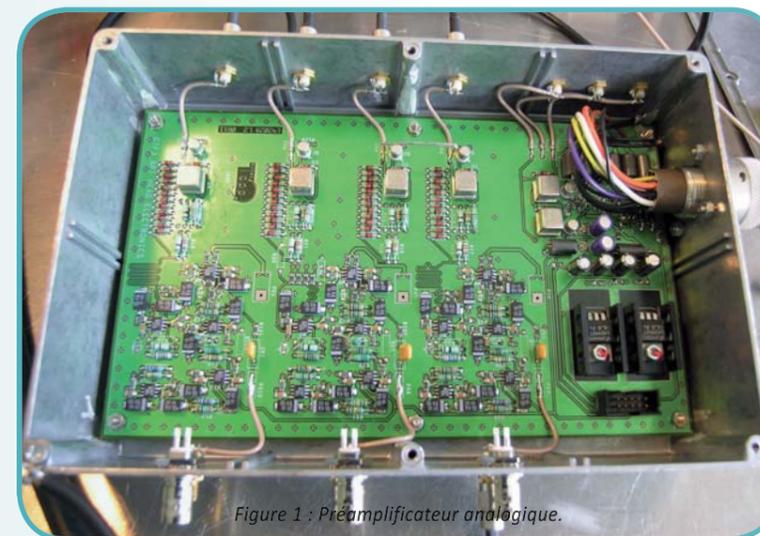


Figure 1 : Préalimentaire analogique.

Activités de recherche du groupe du LAPP

Depuis septembre 2005, le LAPP s'est engagé dans CTF3 en développant une électronique d'acquisition de l'intensité et de la position du faisceau. Jusqu'alors, ces signaux étaient échantillonnés à distance en utilisant des cartes et des câbles onéreux. Un échantillonnage au plus près du faisceau à moindre coût sera une des clés de l'instrumentation de CLIC.

Le système d'échantillonnage développé au LAPP englobe toute la chaîne électronique depuis la sortie des capteurs placés sur l'accélérateur, les BPM (Beam Position Monitor), jusqu'aux machines de traitement informatique des données :

- Modules analogiques réalisant la préamplification des signaux ainsi que le traitement des positions et intensité du faisceau (Figures 1 et 2 : Préamplificateur analogique et BPM).
- Cartes d'échantillonnage "DFE" réparties dans 12 châssis au plus près du faisceau (Figure 3 : Châssis d'acquisition dans CLEX).
- Distribution des timings et des calibrations, installation et câblage.
- Collection et traitement informatique des données.



Figure 2 : BPM et préamplificateur analogique.

Ces cartes ont été développées pour être tolérantes aux radiations.

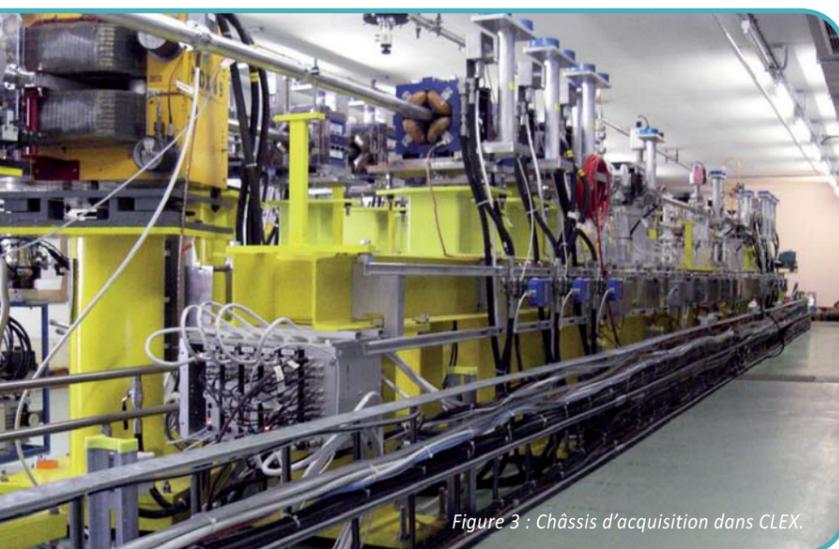


Figure 3 : Châssis d'acquisition dans CLEX.

L'équipe du LAPP

Physicien : Y. Karyotakis

Equipe Technique : L. Bellier, A. Dalmaz, R. Hermel, J. Jacquemier, J.-M. Nappa, P. Poulier, J. Prast, J. Tassan, S. Vilalte

POLAR : Un détecteur spatial pour l'investigation des phénomènes les plus violents dans l'univers

La collaboration scientifique internationale POLAR a pour objet la conception, la réalisation et l'exploitation d'un détecteur spatial à grand champ de vue pour la mesure de la polarisation des rayons X durs émis par des sources astrophysiques, et plus particulièrement par les sursauts gamma. Les sursauts gamma sont les phénomènes les plus violents observés dans l'Univers. Sans doute lié à l'absorption d'étoiles géantes par des trous noirs, le mécanisme par lequel ces sursauts gamma sont produits pourrait faire intervenir des champs magnétiques colossaux dont on peut trouver la trace par la mesure de la polarisation des rayons X émis. Cette mesure est difficile et nécessite un détecteur spécialisé et très performant, embarqué sur une plateforme satellite.

Le projet POLAR a reçu en 2008 une labellisation par le pôle de compétitivité ARVE INDUSTRIES.

Introduction

POLAR est un détecteur spatial à grand champ de vue pour la mesure de la polarisation des rayons X durs émis par des sources astrophysiques et plus particulièrement par les sursauts gamma. Bien que découverts il y a 35 ans, les sursauts gamma sont encore aujourd'hui un des sujets brûlants de l'astrophysique et leur origine n'est pas encore connue.

Ces phénomènes cataclysmiques peuvent consumer en l'espace d'une seconde une masse équivalente à celle de milliers de notre Soleil, expédiant cette énergie à travers l'espace. Ces phénomènes ont fait l'objet d'une grande activité théorique et expérimentale. Les principales questions portent sur la nature exacte du phénomène à l'origine du sursaut gamma et sur les mécanismes d'extraction de l'énergie et de production d'éjecta de matière relativistes.

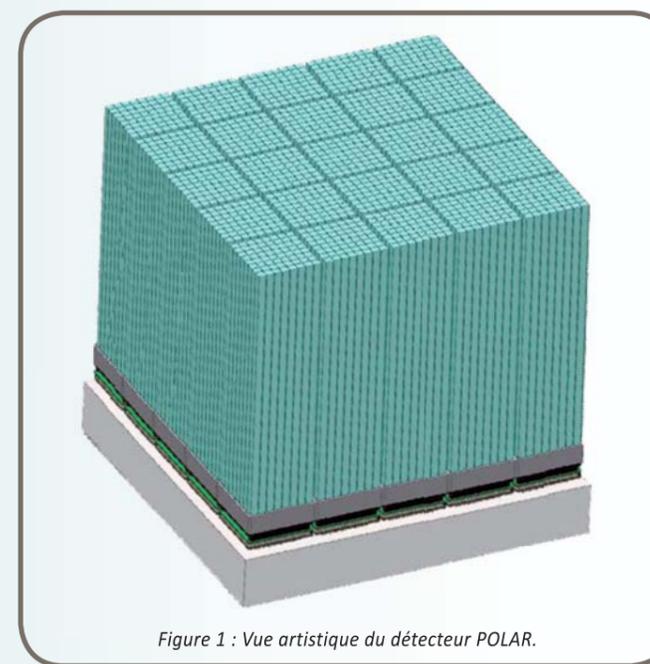


Figure 1 : Vue artistique du détecteur POLAR.

Points forts

Etude, conception et réalisation du circuit intégré MAPRA, pour l'acquisition et le traitement de signaux des photodétecteurs du polarimètre spatial POLAR.

Les mesures de polarisation (degré et angle de polarisation), de manière complémentaire aux mesures spectrales standards, peuvent nous permettre de comprendre ces phénomènes et de distinguer les mécanismes physiques en compétition. Les processus générant des rayons X polarisés sont généralement athermiques et anisotropes. Pour arriver à lever le voile sur ce phénomène il faut des mesures précises et répétées de la polarisation, ce qui impose un détecteur spécialisé. Aujourd'hui, il n'y a aucun instrument en fonctionnement dédié à une telle mesure, et POLAR est le seul instrument capable de le faire à travers un détecteur modulaire basé sur la technologie consolidée de la physique des particules expérimentale avec un champ de vue de



avec des instituts ayant une grande expérience dans la recherche spatiale et la technologie des détecteurs. En France, chercheurs de la physique des particules (IN2P3) et de l'astrophysique (INSU), expérimentateurs et théoriciens travaillent ensemble et complémentai- rement avec le même objectif scientifique.

La collaboration

La collaboration internatio- nale POLAR comprend des scientifiques des instituts suivants :

DPNC – Université de Genève, ESA-Integral Data Centre – ISDC à Versoix en Suisse, LAPP Ancey, LAM Marseille, LAPTH Ancey, PSI-Villigen près de Zurich en Suisse, IHEP Beijing et Université TsingHua en Chine, CBK Varsovie en Pologne.

Activités de recherche du groupe du LAPP

Les principaux sous-projets dans lesquels les membres du groupe du LAPP placent leurs efforts sont :

- Le développement d'un circuit intégré MAPRA (Multi Anode Polar Readout Asic) pour l'électronique frontale de lecture des signaux de photodétecteurs 64-channels Multi-Anode Photomultipliers.
- La programmation du logiciel embarqué pour le traitement des signaux numériques, la logique d'identification et le déclenchement de l'acquisition.

plus de π . La mesure utilise l'effet Compton, pour des photons incidents d'énergie typiquement entre 50 KeV et 500 KeV, qui couvrent le domaine d'énergie dans lequel les sursauts gamma ont un flux élevé. Dans sa version d'étude (Figure 1), POLAR est formé d'un ensemble de 1600 barreaux de scintillateurs aux dimensions de $6 \times 6 \times 200 \text{ mm}^3$ chacun. Ces dimensions sont ajustées pour que la longueur d'un barreau soit voisine du parcours de l'électron de recul et que la section soit égale à la surface d'un pixel du photomultiplicateur H8500 de chez Hamamatsu. Ces photomultiplicateurs (MAPM) sont caractérisés, non seulement par un gain élevé et une grande efficacité quantique, mais de plus ils ont déjà été utilisés dans l'espace. Le choix des dimensions permet de coupler directement les barreaux de scintillateurs à la face d'entrée des MAPM en dessous desquels se trouvent l'électronique de lecture et les alimentations électriques.

Une collaboration internationale, qui regroupe des instituts de France, de Suisse, de Pologne et de Chine (ce dernier pays fournissant le lanceur et la plateforme satellite), s'est formée

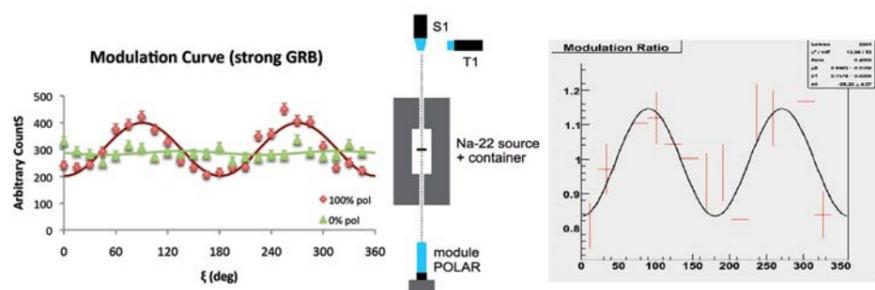


Figure 3 : 1) Courbes de modulation de la diffusion Compton de photons polarisés à 0% et 100% selon une simulation Monte Carlo de la réponse de POLAR. 2) Courbe de modulation expérimentale de photons polarisés de 511 keV mesurés par un module de POLAR.

- L'analyse détaillée du cas scientifique comprenant des études de phénoménologie par Monte Carlo et la préparation à l'analyse de données en collaboration avec la communauté scientifique française concernée.

Projets techniques

Le développement du circuit intégré MAPRA est le principal projet technique de l'équipe POLAR du LAPP. L'électronique de lecture des photomultiplicateurs de POLAR, et tout particulièrement le circuit intégré, est un élément essentiel afin de minimiser les bruits de fond et d'avoir une bonne mesure du signal. Elle doit être très rapide, permettre par des gains électroniques ajustables de bien uniformiser la réponse du détecteur en chaque point et aussi permettre de sélectionner les signaux sur des critères topologiques (ce qui permet la réduction du bruit de fond). Le projet a démarré en 2008. Pendant 12 mois, toutes les phases significatives du projet électronique ont été franchies et le calendrier d'exécution respecté :

- Dans un premier temps (de trois-quatre mois) une phase d'étude, en association avec le pôle de microélectronique Omega (Orsay) de l'IN2P3, institut dont fait partie le LAPP, a permis une analyse détaillée d'un autre circuit (MAROC) dont les briques fonctionnelles de base sont utiles pour le circuit MAPRA de POLAR.
- Dans une phase intermédiaire de trois mois, un atelier électronique réservé à ce projet et équipé avec un ensemble d'outils de tests comprenant carte d'acquisition, ordinateur, logiciel labview et logiciel dédié a été mis en fonction.
- En parallèle, et pour une durée de 6 mois, le schéma du nouveau chip a été conçu en utilisant les logiciels existants au laboratoire.

- Des tests multiples par simulation ont eu lieu entre octobre 2008 et janvier 2009.
- Enfin l'optimisation de la conception de la partie numérique du circuit intégré a permis la finalisation du design du prototype envoyé en production en février 2009 pour une fonderie qui a eu lieu le 2 mars 2009.

Les circuits intégrés, de retour de fonderie après encapsulation, seront soumis à des tests approfondis sur le banc développé à cet effet.

Analyse de physique et résultats

Depuis deux ans (2007-2008), la collaboration POLAR a fait des études de faisabilité, une étude critique du projet scientifique ainsi qu'un long travail de simulation informatique, pour déterminer les performances attendues de l'instrument et sa capacité à mesurer la polarisation. Les premiers tests d'un démonstrateur avec des photons polarisés ont validé les résultats de Monte Carlo (Figure 3). Plusieurs publications dans des revues scientifiques internationales et dans des conférences ont eu lieu.

Le 18 janvier 2008, l'équipe LAPP a organisé un atelier d'astrophysique au laboratoire (<http://lappweb.in2p3.fr/GRB2008/fr/index.html>), pour informer et stimuler l'intérêt de la communauté scientifique française sur les démarches expérimentales dédiées à la mesure de polarisation des rayons X durs avec le télescope spatiale POLAR. Le but de cet atelier était de comparer les différents modèles théoriques de sursauts gamma et de discuter leurs prédictions en termes de polarisation linéaire des rayons X émis, afin d'analyser comment la mesure conjointe de la polarisation avec les spectres d'émission permettrait un test approfondi de ces modèles.

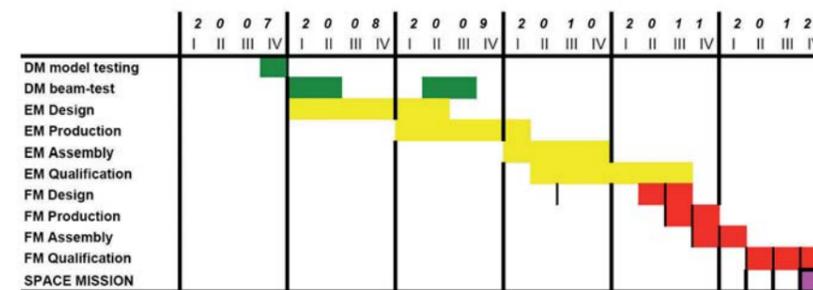
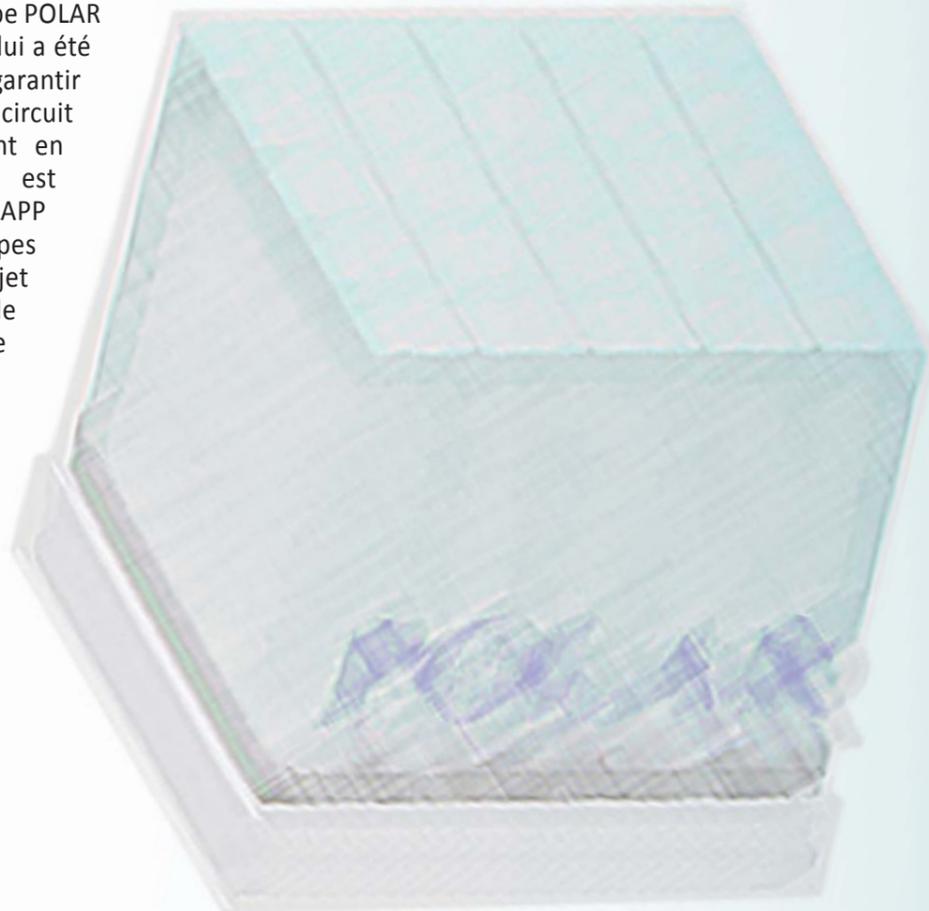


Figure 4 : Calendrier du projet POLAR.

Plan pour 2010-2014

Les grandes lignes du plan de travail sont les suivantes : la finalisation de tests (en cours) d'un démonstrateur au plus tard en août 2009 ; la réalisation et la qualification d'un modèle d'ingénierie EM qui a commencé en juin 2007 et qui se terminera à la fin du premier semestre 2011 ; la réalisation du modèle de vol FM qui sera achevé en 2011-2012 ; l'exploitation des données pendant la mission en orbite pour une durée d'au moins trois ans à partir de 2012-2013. L'instrument sera lancé par une fusée chinoise et installé sur le futur laboratoire spatial chinois Tian Gong en 2013 (Figure 2).

La dimension actuelle de l'équipe POLAR du LAPP et le financement qui lui a été accordé en 2008 pourront garantir la finalisation du projet du circuit ASIC-MAPRA. Un renforcement en personnel et en ressources est indispensable pour que le LAPP puisse s'engager dans les étapes plus importantes du projet (Figure 4) de réalisation, de finalisation de l'électronique de lecture et de traitement de données jusqu'à la mise en orbite et l'exploitation de données scientifiques.



L'équipe du LAPP

Physiciens : G. Lamanna, J.-P. Vialle

Equipe Technique : N. Fouque, R. Hermel

Publications importantes

1. "POLAR, an instrument to measure GRB polarization. Design and laboratory tests", Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, Merida (Mexique) July 2007, vol. 3 (2008) 1301-1304. G. Lamanna et al.
2. "POLAR: a space borne GRB polarimeter", Proceedings of «Polarimetry days in Rome: Crab status, theory and prospects», Rome (Italie) October 2008, LAPP-EXP-2008-06. G. Lamanna, N. Fouque, R. Hermel, J.-P. Vialle et al., Collaboration POLAR.

PMm²

PMm² (Photo Multiplicateurs mètre carré) est un projet ANR qui s'étend de 2007 à 2009. Il s'agit de démontrer la faisabilité de la mise en réseau de nombreux photodétecteurs afin de réduire le coût des futures expériences mettant en jeu plusieurs dizaines de milliers de ces détecteur en minimisant le nombre de connexions.

Introduction

Contexte scientifique et objectifs du projet : la couverture de très grandes surfaces de photodétection est un élément essentiel des dispositifs expérimentaux dévolus aux études des gerbes atmosphériques de grande énergie, des neutrinos de différentes sources (soleil, atmosphère, supernova, réacteurs, accélérateurs) ainsi que celles sur la désintégration du nucléon prévue par les théories de Grande Unification. Les expériences des générations futures dont les potentiels de découvertes sont importants ne pourront plus être le simple agrandissement des expériences existantes qui utilisent des photomultiplicateurs (PM) de très grandes dimensions (jusqu'à 50 cm de diamètre) et un système centralisé d'acquisition. Elles devront faire appel à des capteurs intelligents distribués, par analogie à la grille de calcul par rapport aux « Super calculateurs ». L'objectif de ce projet est une « recherche amont » en vue de réaliser de grands détecteurs utilisant des

Points forts

Conception et test de la carte électronique de surface qui assure l'alimentation, la communication et la synchronisation avec le boîtier étanche immergé.

Choix et qualification du câble et des connecteurs sous-marins reliant un macro pixel à l'acquisition.

milliers de photomultiplicateurs. Les partenaires se proposent de segmenter de très grandes surfaces en macro-pixels connectés à une électronique innovante autonome permettant alors de réduire considérablement le coût surfacique de ces détecteurs et facilitant leur industrialisation. Ce développement est rendu possible par les progrès de la microélectronique qui permettent d'intégrer tous les composants d'amplification et de traitement du signal de nombreuses voies de PM dans un circuit intégré (ASIC). Seules les données utiles sont ensuite expédiées par réseau vers le système de sauvegarde des données.

Un macro-pixel est composé de 16 photomultiplicateurs connectés à une électronique de traitement placée dans un boîtier étanche. Il est immergé dans une cuve d'eau pure à une profondeur pouvant atteindre 100 m. La liaison avec l'acquisition de données située en surface se fait par un câble unique.

La collaboration

Les partenaires sont le LAL (porteur du projet ANR), l'IPNO et le LAPP, ainsi que l'industriel PHOTONIS.



Connectique sous-marine et surface. Carte de communication développée par le LAPP.

Activités de recherche du groupe du LAPP

Le LAPP a la responsabilité de deux volets techniques du projet et de la simulation physique.

Conception et test de la carte électronique de surface

La carte électronique de surface doit assurer l'alimentation, la communication et la synchronisation avec le boîtier étanche immergé. Les données sont ensuite envoyées vers le PC d'acquisition via le réseau Ethernet. La communication avec le boîtier étanche distant de 100 m se fait via un câble constitué de (au moins) 2 paires différentielles : une pour le transport de données bidirectionnelles et une pour la transmission de l'horloge de synchronisation. Ces 2 paires utilisent le format RS485 et le codage Manchester pour les données. La puissance est fournie via un transformateur issu du standard Power Over Ethernet.

La carte électronique de surface est principalement constituée d'un circuit programmable (FPGA) assurant la communication avec le boîtier étanche et d'un microcontrôleur assurant la communication avec le réseau Ethernet.

Choix et qualification du câble et des connecteurs sous-marins reliant un macro-pixel à l'acquisition

Nous avons comparé les différentes solutions pour transporter de la puissance électrique et des données bidirectionnelles à 100 m de profondeur. Plusieurs câbles sous-marins ont été sélectionnés, ainsi que plusieurs types de connecteurs étanches, afin de comparer prix et performances. Ils ont été assemblés et surmoulés en polyuréthane selon les procédés industriels qui seraient utilisés en série. Ces câbles subissent des tests électriques approfondis ainsi que des tests en pression. Les résultats de ces tests nous permettront de faire le choix du câble qui sera produit en 10 000 exemplaires pour les futures expériences.

Simulation physique

Depuis février 2008, le LAPP est responsable de la partie simulation du projet. Une première simulation Monte Carlo avec GEANT4 dans le but de déterminer la géométrie de la cuve de test équipée de 16 tubes photomultiplicateurs permettant la détection des muons cosmiques à la surface a été réalisée. Une cuve de $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ avec les 16 PM placés au fond est amplement suffisante pour cet objectif. C'est ainsi, que la collaboration avec l'équipe MEMPHYNO de l'APC-Paris VII a démarré. MEMPHYNO est le prototype de MEMPHYS. MEMPHYNO sera équipé des 16 PM PHOTONIS de PMm^2 et de l'électronique associée une fois validée. Il sera installé dans le laboratoire souterrain de Modane dans le tunnel du Fréjus et il sera dédié essentiellement à l'étude des bruits de fond physiques. La simulation du détecteur mégatonne MEMPHYS découle naturellement de cette collaboration. Elle est également une brique importante dans le projet européen EuroNu qui a pour objectif de décider en 2012 de la meilleure technologie de détecteur parmi trois : Cherenkov à eau, détecteur argon liquide ou scintillateur liquide, pour la prochaine génération d'expériences en physique des neutrinos.

Publications importantes

1. "Large area photodetection for Water Cerenkov detectors PMm^2 proposal: Front End Electronics MAROC ASIC", IEEE 07. Ch. de La Taille.
2. " PMm^2 Electronic readouts", NNN 07. J. Pouthas.
3. " PMm^2 : large photomultipliers and innovative electronics for the next-generation neutrino experiments", NDIP 08 [arXiv:0811.2681] Submitted to Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A, November 14, 2008. B. Genolini et al.

L'équipe du LAPP

Physiciens : D. Duchesneau, J. Favier, A. Zghiche

Equipe Technique : N. Dumont-Dayot, R. Hermel, J. Tassan

POSITRON : Physique du positron et du positronium

Ce travail aborde plusieurs aspects de la physique du positron et du positronium. Il comporte des aspects fondamentaux (expérience de disparition de l'orthopositronium, recherche de matériaux pour produire un faisceau d'anti-hydrogène), des aspects de physique instrumentale : mise au point d'un banc de mesure par spectroscopie de positrons, d'un faisceau de positrons pulsé et à électrons secondaires, ainsi que des aspects plus appliqués : étude de matériaux (polymères ou alumine poreuse). Les aspects de formation ne sont pas absents (plusieurs thèses). Une telle diversité de sujets n'a pu être abordée qu'à travers une collaboration pluridisciplinaire.

Introduction

Le positronium constitue un système lié qui ressemble par certains aspects à l'atome d'hydrogène. Par d'autres aspects, il présente un grand intérêt pour des expériences de physique au-delà du Modèle Standard (recherche d'extra-dimensions, violation de CP...). Enfin, le positron et le positronium constituent des outils permettant d'obtenir des informations sur les structures de certains matériaux à l'échelle du nanomètre. Le positron et le positronium permettent donc d'aborder aussi bien des aspects de physique fondamentale que de physique appliquée ou d'instrumentation. Ces différents aspects sont illustrés sur les figures ci-après.

La collaboration

L'ensemble de ce travail a réuni une collaboration au sein de l'Université de Savoie (LAPP - Annecy-le-Vieux, LMOPS - Le Bourget-du-Lac).

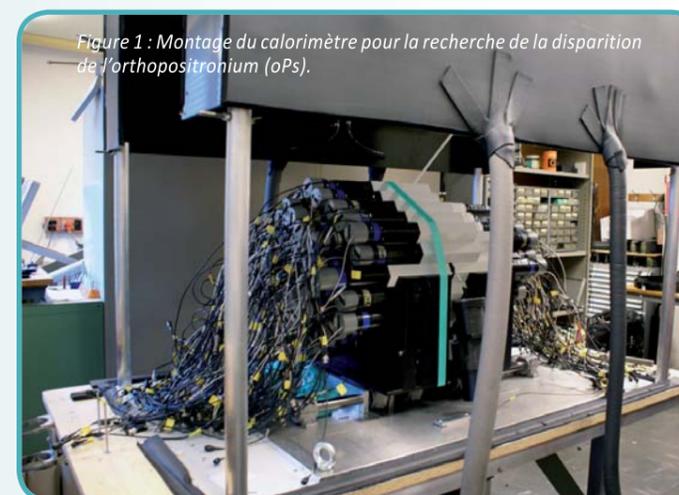


Figure 1 : Montage du calorimètre pour la recherche de la disparition de l'orthopositronium (oPs).

Points forts

L'équipe a participé à tous les aspects du programme, en particulier : l'installation du banc du LMOPS (thèse de J. Viret), le développement du faisceau de positrons (thèse de T. Anthonioz) et les aspects concernant la physique fondamentale (mesures de disparition de l'oPs, recherche de matériaux pour l'expérience AEGIS).

Celle-ci s'est insérée à son tour dans une collaboration internationale : ETH-Zürich, INP-Minsk, INR-Moscou, INRNE Sofia.

Activités de recherche du groupe du LAPP

Le LAPP a contribué à tous les aspects cités ci-dessus. Les aspects caractérisation et faisceau ont de plus été développés en collaboration étroite avec un autre laboratoire de l'université de Savoie (LMOPS). L'équipement mis en place au LMOPS a été installé avec la collaboration de N. Djourellov (INRNE Sofia), professeur invité à l'Université de Savoie. Il comprend deux bancs de PALS (Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy) et un banc de DBS (Doppler Broadening Spectroscopy). Cet équipement sera bientôt complété par un dispositif permettant d'effectuer des mesures en fonction de la température ($\sim 40^\circ \text{K}$ à $\sim 700^\circ \text{K}$), pour permettre des études de relaxation et de transition

de certains matériaux. L'apport et les conseils du professeur R. Grynszpan (LCMTR, UPR-209, ISCSA, IFR-CNRS) ont été particulièrement précieux pour ce travail (Publication 4).

Le faisceau de positrons pulsé, développé pour permettre des mesures par PALS, a permis d'atteindre des performances particulièrement intéressantes (haute efficacité et bonne résolution temporelle ~ 300 ps fwhm) (Publication 5). Ce même faisceau s'est vu adjoindre une mesure temporelle basée sur l'utilisation d'électrons secondaires issus de l'échantillon. La résolution temporelle atteinte, ~ 700 ps fwhm, a permis de caractériser des matériaux poreux (matériaux à faible constante diélectriques destinés à l'industrie électronique) (en cours de publication).

La collaboration a mesuré la limite de disparition de l'orthopositronium (probabilité à 3 sigma de confiance) au niveau de 4×10^{-7} , améliorant de presque un ordre de grandeur la limite existante. L'existence de ce processus de disparition de l'orthopositronium est prévue par certains modèles d'extra-dimensions (modèle de Randall-Sundrum, ou modèle d'univers miroir par exemple) (Publication 1).

Enfin, dans un processus de recherche d'un matériau susceptible de permettre une production efficace d'orthopositronium, pour former un faisceau d'anti-hydrogène (Publication 3), il a été montré qu'il était possible de produire des orthopositroniums dans l'alumine poreuse, dans une phase polycristalline. La structure du matériau laisse, de plus, espérer que les oPs produits pourraient être thermalisés (Publication 3).



Figure 2 : Développement technique concernant faisceaux de positrons et détecteurs.

Résultats, remerciements

Ces résultats ont été obtenus grâce au soutien de la région Rhône-Alpes à travers un projet Avenir. Les contacts entre les différents groupes de la collaboration ont été grandement facilités par le soutien du Ministère des Affaires étrangères à travers des projets ECONET et Hubert Curien :

- Projet Avenir (région Rhône-Alpes 2004-2006) : développement des techniques de positrons pour les matériaux.
- PAI Franco-Suisse Germaine de Staël 2004-2006.
- Réseau ECONET 2006-2007 : collaboration LAPP-LMOPS-INR (Moscou), INP (Minsk).
- Collaboration CNRS Académie des Sciences de Biélorussie.
- PHC 2008-2009 Rila : France – Bulgarie.
- Réseau ECONET 2008-2009 : collaboration LAPP-LMOPS-INR (Moscou), INP (Minsk), INRNE (Sofia).
- Les invitations de professeurs (G. Drobychev et N. Djourellov) par l'Université de Savoie ont été également une aide précieuse pour la collaboration.

Plan pour 2010-2014

Compte tenu des moyens réduits, il nous faut exprimer plutôt des possibilités que des plans. Celles-ci comprennent :

- Le développement d'une collaboration pour la caractérisation de matériaux, avec différents laboratoires.
- Eventuellement, la mise au point d'un faisceau de positrons à électrons secondaires.
- La recherche de matériaux permettant d'optimiser la production d'orthopositronium pour la production d'un faisceau d'anti-hydrogène.

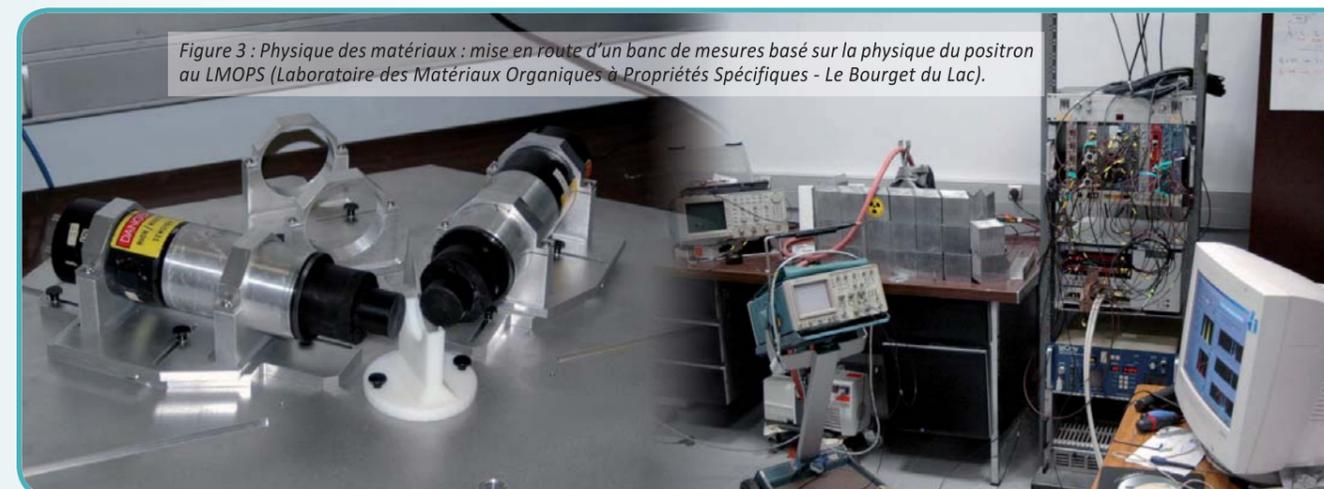


Figure 3 : Physique des matériaux : mise en route d'un banc de mesures basé sur la physique du positron au LMOPS (Laboratoire des Matériaux Organiques à Propriétés Spécifiques - Le Bourget du Lac).

Thèses

J. Viret, « Mise en place de technique par mesure de temps de vie des positons et application à la caractérisation de matériaux », Doctorat « Physique expérimentale et Instrumentation » soutenu le 19 juin 2006 à l'Université de Savoie, Le Bourget-du-Lac.

T. Anthonioz, « Développement d'un faisceau de positrons lents pour des mesures de physique de l'orthopositronium et de spectroscopie de temps de vie », Doctorat « Physiques des Particules, école doctorale de Physique et d'Astrophysique de Lyon », soutenu le 12 décembre 2007 à l'Université de Savoie, (LAPP) Annecy-le-Vieux.

N. Laforest, « Interaction des positons avec les systèmes macromoléculaires », Doctorat « Matériaux Polymères et Composites », soutenu le 3 décembre 2008 à l'Université de Savoie, (LMOPS) Le Bourget du Lac.

P. Crivelli, Ph.D. thesis: "A new search for invisible decays of ortho-positronium", No. 16617, ETH Zürich, Switzerland (2006).

Publications importantes

1. "An Improved Limit on Invisible Decays of Positronium", A. Badertscher et al, Phys. Rev D75 (2007), 032004.
2. "Proposed antimatter gravity measurement with an antihydrogen beam", AEGIS collaboration Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 266 (2008) 351–356.
3. "A study of positronium formation in anodic alumina", N Djourellov et al, J. Phys.: Condens. Matter 20 (2008) 095206 (8pp) doi:10.1088/0953-8984/20/9/095206.
4. "Symmetric analog positron lifetime spectrometer utilizing charge-to-digital converters", N. Djourellov et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B264(2007)165–170.
5. "Development of a high-efficiency pulsed slow positron beam for measurements with orthopositronium in vacuum", N. Alberola et al, Journal-ref: Nucl.Instrum.Meth.A560 (2006) 224-232.

L'équipe du LAPP

Physicien : **D. Sillou**

Doctorants : **J. Viret (jusqu'en juin 2006), T. Anthonioz (jusqu'en décembre 2007)**